

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

**Diseño de componentes de un transformador bajo
condiciones sísmicas**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO

**MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTA:**

ING. CAMILO JOEL SÁNCHEZ SANTILLÁN

DIRECTOR:

DR. MARIO EMIGDIO RODRÍGUEZ CASTILLO

CO-DIRECTORES:

DR. IGNACIO RODRÍGUEZ VARGAS

DR. LUIS MANUEL PALACIOS PINEDA

90 Páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo Noviembre de 2015.



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Pachuca

"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

División de Estudios de Posgrado e Investigación
Maestría en Ingeniería Mecánica
ACTA

Siendo las 13:00 horas del 22 de mayo de 2015, reunidos en el aula U10, el Consejo de Posgrado en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del trabajo de tesis titulado: *Diseño de componentes de un transformador bajo condiciones sísmicas*, con el siguiente contenido:

Resumen/Abstract

Nomenclatura

Introducción

Contenido

Índice de cuadros, gráficas y figuras.

1. Introducción
2. Marco Teórico
3. Procedimiento experimental
4. Resultados
5. Análisis de resultados

Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Apéndices

Para cubrir el requisito parcial correspondiente a TESIS para que el Ing. Camilo Joel Sánchez Santillán obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo, profesor del posgrado en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

ATENTAMENTE

"EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA"

EL CONSEJO DE POSGRADO


Dra. Erik Osiris Ávila Dávila


Dr. Palacios Pineda


Dr. Mario Emigdio Rodríguez
Castillo


Dr. Ignacio Ramírez Vargas


SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
I.T.P. PACHUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN


Dr. Abdiel Gómez Mercado

C.p. Archivo



Carretera México-Pachuca Km. 87.5 A. P. 276 C.P. 42080, Col.
Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo. Tels. : 7113073, 7113596, 7113140, 7115119,
7115538 Fax (01771)7113399 www.itpachuca.edu.mx





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Pachuca, Hidalgo, **4/NOVIEMBRE/2015**

OFICIO No. DEPI-172-2015

C. ING. CAMILO JOEL SÁNCHEZ SANTILLÁN
PRESENTE

La que suscribe, Jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, comunica a Usted que se autoriza la Impresión de Tesis titulada:

"Diseño de componentes de un transformador bajo condiciones sísmicas"

Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica, una vez que han sido efectuadas las correcciones indicadas por el Jurado correspondiente.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

"EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA"


DRA. ENKA OSIRIS ÁVILA DÁVILA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
I. T. PACHUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.p. Coordinación de Ingeniería Mecánica
Archivo
EOAD/lmp



Simbología

$-\ddot{u}_g(t)$	Aceleración de la tierra, véase la ecuación (2.2), página 20
$-m\ddot{u}_g(t)$	Ecuación de movimiento, véase la ecuación (2.1), página 20
\ddot{u}	Aceleración, véase la ecuación (2.1), página 20
\dot{u}	Velocidad, véase la ecuación (2.1), página 20
ω_n	Frecuencia natural, véase la ecuación (2.2), página 20
σ_p	Esfuerzo máximo en el perno de anclaje, véase la ecuación (4.41), página 43
σ_y	Esfuerzo de fluencia del material, véase la ecuación (4.78), página 57
ζ	Relación de amortiguamiento, véase la ecuación (2.2), página 20
A_p	Área del perno, véase la ecuación (4.41), página 43
a_p	Factor de amplificación do componente , véase la ecuación (4.0), página 28
a_g	Aceleración gravedad, véase la ecuación (4.15), página 33
a_h	Aceleración sísmica horizontal, véase la ecuación (4.10), página 30
a_v	Aceleración sísmica vertical, véase la ecuación (4.11), página 31
c	Constante de amortiguamiento, véase la ecuación (2.1), página 20
F_v	Coefficiente del lugar para periodos extensos 1s , véase la ecuación (4.0), página 28
F_a	Coefficiente del lugar para periodos cortos 0.2s , véase la ecuación (4.0), página 28
F_{1rhl}	Fuerza de reacción en el punto 1 originado por la fuerza longitudinal, véase la ecuación (4.27), página 39
F_{1rht}	Fuerza de reacción en el punto 1 originado por la fuerza transversal, véase la ecuación (4.18), página 35
F_{2rhl}	Fuerza de reacción en el punto 2 originado por la fuerza longitudinal, véase la ecuación (4.27), página 39
F_{2rht}	Fuerza de reacción en el punto 2 originado por la fuerza transversal, véase la ecuación (4.21), página 36

F_{3rhl}	Fuerza de reacción en el punto 3 originado por la fuerza longitudinal, véase la ecuación (4.23), página 37
F_{3rht}	Fuerza de reacción en el punto 3 originado por la fuerza transversal, véase la ecuación (4.21), página 36
F_{4rhl}	Fuerza de reacción en el punto 4 originado por la fuerza longitudinal, véase la ecuación (4.23), página 37
F_{4rht}	Fuerza de reacción en el punto 4 originado por la fuerza transversal, véase la ecuación (4.18), página 35
$F_{hl,ht}$	Fuerza horizontal longitudinal y transversal, véase la ecuación (4.17), página 34
F_{HP}	Fuerza horizontal longitudinal y transversal, véase la ecuación (4.36), página 42
F_{p1}	Fuerza sísmica horizontal, véase la ecuación (4.5), página 29
F_{p2}	Fuerza sísmica horizontal máxima, véase la ecuación (4.6), página 29
F_{p3}	Fuerza sísmica horizontal mínima, véase la ecuación (4.7), página 30
F_{PC}	Fuerza requerida de precarga, véase la ecuación (4.37), página 42
F_{perno}	Torque requerido, véase la ecuación (4.40), página 43
F_p	Fuerza sísmica horizontal, véase la ecuación (4.8), página 30
F_T	Tensión máxima por perno, véase la ecuación (4.40), página 43
F_v	Fuerza sísmica vertical, véase la ecuación (4.9), página 30
h	Elevación total del centro de gravedad del transformador, véase la ecuación (4.0), página 27
I_p	Factor de importancia de componente, véase la ecuación (4.0), página 28
I_{xx}	Momento de inercia en el eje xx de toda el área con al eje neutro, véase la ecuación (4.75), página 56
I_{yy}	Momento de inercia en el eje yy de toda el área con al eje neutro, véase la ecuación (4.75), página 56
k	Constante de la rigidez, véase la ecuación (2.1), página 20
m	Masa, véase la ecuación (2.2), página 20
m_1	Coefficiente de fricción entre la base y la fundación, véase la ecuación (4.36), página 42
m_2	Coefficiente de fricción entre los componentes de fijación, véase la ecuación (4.37), página 42
P	Peso del transformador, véase la ecuación (4.0), página 27
R_p	Factor de modificación de respuesta, véase la ecuación (4.0), página 28
S_1	Aceleración de espectro de respuesta de máximo terremoto considerado para un período de 1s, véase la ecuación (4.0), página 28

$S_a(T)$	Formación de espectro de respuesta del proyecto, véase la ecuación (4.12), página 32
$S_{am}(T)$	Espectro de respuesta máximo, véase la ecuación (4.15), página 32
S_S	Aceleración de espectro de respuesta de máximo terremoto considerado para un período corto (0.2s) , véase la ecuación (4.0), página 28
S_{D1}	Aceleración espectral de período 1s, véase la ecuación (4.4), página 29
S_{DS}	Aceleración espectral del periodo corto, véase la ecuación (4.3), página 29
S_{MI}	Aceleración de espectro de respuesta de máximo terremoto, véase la ecuación (4.2), página 29
S_{MS}	Parámetro de aceleración de respuesta espectral asignada a periodos cortos 0.2 s, véase la ecuación (4.1), página 28
T_L	Período largo de transición en segundos , véase la ecuación (4.14), página 32
T_n	Periodo natural , véase la ecuación (2.2), página 20
T_0	Periodo corto hasta 0.2 s, véase la ecuación (4.13), página 32
T_{req}	Torque requerido, véase la ecuación (4.38), página 43
T_S	Periodo largo hasta 1 s, véase la ecuación (4.14), página 32
u	Desplazamiento, véase la ecuación (2.1), página 20
W_{xx}	Modulo de sección en el eje xx, véase la ecuación (4.75), página 56
W_{yy}	Modulo de sección en el eje yy, véase la ecuación (4.75), página 56
z	Altura de la fundación del transformador a un punto de anclaje del transformador, véase la ecuación (4.0), página 27

Índice general

Simbología	v
Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xvii
Resumen	xviii
Abstract	xx
1. Introducción	1
2. Marco teórico	5
2.1. Transformador eléctrico	5
2.2. La importancia del transformador dentro del proceso de generación, transmisión y consumo de la energía eléctrica	5
2.3. Riesgo sísmico en transformadores	7
2.4. Antecedentes de terremotos en el pasado en subestaciones eléctricas	10
2.5. Causas de los terremotos y fallas	10
2.6. Medición de terremotos	16
2.6.1. Intensidad	17
2.6.2. Magnitud	17
2.6.3. Aceleración g	18
2.7. Movimientos de la tierra causados por terremotos	20
2.8. Registros de la respuesta	21
2.9. Espectro de respuesta a la deformación	22

3. Procedimiento experimental	23
3.1. Metodología de la investigación	23
3.1.1. Edificio estructurales	24
3.1.2. Componentes no estructurales	25
3.1.3. Edificio no estructurales	25
3.2. Método estático	25
3.3. Método elementos finitos.	25
4. Resultados	27
4.1. Cálculo de aceleraciones y fuerzas sísmicas	27
4.1.1. Mapas de parámetros de aceleración	27
4.1.2. Parámetros de aceleración espectral de diseño	29
4.1.3. Espectro de respuesta de diseño	31
4.1.4. Espectro de respuesta máximo considerado MCE_R	32
4.2. Método analítico para el cálculo de fuerzas en la base estructural del transformador	33
4.3. Análisis sísmico estructural de elementos del transformador.	44
4.3.1. Parámetros de sismo del soporte conexión de los radiadores	44
4.3.2. Análisis estructural del soporte del tanque conservador	54
5. Análisis de resultados	63
5.1. Resultados de elementos del transformador para condiciones normales de terreno (No sísmico)	63
5.1.1. Base de transformador para terreno no sísmico	64
5.1.2. Banco de radiadores de transformador para terreno no sísmico	65
5.1.3. Tanque conservador de transformador para terreno no sísmico	66
5.2. Comparación de resultados obtenidos del transformador para condiciones normales sin calificación sísmica contra las condiciones del transformador con calificación sísmica	67
5.2.1. Comparación de resultados de base de transformador con y sin calificación sísmica	69
5.2.2. Comparación de resultados del banco de radiadores del transformador con y sin calificación sísmica	70
5.2.3. Comparación de resultados para el taque conservador del transformador con y sin calificación sísmica	71

Conclusiones	73
Apéndice	75
Bibliografía	90

Índice de figuras

2.1. Transformador de potencia 25 MVA	6
2.2. Partes de un transformador de potencia 80 MVA	7
2.3. Proceso de transmisión de energía	8
2.4. Subestación en Edgcumbe, Nueva Zelanda, 1987	11
2.5. Subestación en Haiti, 2010	12
2.6. Placas tectónicas alrededor del mundo	13
2.7. Corte transversal de la tierra con los principales tipos de frontera de placas	14
2.8. Mecanismo tectónico en la frontera de la placa	16
2.9. Componentes de aceleración durante un sismo	18
2.10. Sistema de un solo grado de libertad	20
2.11. Respuesta de la deformacion del sistema SDF para el Centro	21
4.1. Espectro de respuesta de diseño	31
4.2. Diagrama que indica la posición del centro de gravedad del transformador en operación	34
4.3. Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a la F_{ht} en los puntos 1,2,3 y 4	35
4.4. Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a F_{1rht} y F_{4rht} . .	36
4.5. Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a F_{2rht} y F_{3rht} .	37
4.6. Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$	37
4.7. Diagrama relación tangente del punto B de las fuerzas $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$	38
4.8. Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a $F_{1rhl} + F_{2rhl}$.	39
4.9. Diagrama relación tangente de las fuerzas $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$. .	40

4.10. Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a $F_{3rhl} + F_{4rhl}$. . .	41
4.11. Diagrama de las fuerzas en los puntos de fijación del transformador. . . .	42
4.12. Transformador de potencia 100 MVA 230 kV	44
4.13. Diagrama que indica la posición del centro de gravedad del sistema de conexión y soporte del radiador	46
4.14. Esfuerzo máximo en zona de escalonamiento	52
4.15. Esfuerzos máximos en el sistema de conexión y soporte del radiador . . .	52
4.16. diagrama que indica la posición del centro de gravedad del tanque conser- vador, su soporte y la forma de aplicación de las cargas	55
4.17. Sección transversal del soporte conservador.	56
4.18. Diagrama de cuerpo libre para determinar las reacciones en los tornillos del conservador.	58
4.19. Sección transversal para determinar las propiedades de sección transversal de las piernas del conservador.	59
4.20. Esfuerzo máximo en zona de escalonamiento	61
4.21. Esfuerzos máximos en el soporte del tanque conservador	61
5.1. Transformador de potencia 100 mVA para terreno no sísmico	63
5.2. Base de transformador para terreno no sísmico	65
5.3. Banco de radiadores de transformador para terreno no sísmico	66
5.4. Comparación de radiadores	67
5.5. Comparación de base	68
5.6. Comparación de base, radica principalmente en la extensión de la base en el eje transversal y sus barrenos para anclaje a la cimentación	69
5.7. El ancla alcanzó la fluencia producida por el esfuerzo cortante causado por el sismo	70
5.8. El ancla alcanzó la fluencia producida por el esfuerzo cortante causado por el sismo	70
5.9. Comparación de radiadores	71
5.10. Comparación de radiadores	72
11. S_S Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Paráme- tros de movimiento sísmico en los Estados Unidos de América para una aceleración de respuesta espectral de 0.2s (Para % 5 amortiguamiento critico), Clase de sitio B. [3]	76

12.	Continuación 11. [3]	77
13.	S_1 Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en los Estados Unidos de América para una aceleración de respuesta espectral de 1s (Para % 5 amortiguamiento critico), Clase de sitio B. [3]	78
14.	Continuación 13. [3]	79
15.	S_S Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Alaska para una aceleración de respuesta espectral de 0.2s (Para % 5 amortiguamiento critico), Clase de sitio B. [3]	80
16.	S_1 Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Alaska para una aceleración de respuesta espectral de 1s (Para % 5 amortiguamiento critico), Clase de sitio B [3]	81
17.	S_S y S_1 Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Hawaii para una aceleración de respuesta espectral de 0.2s y 1s (Para % 5 amortiguamiento critico), Clase de sitio B. [3]	82
18.	S_S y S_1 Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Puerto Rico para una aceleración de respuesta espectral de 1s (Para % 5 amortiguamiento critico), Clase de sitio B. [3]	83
19.	Coefficientes de sitio F_a y F_v . [3]	84
20.	Coefficientes sísmicos para componentes eléctricos. [3]	84
21.	Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para Estados Unidos de América. [3]	85
22.	Continuación 21. [3]	86
23.	Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para Alaska. [3]	87
24.	Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para Hawaii. [3]	87
25.	Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para las Islas Virgen. [3]	88
26.	Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para puerto Guam y América Samoa. [3]	88

Índice de tablas

2.1. Descripciones de intensidad con la correspondiente aceleración máxima del suelo (AMS) y la velocidad máxima del suelo (VMS). Así como el grado de intensidad instrumental varía de I a X en función de la aceleración sísmica.	19
4.1. Clase de sitio [3].	28
4.2. Parámetros particulares para el análisis estructural.	33
4.3. Valores de la fuerza de tensión en los apoyos bajo la acción de las aceleraciones de a_v y a_h .	41
4.4. Parámetros particulares para el análisis estructural en los pernos de anclaje.	43
4.5. Parámetros particulares para el análisis estructural del soporte/conexión de los radiadores.	45
4.6. Esfuerzos principales y factor de seguridad en los tornillos de las juntas A y B.	51
4.7. Condiciones iniciales.	51
4.8. Esfuerzos principales del radiador escalonado.	53
4.9. Parámetros particulares para el análisis estructural del soporte del tanque conservador.	54
4.10. Esfuerzos principales y factor de seguridad en la placa y los tornillos del soporte conservador.	60
4.11. Condiciones iniciales.	60
4.12. Esfuerzo y deformación máximos del soporte del tanque conservador.	62

- Resumen

Un transformador de potencia es una maquina eléctrica que transfiere energía de un circuito a otro sin partes en movimiento. Para la instalación de una subestación eléctrica el gobierno establece los lineamientos conforme a ASCE 07. El ingeniero civil de la obra verifica que los elementos de la subestación eléctrica cumplan con requerimientos locales relacionados con la actividad sísmica entre otros.

Los institutos internacionales como el IEEE en su norma C57.12.00 establecen los estándares para el diseño, manufactura, calificación y métodos de certificación para las pruebas. En caso de sismo los elementos de la subestación eléctrica deben soportar las cargas generadas por el mismo, por lo que el IEEE desarrolló la especificación IEEE 693 recomendaciones prácticas para diseño sísmico en subestaciones. Todo fabricante de transformadores de potencia debe cumplir con dicho requerimiento.

Para el diseño mecánico de los transformadores la norma IEEE 693-2005 indica el alcance, procedimiento y formato de los resultados del análisis. Los valores resultantes de este análisis son usados internamente por el fabricante para garantizar el funcionamiento y calificar el transformador en apego a esta especificación. Cuando el cliente requiere de una validación para fines legales y de garantías, estos cálculos y resultados deberán ser validados por un ingeniero civil con licencia aprobada por el estado a fin de darles validez contractual oficial.

Los lineamientos de la norma IEEE 693, hacen referencia a la ASCE 07, norma relacionada con el análisis de suelos. Para cumplir con la ASCE 07 se realizó el procedimiento para calcular las aceleraciones horizontal y vertical máximas que se pueden desarrollar durante un terremoto en el área sísmica, donde el transformador será instalado. Para este caso las ecuaciones establecidas por la ASCE 07 fueron programadas en el sistema computacional MATHCAD, donde se tiene una hoja de cálculo que desarrolla el análisis de forma prácticamente automática. Se obtienen las gráficas de espectro de aceleración y la máxima aceleración espectral. Con los espectros obtenidos, se procedió a calificar el nivel de sismo siguiendo los requerimientos de la IEEE 693-2005, como nivel bajo, moderado o alto. La norma IEEE 693 requiere un análisis estático para el diseño de transformadores mayores de 115 kV. Se realizó un análisis estático para la base de ancla-

je donde se considera al transformador como un cuerpo rígido, donde todas las cargas se aplican en el centro de la gravedad cuando el transformador está completamente ensamblado y las reacciones en cada posición de anclaje se calculan a partir de ecuaciones de equilibrio. El método proporciona las reacciones en los puntos de anclaje para elegir el diámetro nominal y demás características del anclaje. El valor especificado en la norma IEEE 693-2005 para elementos externos es de tres veces la aceleración del suelo.

También se realizó una simulación en el programa computacional ANSYS 14 workbench, se trabajó en el módulo estático estructural. Mediante el análisis estático en ANSYS 14 se encontraron diversos puntos para reforzar en los accesorios del transformador, como radiadores y tanque conservador.

Abstract

A power transformer is an electrical static machine. The system gives the energy from one circuit to another without moving parts. International institutions such as the IEEE C57.12.00 establishes standards to meet in the design, manufacture, qualification and certification methods for testing,

For the installation of an electrical substation the government established the standards under ASCE 07 specification. The civil engineer determines if the elements in the substation electric must meet specials requirements to withstand seismic activity.

Internationals specification such as IEEE in its normative C57.12.00 established the standard to design, to manufactured, to qualification and certification test methods. The electric substation must support the loads developed by the seism. The IEEE developed the specification IEEE 693 recommended Practice for seismic design of substations. All the manufacturer of power transformers must meet IEEE 693 specification.

The IEEE 693 specification indicates the scope for the mechanical design on the power transformers, procedure and format of the analysis results. The analysis results values are using internally in the factory to guarantee performance and to qualified the transformer regarding IEEE 693 specification. When the customer requires a validation for legal and guarantee purposes, these calculations and results they must be validated by a licensed civil engineer approved by the state in order to give official contractual validity.

The guidelines of the IEEE 693 standard refers to the ASCE 07 standard specification related to soil analysis. To meet the specification it performed a procedure to calculate the maximum horizontal and vertical accelerations that may develop during an earthquake in the seismic area, where the transformer will be installed. The equations indicated in the ASCE 07 specification were programmed in MATHCAD. The graphics acceleration spectrum and the maximum spectral acceleration were gotten by this application. With the spectral acceleration obtained, it proceeded to qualify the level of earthquake for IEEE 693 as low, moderate or high level.

The IEEE 693 determines perform a static analysis to design over 115 kV transfor-

mers. A static analysis for the base of the transformer, assuming that the transformer is rigid body, all the applied loads are acting on the center of gravity of the transformer completely assembled and the reactions at each anchor positions are calculated from equations of equilibrium. The method provides the reactions at the anchor points to choose the anchor diameter. The value specified in the IEEE 693-2005 standard for the transformers elements is three times the ground acceleration

ANSYS 14 Workbench simulation was also conducted, it worked in the structural static module. Through static analysis in ANSYS some points were found to reinforce appendages on transformer such as radiators and conservator tank.

Capítulo 1

Introducción

Los terremotos son un gran problema para la humanidad, matando a miles de personas durante un sismo de gran intensidad cada año, en promedio 10000 personas por año murieron en el siglo XX [9]. Los terremotos también son polifacéticos, a veces causando muerte y destrucción en una amplia variedad de formas, como derrumbe de edificios, incendios, maremotos y deslizamientos de tierra. Los gobiernos están conscientes sobre el riesgo sísmico que puede provocar un sismo de gran magnitud en un bien capital, las consecuencias ambientales en la derrama de aceite en consecuencia la contaminación de suelos y mantos freáticos o acuíferos cercanos a la subestación eléctrica y la pérdida del equipo usado en la subestación. Los equipos eléctricos empleados en subestaciones eléctricas de alta tensión, desarrollan grandes esfuerzos ante sismos de gran intensidad, a causa de su gran masa inercial, pudiendo provocar graves daños, que pueden incluir el colapso de los equipos y sus componentes, la reparación o la sustitución de éstos, así como pérdidas económicas indirectas debidas a la interrupción del suministro de energía eléctrica y paralización del sector económico de la comunidad perjudicada. Los transformadores están instalados directamente en una cimentación en la subestación eléctrica. Los componentes que presenta mayor daño por efectos sísmicos, es el sistema de anclaje de los transformadores de potencia, debido a las grandes deformaciones que se desarrollan en la base y el comportamiento inelástico que puede alcanzar dicho sistema de anclaje. Este comportamiento puede generar a su vez grandes desplazamientos que generan también daños en elementos secundarios como son las boquillas, aisladores, tuberías, juntas y sellos de conexión, e inclusive a la misma cimentación del transformador. Actualmente el gobierno de los estados unidos de norte américa junto con otros países alrededor del

mundo, han optado por seguir los lineamientos sísmicos establecidos por la IEEE-693-2005 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en español Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos para el diseño de subestaciones eléctricas.

Actualmente se requiere trasportar grandes cantidades de fluido eléctrico desde las fuentes de generación hasta los centros de consumo, no sería concebible sin el desarrollo de ciertos equipos eléctricos como es el caso característico de los transformadores.

Como la demanda eléctrica han ido en aumento, la industria eléctrica también ha tenido un mayor crecimiento; luego entonces, la dificultad de trasladar este tipo de energía de un lugar a otro fue haciéndose más evidente, pues en sus principios se generaba corriente directa a baja tensión para alimentar los circuitos de alumbrado y de fuerza motriz; esto hacia sumamente ineficiente la transmisión de grandes bloques de energía. Se vio entonces la necesidad de elevar la tensión en los centros de generación para llevar a cabo la transmisión de energía y reducirlos a los centros de carga y de consumo.

El dispositivo ideal para llevar a cabo este proceso de transformación es el transformador, cambiándose con ello el uso de corriente directa a corriente alterna, dado que el transformador solo funciona con corriente alterna. Las grandes plantas de generación o estaciones centrales generan energía en forma masiva, la cual luego es transmitida a subestaciones en puntos cercanos a los sitios donde será utilizada. La energía es distribuida desde las subestaciones hasta los usuarios.

Durante un sismo hay una aceleración de la superficie del terreno. Esta aceleración puede descomponerse en componentes vertical y horizontal. Por lo general la componente vertical es ligera, mientras que la componente horizontal puede ser muy grave. Las fuerzas de fricción debidas a las cargas por gravedad no deben ser consideradas para proporcionar resistencia a las fuerzas sísmicas [14].

Problema

Falta de procedimientos y especificación interna en WEG Transformadores de producir equipos para la región de los Estados Unidos de Norte América calificados por la IEEE-693 debido que el transformador es el elemento más importante en una subestación eléctrica, aunado al tiempo de respuesta largo, el costo, la complejidad de respuesta para la industria que involucra la contratación de un consultor externo y el número reducido de ingenieros mecánicos capacitados para validar la integridad estructural de

un transformador de potencia bajo la acción de la aceleración generada por un sismo. Genera e incentiva el mejoramiento de las capacidades del personal para la realización y calificación de este tipo de análisis.

Objetivo

Desarrollar un método teórico para calcular las aceleraciones horizontal y vertical, originadas por un sismo en la región de los Estados Unidos de Norte América y calcular analíticamente el diseño de los componentes de un transformador de potencia para que soporte las aceleraciones obtenidas por el cálculo de aceleraciones bajo la IEEE 693. El método teórico para las aceleraciones sísmicas deberá desarrollarse bajo la IEEE 693 y deberá cumplir los lineamientos de la IBC y La ASCE 07. Determinadas las aceleraciones deberá calificar el nivel sísmico de acuerdo a la IEEE 693, como bajo, moderado o alto. El transformador de potencia cuenta con componentes que deben calificarse que soportan los esfuerzos causados por las aceleraciones. La base del transformador debe realizar un cálculo para determinar las máximas reacciones en cada punto de anclaje ya sea por anclas atornilladas o elementos soldados para soportar los esfuerzos producidos por los esfuerzos cortantes y a tensión que se generen durante el sismo. Los accesorios como base del tanque conservador, tanque conservador, radiadores, soporte para rayos y gabinete de control deberá deberán cumplir con la IEEE 693, deberá calculo analítico para cada uno de los accesorios y determinar los esfuerzos máximos.

Hipótesis

Actualmente existen dos formas de abordar la solución del problema, una es utilizando algún método analítico y la otra es por medio de algún método numérico con la ayuda de algún software de elemento finito. Aun cuando los recursos computacionales son cada vez más eficientes los resultados obtenidos hasta ahora son aproximaciones bastante precisas. Trabajando con las especificaciones IEEE 693 2005, ASCE 113, ASCE 7 se determina las aceleraciones máximas horizontal y vertical, el espectro de respuesta de diseño y el espectro de respuesta máximo considerado, en cada lugar de los Estados Unidos de América. Siguiendo métodos analíticos, leyes de Newton para la determinación de las fuerzas máximas y aplicando los principios de resistencia de materiales para

cada elemento del transformador, se obtendrán los máximos esfuerzos aplicados en elementos de un transformador. Los resultados obtenidos se validaran mediante el uso de un programa de elemento finito.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Transformador eléctrico

Un transformador es un dispositivo eléctrico sin partes en movimiento, que se basa en el principio de la inducción electromagnética, para transferir la energía eléctrica en corriente alterna (C. A) de un circuito a otro, sin que exista contacto físico entre ambos, ni variación en la frecuencia. Normalmente esta transferencia de energía va acompañada de cambios en los valores de tensión y corriente, la figura 2.1 muestra un transformador.

2.2. La importancia del transformador dentro del proceso de generación, transmisión y consumo de la energía eléctrica

Conforme la industria eléctrica fue teniendo un mayor crecimiento, la dificultad de trasladar este tipo de energía de un lugar a otro, fue haciéndose más evidente, pues los circuitos eléctricos trabajaban en base a corriente directa y a baja tensión, lo cual los hacía sumamente ineficientes para la transmisión. Se vio entonces la necesidad de elevar el voltaje en los centros de generación para llevar a cabo la transmisión de la energía y reducirlo al llegar a los centros de consumo (centros de carga).

El dispositivo ideal para llevar a cabo esta función es el transformador de potencia, cambiándose con ello, el uso de la corriente directa a corriente alterna, dado que el trans-

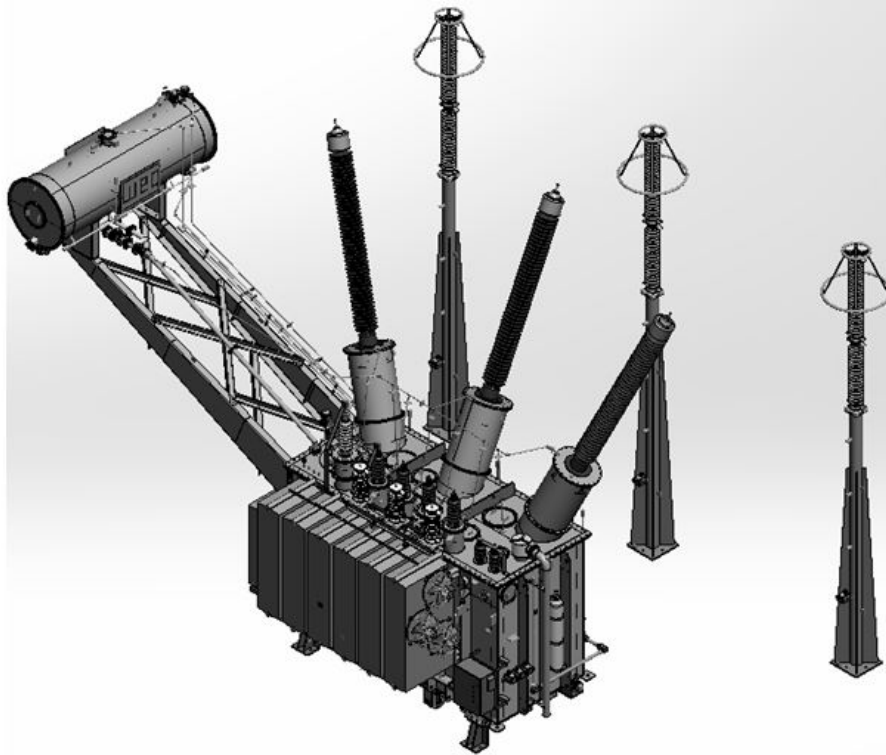


Figura 2.1: Transformador de potencia 25 MVA

formador funciona solo con corriente alterna.

La partes de un trasformador de potencia se muestran en la figura 2.2.

En la figura2.3 se observa que para poder llevar la energía a los centros de consumo desde los centros de generación, es necesarios el uso de cuando menos cuatro transformadores, los cuales tienen una función determinada. Estas unidades se encuentran normalmente, formando subestaciones eléctricas y según la potencia que manejen, reciben el nombre de transformadores de potencia o de distribución y pueden ser elevadores, reductores o de aislamiento.

Además, existen los transformadores para instrumento, que son empleados para la protección, control y medición de los circuitos eléctricos de potencia. Como se puede observar, los transformadores son una parte fundamental en los sistemas eléctricos en general incluso en los circuitos electrónicos.

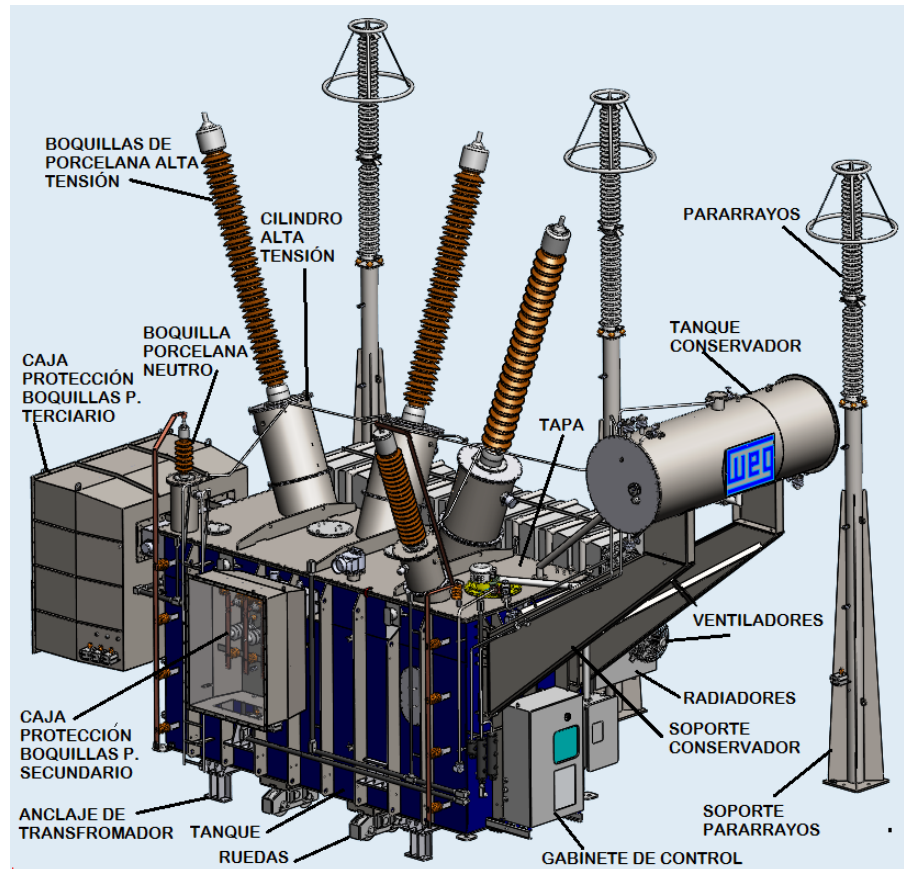


Figura 2.2: Partes de un transformador de potencia 80 MVA

2.3. Riesgo sísmico en transformadores

Los transformadores son construidos de dos maneras en el posicionamiento del núcleo.

1. Núcleo tipo columna: El núcleo se coloca en posición vertical y las bobinas quedan alineadas de forma horizontal, las bobinas tienen un sistema de fijación soportado por el núcleo dentro del transformador.
2. Núcleo tipo concha: Como su nombre lo dice el núcleo cubre la bobina, Normalmente tiene la base pequeña y una altura mayor, debido a que las bobinas se apilan de forma vertical.

En las subestaciones eléctricas, los componentes clave son los transformadores de potencia, son susceptibles a ser dañados bajo el evento de un sismo. Los transformadores



Figura 2.3: Proceso de transmisión de energía

de potencia tienen más de varios elementos externos, la siguiente figura 2.2 muestra los elementos principales para operación óptima del transformador .

El transformador tienen varios componentes que están relacionados con el comportamiento del terremoto: Relevadores de presión súbita, relevadores de protección, anclaje, radiadores, boquillas, tanque conservador, sistema de pararrayos, boquillas del terciario.

El efecto de la pérdida de un transformador es generalmente significativo, al menos que se tenga una refacción disponible o si se conecta una segunda unidad al banco de transformadores en paralelo con la unidad dañada. Las consecuencias del daño en el transformador dependerán del sistema de configuración y de otros sistemas de elementos que pudieron haberse dañado por el sismo.

A lo largo de los años se ha tenido registro de los sismos de mayor impacto, han existido evidencia de la destrucción en subestaciones eléctricas, en la falta de un análisis sobre los soportes de pararrayos, tanque conservador, radiadores del transformador y elementos de anclaje han resultado dañados durante un sismo.

La siguiente lista contiene las fallas recurrentes en los transformadores de potencia:

1. Falla de la cimentación del transformador: En el estado de California en los Estados Unidos, las variaciones han sido bastante amplias debido al terremoto. La diferencia más notable está reflejada en el grosor de la cimentación. Con cimentaciones delgadas de 0.23 m de espesor y algunas cimentaciones de más de 1 m de espesor. Aún algunas cimentaciones con reforzamiento moderado no han tenido falla, Sin

embargo, diseñar anclas propias cuando la fundación es muy delgada. Han existido casos donde las cimentaciones delgadas se han quebrado durante el movimiento de un transformador de un lugar a otro.

2. Falla de anclaje del transformador: Hay cuatro enfoques usados en una instalación de un transformador de potencia. Cuando una pequeña consideración de no anclar el transformador y el transformado fue derribado por el terremoto. Otros dos enfoques diseccionados por el terremoto es por las fallas en los pernos de anclaje o las soldaduras en las placas embebidas en la plancha de la fundación. Dentro de cada enfoque hay variaciones. Por ejemplo, en una grande subestación soporta muchos grandes transformadores viejos sobre una serie de rieles cercanamente espaciados. Esto permite circular el aire debajo el transformador para evitar la corrosión y proporcionar una enfriamiento adicional bajo la base [15].
3. Falla del banco de radiadores: Los radiadores en los transformadores son usados para enfriar el aceite que circula alrededor de las bobinas. El aceite puede circular por convección natural, si circula el aceite por medio de bombas es considerado de tipo de aceite forzado. Si tiene ventiladores es considerado como de aire forzado. Algunos radiadores están montados sobre un colector, y otros están soportados por su propia estructura. Una fuga en un radiador no es comuna, la mayoría se origina después del terremoto en las uniones bridadas, algunas veces simplemente apretando los tornillos para de fugar. Fugas grandes requiere que el equipo salga de operación. El aceite expuesto corre riesgo de incendio y requiere una limpieza buena [15].
4. Falla de los tanques conservadores: Los tanques conservadores son tanques largos que pueden almacenar hasta 4000 litros de aceite, el tanque conservador es soportado por encima del tanque del transformador, este sirve como contenedor de reserva para absorber la expansión del aceite que se encuentra el tanque principal. Los tipos de falla que se han observado, es cuando el sistema de soporte falla o la tubería de conexión entre el tanque principal y el conservador falla [15].
5. Falla en las gabinetes de control: El gabinete de control es un armario en el cual se encuentran cableados a bornes, todos los accesorios de monitoreo del transformador, termómetros, niveles de aceite, relevadores, válvulas de sobre presión etc. Algunas veces por almacenar todo el equipo de control su tamaño y dimensiones

es considerablemente grande aproximadamente, 20 m x 2 m x 0.5 m, con una masa de 1000 kg por sus propiedades de tamaño y base durante es sacudimiento del terremoto puede caer del transformador.

2.4. Antecedentes de terremotos en el pasado en subestaciones eléctricas

La falla de sistemas eléctricos de potencia debidos a los terremotos Northridge en 1994 en Estados Unidos, en 1999 Izmit en Turquía, 1999 Chi-chi en Taiwan y otros recientes terremotos han demostrado la necesidad critica para las redes de energia durante y después del terremoto [16].

Las dos primeras son las fallas más comunes en los transformadores, la figura 2.4 muestra la fuerza de la naturaleza y lo que puede ocasionar un terremoto magnitud 5.2 Richter en subestaciones eléctricas.

La figura 2.5 muestra el daño en seis transformadores, causado por un terremoto magnitud 7 Richter.

Las fallas más comunes en transformadores de potencia son que no están anclados en regiones propensas a terremotos. Esto es una práctica común, fijar la base del transformador con la base estructural de la subestación, con tornillos de anclaje o con soldadura. Sin embargo, hay muchos casos en que el tornillo o la soldadura fallan durante el sismo. El diseño del anclaje en los soportes requiere consideraciones de grandes fuerzas no solo debidas a la gravedad y a las fuerzas sísmicas sino también desde los momentos de giro en ambas direcciones. También el anclaje debe tener una rigidez adecuada para prevenir la iniciación de fuerzas de impacto que puedan dañar los elementos internos o excitar los modos más altos que puedan dañar o quebrar las boquillas de porcelana

2.5. Causas de los terremotos y fallas

Un terremoto es manifestado como sacudimiento de la tierra causado por una liberación súbita de energía en la corteza de la tierra, está energía podría originarse por diferentes fuentes, tal como la dislocación de la corteza, la erupción de un volcán, o por cualquier explosión hecha por el hombre, el colapso de cavidades bajo la tierra. Así, mientras los terremotos están definidos como perturbaciones naturales, existen diferen-



Figura 2.4: Subestación en Edgecumbe, Nueva Zelanda, 1987

tes tipos de terremotos, falla ruptura inducida, volcánica, provocada por la minería y por depósito grande inducido. Richter (1958) ha proporcionado una lista de las mayores protuberancias gravadas por un sismógrafo [9].

La aparición de los terremotos puede ser explicada por la teoría de gran escala del proceso tectónico, nombrado como placa tectónica. La teoría de la tectónica de placas se deriva de la teoría de la separación continental y la expansión del fondo oceánico. Entendiendo la relación entre la geofísica y la geología de una región en particular la actividad sísmica inicio al finales de siglo XIX [4]. Los terremotos están ahora reconocidos de ser el síntoma de la actividad de movimiento tectónico [6]. Este es confirmado por la observación que la intensidad de la actividad sísmica ocurre predominantemente sobre los cuerpos de las placas como se muestran en la figura 2.6 [9].

Las placas son grandes losas estables rígidas de roca con un espesor de unos 100 km, la formación de la corteza , o litosfera y parte del manto superior de la Tierra. La corteza es la capa de roca exterior con una estructura geológica interna compleja y un espesor no uniforme de 25 a 60 km bajo Continentes y 4 a 6 km bajo océanos. El manto es la parte del interior de la tierra debajo de la corteza, que se extiende desde una profundidad



Figura 2.5: Subestación en Haití, 2010

de unos 30 km hasta aproximadamente 2900 km; Consta de densa roca de silicato. La litosfera se mueve diferencialmente sobre la astenosfera subyacente, la cual es una capa más suave más caliente alrededor de 400 km de espesor a una profundidad de la litosfera es causada por corrientes de convección en el manto; la velocidad del movimiento es de aproximadamente 1 a 10 cm/año. Movimiento de las placas actuales se puede seguir directamente por medio de mediciones geodésicas espaciales fiables basados, como líneas de base muy largas de interferometría, que van desde láser por satélite y los sistemas de posicionamiento global.

Grandes fuerzas tectónicas tienen lugar en los bordes de la placa debido al movimiento relativo del complejo astenosfera y la litosfera. Estas fuerzas producen cambios físicos y químicos afectan a la geología de la placa contigua. Sin embargo, solamente la litosfera tiene la fuerza y el comportamiento fractura frágil, causando así un terremoto.

De acuerdo a la teoría de desviación continental, la litosfera está dividida en 15 placas rígidas, incluyendo la corteza continental y oceánica. Las fronteras de las placas, donde los terremotos frecuentemente ocurren, son también llamados placas de sismo [13]. La placa pacífico y euroasiático son los más sísmicamente activos. La forma que conecta a Nueva

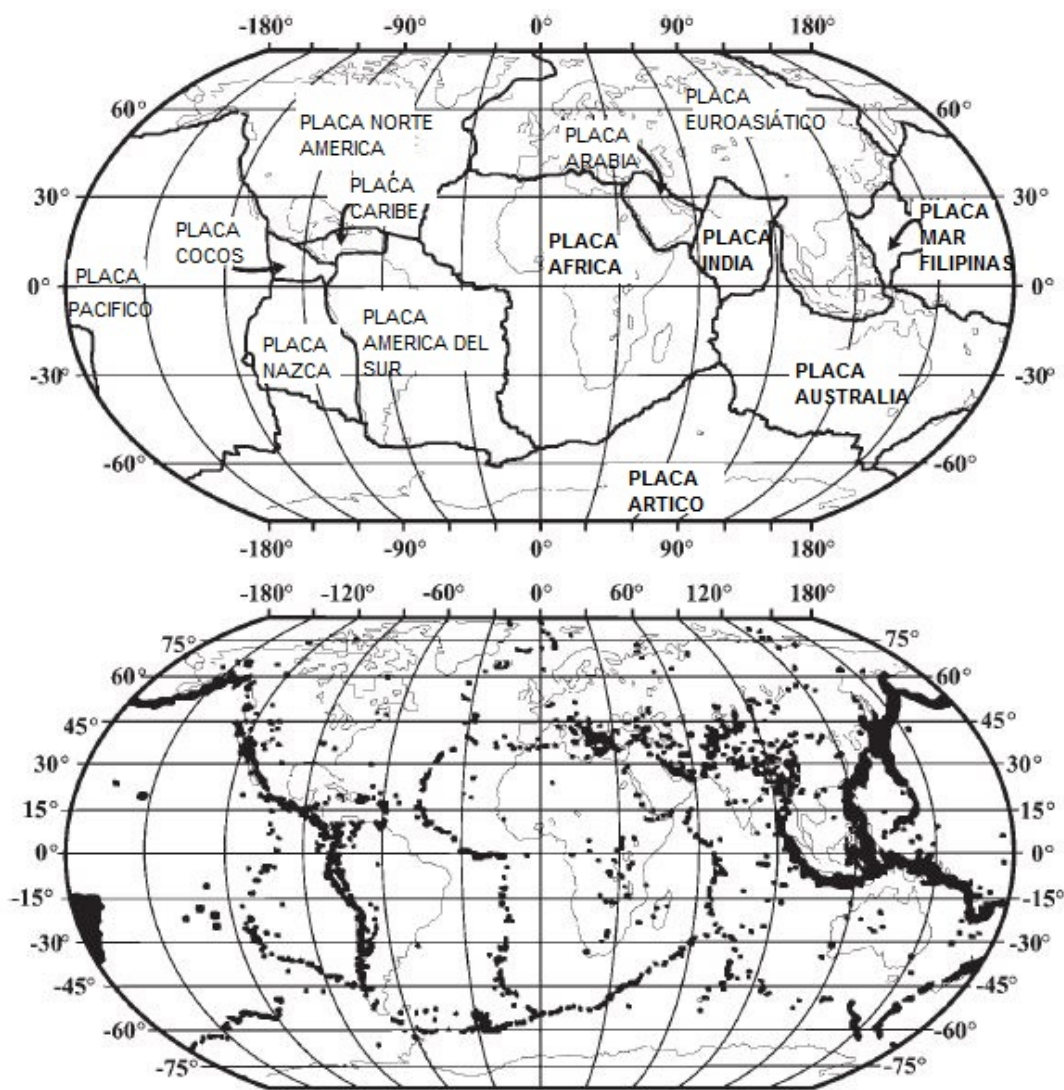


Figura 2.6: Placas tectónicas alrededor del mundo

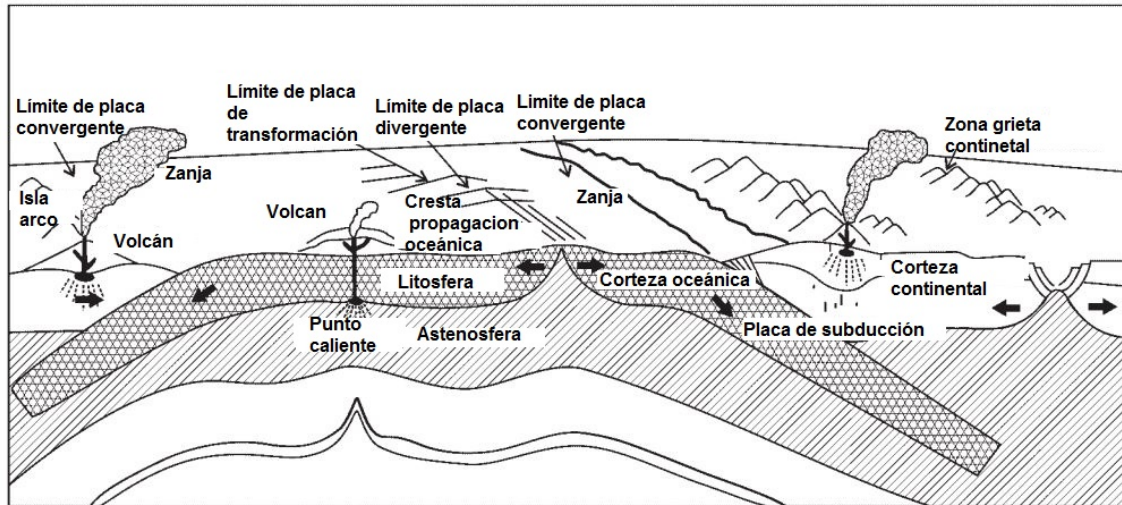


Figura 2.7: Corte transversal de la tierra con los principales tipos de frontera de placas

Zelandia y Nueva Guinea, las Filipinas, Japón, las Aleutianas, la costa oeste de los Estados Unidos de Norteamérica y el oeste de América del Sur. En 1994 Northridge (California) y en 1995 Kobe (Japón) ocurrieron terremotos a lo largo de la placa del Pacífico. La placa Euroasiática liga la parte noreste del mar Mediterráneo, Asia central, parte sureste de los Himalayas y Indonesia. El terremoto en el océano Índico en diciembre del 2004 y el terremoto de Kashmir, el 8 de octubre del 2005 fueron generados por la actividad del cinturón Euroasiático.

Los principales tipos de frontera de placas pueden ser agrupados como sigue figura 2.7.:

1. Divergentes o grietas. Placas se separan unas de otras y bien un rociamiento de rocas fundidas (magma) se produce o la litosfera diverge del interior de la tierra. Grietas son distintas de las dorsales oceánicas, donde se crea nueva corteza oceánica y la litosfera por expansión del fondo oceánico.
2. Convergentes o de subducción. Placas adyacentes convergen y se cruzan. Un proceso de subducción lleva la placa losa o placa de empuje en una zona de inmersión, también referida como la Zona Wadati Benioff, en la medida de la baja como 650 a 700 kilómetros en el interior de la tierra.

3. Zona de transformación o zona de deslizamiento horizontal transcurrente. Dos placas se deslizan entre sí, pero sin crear nueva litosfera en subducción o vieja litosfera, fallas de transformación se pueden encontrar tanto en la litosfera continental o oceánica. Estas pueden compensar cordilleras oceánicas, zonas de subducción o ambas. fronteras de deslizamiento horizontal transcurrente puede conectar a ambas zonas divergentes y convergente o dos zonas convergentes. La falla de San Andreas en California es un ejemplo de una transformación de conexión límite de dos cordilleras en expansión, a saber, la América del Norte y las placas del Pacífico en el Golfo de California hasta el sur y gorda cordillera en el norte. Los terremotos ocurren normalmente a una profundidad de varias decenas de kilómetros, con un poco de vez en cuando se producen a una profundidad de varios cientos de kilómetros. Los límites de placas divergentes forman bandas estrechas de sismos superficiales ocurren en zonas convergentes en las bandas de cientos de kilómetros de ancho. Terremotos convergencia Continental pueden ser muy grandes, Por ejemplo, el 1897 en Assam (India) el terremoto causó grandes daños y una superficie interrumpida, lo que exige la actualización del uso de la escala del modelo de medición de la intensidad de los terremotos (Richter, 1958). Terremotos profundos, por ejemplo, entre 300 y 700 kilómetros de profundidad, generalmente se encuentran en las zonas de subducción sobre regiones la cual puede extenderse por más de un millar de kilómetros, estos terremotos se vuelven más profundos como la distancia desde la trinchera oceánica aumenta, como se muestra en la figura 2.8.

Sin embargo las zonas sísmicas Wadati y Benioff se limitan a la parte superior de las zonas de subducción, cerca de 700 km de profundidad, más allá de esta profundidad, cualquiera de las placas absorbidos en el manto o de sus propiedades son alteradas y liberación de energía sísmica se inhibe. Terremotos poco profundos con magnitud grande pueden ocurrir junto con fallas de transformación. Por ejemplo, la ciudad de Guatemala fue la más destruida durante la devastación del terremoto 1976, la falla ocurrió en la falla de Motagua. Esta última constituye el límite de transformación entre dos zonas de subducción, situadas respectivamente en la Costa Pacífico de América Central y las islas Leeward y Windward en el océano atlántico.

La teoría de placas tectónicas proporciona una simple y una explicación geológica general para las fronteras de las placas, la cual contribuye al 95 por ciento de la energía sísmica liberada alrededor del mundo. Esto es sin embargo, para ser notados

que los terremotos no están confinados para las fronteras de las placas. Magnitudes pequeñas locales, dentro de las placas de los terremotos, la cual puede ocurrir en cualquier parte y causar un daño considerable.

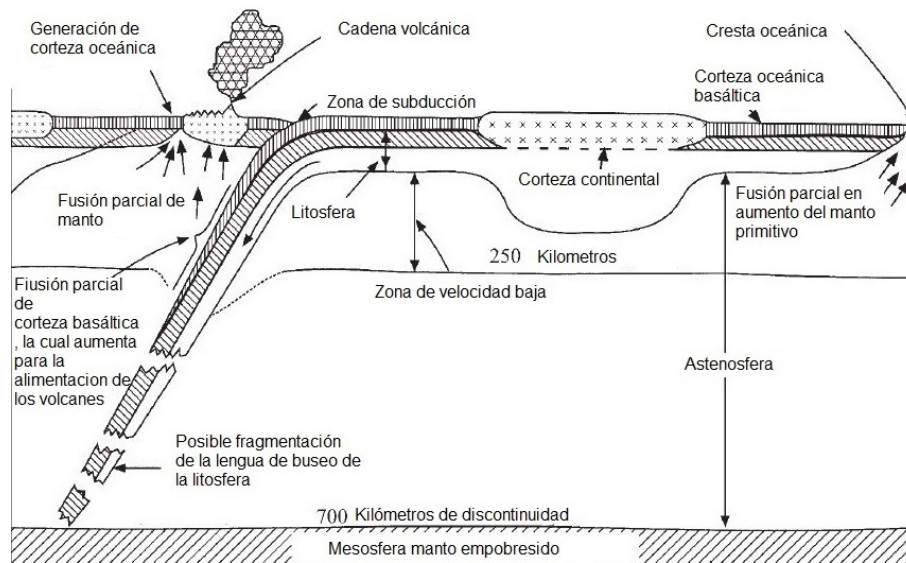


Figura 2.8: Mecanismo tectónico en la frontera de la placa

2.6. Medición de terremotos

Medición de terremotos Los terremotos son fenómenos multidimensionales complejos, el análisis científico de los cuales requiere la medición. Antes de la invención de instrumentos científicos modernos, los terremotos se medían cualitativamente por su efecto o intensidad, que se diferenciaba de un punto a otro. Con el despliegue de sismómetros, una cuantificación instrumental de todo el evento terremoto de la magnitud único del evento se hizo posible. Sismogramas registrados a diferentes distancias del epicentro se emplean para determinar el tiempo de origen, epicentro, profundidad focal y el tipo de falla, así también para estimar la energía liberada durante un terremoto.

2.6.1. Intensidad

Es una medición no perceptible por un instrumento del daño en estructuras, efectos de la superficie de la tierra, por ejemplos fracturas, grietas y deslizamiento de la tierra, reacciones en los humanos por el sacudimiento del terremoto. Escalas discretas son usadas para calificar la intensidad sísmica; Los niveles son representados por números romanos y cada grado de intensidad proporciona una descripción de la calidad descriptiva del efecto del terremoto.

La intensidad sísmica es una medida del efecto, o la fuerza, peligro de un terremoto en una ubicación específica. Mientras que el término se puede aplicar de forma genérica a las medidas de ingeniería, tales como pico aceleración del suelo, se suele reservar para medidas cualitativas de los efectos del terremoto en la localización específica, basados en el comportamiento humano observado y daños estructurales. Existen distintas escalas de medición de la intensidad la más usada en la actualidad es la modificada intensidad Mercalli (MMI) [9].

2.6.2. Magnitud

Es una medición cuantitativa del tamaño del terremoto y dimensiones de la falla, está basada en un máximo de amplitudes de un cuerpo o de ondas sísmicas en la superficie, Está sin embargo es una medida es dada por un instrumento, Los primeros intentos por definir las escalas fueron hechas en Japón por Wadati y en California por Richter en 1930. Existen varias escalas. Muchas de estas escalas dependen de la frecuencia debido a esas amplitudes medidas de la onda sísmica con diferentes propiedades. La magnitud de un movimiento telúrico se relaciona con la energía liberada por la Tierra.

Es así que representa una medida cuantitativa. La escala usada para medir la magnitud es la de Richter, también conocida como de magnitud, que mide la cantidad de energía que se libera durante el sismo y se registra gracias a los sismógrafos. Ésta va de 0 a 10, incluyendo decimales en sus mediciones (por ejemplo, 7,2 y así), siendo 10 la más alta; sin embargo, jamás registrada [9].

2.6.3. Aceleración g

La energía liberada en el sismo se dispersa desde el epicentro, generando un movimiento, tanto en el eje horizontal como el vertical. La aceleración en estos casos se entiende como la tasa de cambio de la velocidad del movimiento generado. Esta aceleración se puede expresar en función de g (aceleración de la gravedad de la Tierra), y puede ser como decimal o porcentaje, en m/s^2 ($1g = 9.81m/s^2$). La figura 2.9: muestra las aceleraciones horizontales y vertical provocadas por un sismo.

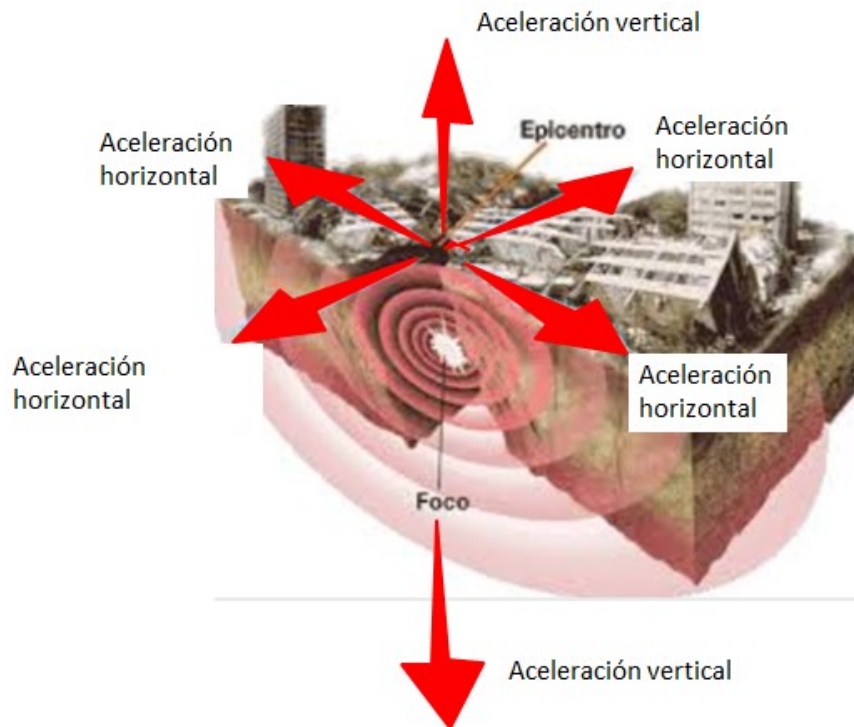


Figura 2.9: Componentes de aceleración durante un sismo

Para aplicaciones de diseño se necesita de un valor que relacione los valores definidos por Mercalli y con un valor de aceleración gravitacional “ g ”, el valor de la aceleración es registrada por los sensores de aceleración.

La tabla 2.1 contiene las descripciones de intensidad con la correspondiente aceleración máxima del suelo (AMS) y la velocidad máxima del suelo (VMS), [8].

Tabla 2.1: Descripciones de intensidad con la correspondiente aceleración máxima del suelo (AMS) y la velocidad máxima del suelo (VMS). Así como el grado de intensidad instrumental varía de I a X en función de la aceleración sísmica.

Percepción del movimiento	No percibido	Débil	Ligero	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Severo	Violento	Extremo
Peligro potencial	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Muy ligero	Ligero	Moderado	Moderado / Pesado	Intenso	Muy intenso
Aceleración máxima (%g)	<0.17	0.17 a 1.4	1.4 a 3.9	3.9 a 9.2	9.2 a 18	18 a 34	34 a 65	65 a 124	>124
Velocidad máxima (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	X a XII
Intensidad Instrumental MMI	I	II a III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X a XII

2.7. Movimientos de la tierra causados por terremotos

Los valores de aceleración son grandes cerca del epicentro y tienden a reducirse conforme la distancia se aleja. Sin embargo la aceleración registrada en distancias similares puede variar significativamente, debido a varios factores principalmente debido a las condiciones de cada suelo.

La ecuación de movimiento que define un sistema de un grado de libertad ver figura 2.10 (SDF single degree freedom) sometido a una aceleración $\ddot{u}_g(t)$ está definido en la ecuación(2.1).

$$-m\ddot{u}_g(t) = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku \quad (2.1)$$

Dividiendo la ecuación (2.1)entre la masa "m"se obtiene la ecuación (2.2).

$$-\ddot{u}_g(t) = \ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u \quad (2.2)$$

Esto es claro que dado $\ddot{u}_g(t)$, la respuesta a la deformación $\dot{u}_g(t)$ del sistema depende solo de la ω_n o del periodo natural T_n del sistema y la relación de amortiguamiento ζ ; formalmente se escribe $u \equiv u(t, T_n, \zeta)$.

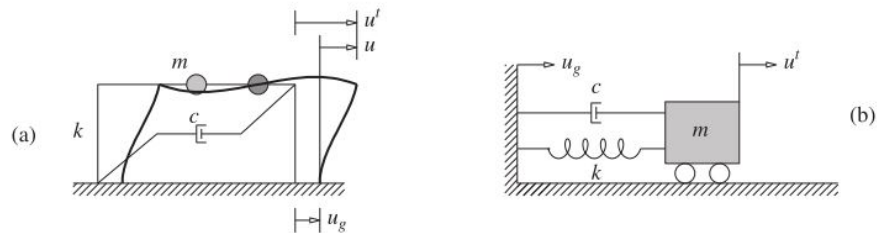


Figura 2.10: Sistema de un solo grado de libertad

2.8. Registros de la respuesta

Para un movimiento dado por $\ddot{u}_g(t)$ la respuesta de deformación $\dot{u}_g(t)$ de un sistema SDF depende solo del periodo de vibración natural y de la relación de amortiguamiento la figura 2.11a muestra la respuesta de deformación de tres sistemas, debido a la aceleración del suelo en el terremoto El centro. El coeficiente de amortiguamiento de 2% es el mismo para los tres sistemas de modo que las diferencias en sus periodos son las responsables de las grandes diferencias de la respuesta en las deformaciones.

La figura 2.11b muestra la respuesta de la deformación de los tres sistemas con el mismo movimiento de suelo. La vibración del periodo T_n este es el mismo en los tres sistemas de tal modo que las diferencias en la respuesta a la deformación está asociada con su amortiguamiento 2%. Se observa que la tendencia que los sistemas con más amortiguamiento responden menos que los sistemas pobremente amortiguados

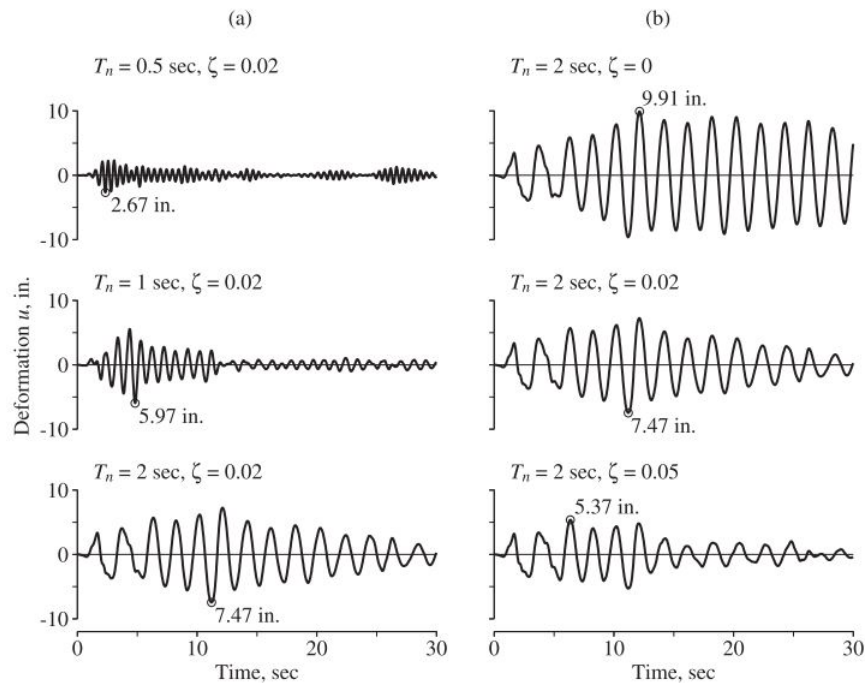


Figura 2.11: Respuesta de la deformacion del sistema SDF para el Centro

2.9. Espectro de respuesta a la deformación

G. W. Hosner fue clave en la aceptación generalizada del concepto respuesta de espectro de un terremoto, iniciada por M. A. Biot en 1932, como medio practico para la caracterización de los movimientos de la tierra y sus efectos sobre las estructuras. Ahora es un concepto central en la ingeniería sísmica. El espectro de respuesta proporciona un medio conveniente para resumir la respuesta del pico de todos los posibles sistemas SDF lineal para una componente particular del movimiento del suelo [7].

También proporciona un medio práctico para aplicar el conocimiento de la dinámica estructural para el diseño de estructuras, el desarrollo de los requisitos de la fuerza lateral para algunos códigos de construcción por ejemplo [2].

Capítulo 3

Procedimiento experimental

3.1. Metodología de la investigación

La fuerza de un terremoto es un fuerza del medio ambiente en condiciones que, en un lugar específico y las características de la estructura de la subestación, pueden gobernar el diseño en ciertas regiones sísmicas.

El diseñador de subestaciones debe estar consciente de las condiciones de tipos de suelo especiales.

Para el presente documento, la carga del terremoto no está considerada, la combinación de la fuerza extrema de viento y nieve pero puede considerarse en relación con las fuerzas de operación y de corto circuito [2].

La fuerza de fricción debido a la gravedad no se consideran para proporcionar resistencia a las fuerzas sísmicas [14].

La IEEE 693-2005 establece un método para la calificación del terremoto en los Estados Unidos de Norteamérica.

El procedimiento para seleccionar el nivel sísmico apropiado (alto, moderado o bajo) para un lugar consiste en los siguientes pasos [1].

1. Establecer la media más una desviación estándar del pico de aceleración del suelo y la respuesta espectral relacionado con el terremoto máximo creíble que puede afectar a la subestación. Como alternativa, el 2% de probabilidad de excedencia

en 50 años significa la aceleración máxima del terreno y de respuesta espectral se pueden utilizar.

2. La resultante del valor de la aceleración pico específica del lugar debe entonces ser usada para seleccionar la calificación del nivel de sismo como mejor le acomode. Si el pico de la aceleración es igual o menor que 0.1 g el sismo se califica como nivel bajo. Si el pico es mayor que 0.1 g pero menor que 0.5 g se califica como moderado y si el valor pico es mayor que 0.5 g el sismo se clasificará como nivel alto.

Para las condiciones iniciales debe asumir que durante el intervalo de tiempo del terremoto, el valor de carga de viento, nieve es cero, y la temperatura ambiente es de 25° C

La IBC(International code building) suele usar mapas del movimiento de la tierra, la IBC proporciona mapas de los niveles del espectro de aceleración en periodos de 0.2 y 0.1 para el máximo terremoto considerado [1].

La categoría sísmica para diseño está de acuerdo con la sección 1613 de IBC o de ASCE 7-10 (American Society of Civil Engineers) [3].

Debido que la IEEE 693 toma como referencia a la IBC, y la IBC toma como referencia la ASCE 7-10 en esta tesis se toman los valores recomendados por la ASCE 7-10

Cada estructura y porción de la misma, incluyendo componentes no estructurales que permanentemente están unidos a las estructuras y sus soportes, deben estar diseñados y construidos para resistir los efectos del movimiento de un terremoto de acuerdo con ASCE 7-10.

3.1.1. Edificio estructurales

El análisis sísmico y procedimientos de diseño para ser usados en el diseño de estructuras de edificios y sus miembros deberán cumplir con la ASCE 7-2010(Capítulo 12). La estructura del edificio debe resistir la fuerza lateral y la fuerza vertical, el sistema debe ser capaz de proporcionar la fuerza, la rigidez y la energía de disipación para soportar el movimiento de la tierra.

3.1.2. Componentes no estructurales

De acuerdo a la especificación ASCE 7-10 (Capítulo 13) los transformadores con componentes eléctricos y están clasificados como componentes no estructurales, la fuerza sísmica de diseño deberá ser aplicada en el centro de gravedad del transformador.

3.1.3. Edificio no estructurales

Los edificios no estructurales se componen de estructuras auto soportadas, estructuras que cargan su centro de gravedad y que puede requerir que resista los efectos de un terremoto. El peso efectivo debe incluir las cargas muertas ASCE (Capítulo 15).

3.2. Método estático

La IEEE 693-2005 el anexo D que se refiere al diseño de transformadores en punto D.3 indica como estático el método de calificación. El análisis estático se debe realizar en el sistema de anclaje, tanque conservador y radiadores. Se asume que el transformador es un cuerpo rígido, todas las cargas son aplicadas en el centro de gravedad del transformador completamente ensamblado y las reacciones se deben calcular para cada posición, partiendo las ecuaciones de equilibrio.

3.3. Método elementos finitos.

Los modelos de las estructuras deben modelarse en solid works, deben guardarse como archivo parasolid y transportarse a ANSYS 14 work bench. Haciendo uso del modulo de análisis estructural estático, se usan unidades en milímetros, se importa la geometría, del archivo para solid, y se cargan las propiedades del material, se selecciona A36 como material a analizar. Se abre el modelo analizar; Se genera el mallado, y se definen las condiciones iniciales, como el área de fijación, posteriormente se definen las cargas sobre el área donde van actuar en sus ejes “X”, “Y” y “Z”.

Se realiza la solución automáticamente y se evalúan los valores máximos de deformación y esfuerzos de Von Mises.

Se realizan distintos mallados para adaptarlos a nuestras necesidades encontrar los distintos valores y verificar con qué tipo de malla converge la solución. Una malla bien

hecha tiene como resultado una cierta confianza en el trabajo realizado.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Cálculo de aceleraciones y fuerzas sísmicas

Para el cálculo de las aceleraciones y las fuerzas sísmicas que actúan sobre las componentes en el transformador se seguirá paso a paso las recomendaciones de la ASCE 7-10 [3].

4.1.1. Mapas de parámetros de aceleración

1. Peso total del transformado: P .
2. Altura de la fundación del transformador en la parte inferior a un punto de anclaje del transformador z .
3. Altura total desde la cubierta del transformador hasta la fundación en la parte inferior: h .
4. Clase de sitio: Basado en propiedades del suelo, puede ser clasificado como A, B, C, D, E o F. Si las propiedades del suelo no son conocidas, considerar clase D. Ver características en tabla 4.1.

Tabla 4.1: Clase de sitio [3].

Clase de sitio	
A.	Roca dura
B.	Roca
C.	Suelo muy denso y roca suave
D.	Suelo rígido
E.	Arcilla blanda
F.	Suelo requiere análisis a la respuesta de acuerdo a [3]

5. S_S : Parámetro encontrado de aceleración de espectro de respuesta de máximo terremoto considerado para un período corto (0.2s), determinado en el apéndice 11, 12, 15, 17 y 18.
6. S_1 : Parámetro encontrado de aceleración de espectro de respuesta de máximo terremoto considerado para un período de 1s, determinado en el apéndice 13, 14, 16, 17 y 18.
7. F_a : Coeficiente del lugar para periodos cortos 0.2s en tabla 19.
8. F_ν : Coeficiente del lugar para periodos extensos 1s en tabla 19.
9. a_p : Factor de amplificación del componente varía entre 1.0 a 2.5 ver apéndice 20.
10. R_p : Factor de modificación de respuesta de componente varia entre 1.0 a 12 ver apéndice 20.
11. I_p : Factor de importancia $I_p=1.5$ para componentes necesarios para operación continua y $I_p = 1$ para componentes especiales sección 13.1.3. [3].
12. S_{MS} : Parámetro de aceleración de espectro de respuesta de máximo terremoto considerado para un período corto, determinado de acuerdo con la sección 11.4.3 [3] y se muestra en la ecuación (4.1).

$$S_{MS} = F_a * S_S \quad (4.1)$$

13. S_{MI} : Parámetro de aceleración de respuesta espectral asignada a un periodo de 1 s, determinado de acuerdo con la sección 11.4.3 [3] y se muestra en la ecuación (4.2).

$$S_{MI} = F_v S_1 \quad (4.2)$$

4.1.2. Parámetros de aceleración espectral de diseño

1. S_{DS} : Aceleración espectral de corto período de acuerdo con la sección 11.4.4 [3] muestra en la ecuación (4.3).

$$S_{DS} = \frac{2S_{MS}}{3} \quad (4.3)$$

2. S_{D1} : Aceleración espectral de período 1s de acuerdo con la sección 11.4.4 [3] muestra en la ecuación (4.4).

$$S_{D1} = \frac{2S_{M1}}{3} \quad (4.4)$$

3. F_{p1} : Fuerza sísmica horizontal de diseño se muestra en la ecuación la ecuación (4.5).

$$F_{p1} = \frac{0.4a_p S_{DS} W_T}{\frac{R_p}{I_p}} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) \quad (4.5)$$

4. F_{p2} : Fuerza sísmica horizontal máxima se muestra en la ecuación (4.6).

$$F_{p2} = 1.65 S_{DS} I_p W_T \quad (4.6)$$

5. F_{p3} : Fuerza sísmica horizontal mínima se muestra en la ecuación (4.7)

$$F_{p3} = 0.3 S_{DS} I_p W_T \quad (4.7)$$

6. F_p : Fuerza sísmica horizontal de diseño en el centro de masa del transformador(componente), debe ser aplicada independientemente en por lo menos dos direcciones horizontales ortogonales en combinación con las cargas de servicio asociadas con un componente. Para sistemas verticales en balance, la fuerza F_p debe ser asumida a actuar en cualquier dirección horizontal.

$$F_p = \begin{cases} = F_{p3}si & < F_{p1} \\ = F_{p2}si & > F_{p1} \\ = F_{p1} & \text{Otro valor} \end{cases} \quad (4.8)$$

7. F_v : Fuerza sísmica vertical de proyecto en centro de masa del transformador se muestra en la ecuación (4.9)

$$F_v = 0.2 S_{DS} W_T \quad (4.9)$$

8. a_h : Aceleración sísmica horizontal a ser aplicada en el centro de masa del transformador en verificación estructural (dos direcciones horizontales) se muestra en la ecuación (4.10)

$$a_h = \frac{F_p}{W_T} \quad (4.10)$$

9. a_v : Aceleración sísmica vertical a ser aplicada en centro de masa del transformador para la verificación estructural se muestra en la ecuación 4.11

$$a_v = \frac{F_v}{W_T} \quad (4.11)$$

4.1.3. Espectro de respuesta de diseño

Donde se requiere un diseño de respuesta espectral de esta especificación y los procedimientos movimiento específico de la tierra no son empleados, la curva del espectro de respuesta de diseño se desarrolló como se indica en la figura (4.1) de la especificación [3].

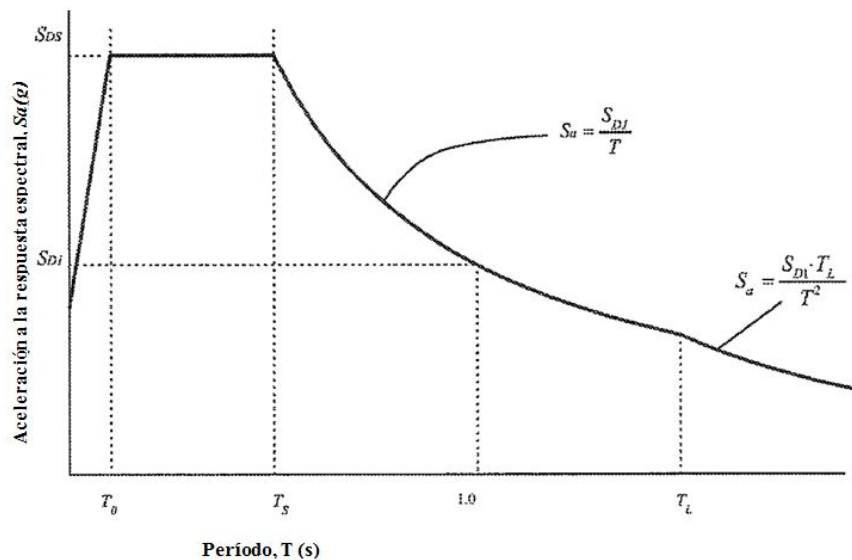


Figura 4.1: Espectro de respuesta de diseño

1. Formación de espectro de respuesta de diseño de determina con la ecuación 4.12(sec-

ción 11.4.5). [3]

$$S_a(T) = \begin{cases} = \left[S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \right] & \text{si } T < T_0 \\ = S_{DS} & \text{si } T_0 \leq T \leq T_S \\ = \frac{S_{D1}}{T} & \text{si } T_S < T \leq T_L \\ = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & \text{otros valores} \end{cases} \quad (4.12)$$

2. Formación de espectro de respuesta de diseño (sección 11.4.5) [3]. Para el periodo corto T_0 hasta 0.2 s, se calcula con la ecuación 4.13.

$$T_0 = \frac{0.2 S_{D1}}{S_{DS}} \quad (4.13)$$

3. Para el periodo T_S hasta 1 s, se calcula con la ecuación 4.14.

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (4.14)$$

4. Período largo de transición en segundos T_L ver apéndice 21, 23, 24, 25 y 25.

4.1.4. Espectro de respuesta máximo considerado MCE_R

Espectro de respuesta máximo considerado con la ecuación 4.15(sección 11.4.6).

$$S_{am}(T) = S_a(T) \times 1.5 \quad (4.15)$$

4.2. Método analítico para el cálculo de fuerzas en la base estructural del transformador

Siguiendo la especificación IEEE 693-2005 [1] punto D.3 del anexo D que determina el método de análisis estático como procedimiento a seguir para transformadores mayores a 115 kV.

Para realizar el cálculo estático es necesario determinar las cargas en ambos ejes originadas por la aceleración a_h y a_v . Se muestra en la ecuación 4.10 y la ecuación 4.11 respectivamente.

4.2.0.1. Parámetros de sismicidad

En la tabla 4.2, contiene los parámetros considerados para el presente análisis, tales como los valores de aceleración, conforme al nivel de calificación sísmica IEEE 693-2005, y las características particulares para el transformador analizado.

Tabla 4.2: Parámetros particulares para el análisis estructural.

Parámetro	Valor
Aceleración gravedad	$a_g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Aceleración horizontal	a_h
Aceleración vertical	a_v
Masa de transformador en operación (M_T)	kg
Peso de transformador en operación (P)	en N

4.2.0.2. Determinación del centro de gravedad del transformador en operación

Esta operación se realizó utilizando el programa AutoCAD y aplicaciones propias, tomando en cuenta la geometría, masas y dimensiones de los accesorios y estructura del transformador en operación, el resultado obtenido se muestra en la figura 4.2. Notas, dimensiones en milímetros (mm),

Los valores “ l ”, “ $l1$ ” y “ $l2$ ”. Determinan el posicionamiento del centro de gravedad del transformador en el eje “ y ”. Los valores “ d ”, “ $d1$ ”, “ $d2$ ” y “ $d3$ ”. Determinan la posición del centro de gravedad del transformador en el eje “ x ”. La “ h ” determina la altura del centro de gravedad.

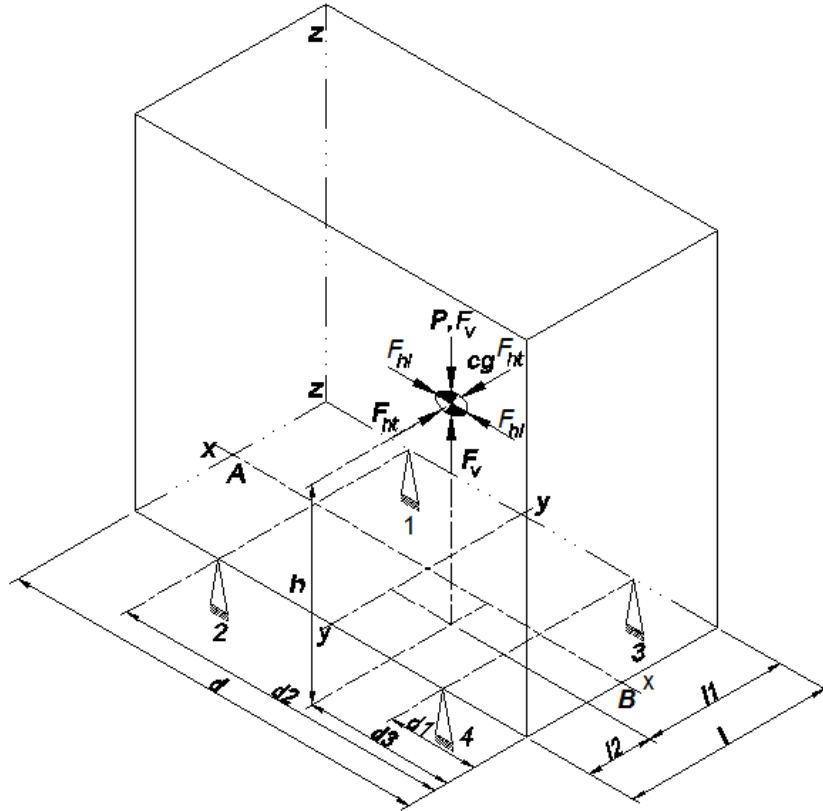


Figura 4.2: Diagrama que indica la posición del centro de gravedad del transformador en operación

4.2.0.3. Fuerzas actuantes en el centro de gravedad del transformador en operación

Las fuerzas producidas durante un sismo que genera aceleraciones de a_h y a_v en las direcciones vertical y horizontal, se determinan con las siguientes ecuaciones [11]:

$$F_{hl,ht} = \text{Fuerza horizontal longitudinal y transversal}$$

$$F_{hl,ht} = (a_h) M_T \text{ en N} \quad (4.16)$$

$$F_v = \text{Fuerza vertical}$$

$$F_v = (a_v) M_T \text{ en N} \quad (4.17)$$

donde P representa el peso del transformador en operación.

4.2.0.4. Determinación de las fuerzas que actúan en la base del transformador con las cargas F_{ht} , F_{hl} y F_{fv}

4.2.0.5. Tensión en los puntos 1 a 4 debido a F_{ht}

Para encontrar las fuerzas actuantes en los puntos 1, 2, 3 y 4, es necesario analizar el siguiente diagrama de cuerpo libre en la figura 4.3.

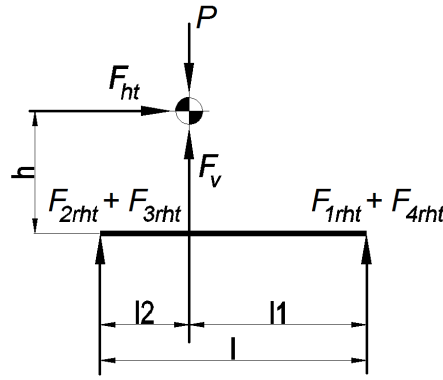


Figura 4.3: Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a la F_{ht} en los puntos 1,2,3 y 4

Nota: La situación más crítica es cuando el perno trabaja a tensión y se toma de la diferencia: $(F_v - P)$

Realizando $\sum M_{2rht,3rht}$ en la figura 4.3.

:

$$\begin{aligned} \sum M_{2rht+3rht} &= 0 \\ (F_{1rht} + F_{4rht}) \times l + (F_v - P) \times l2 - F_{ht} \times h &= 0 \\ (F_{1rht} + F_{4rht}) &= \frac{(-F_v + P) \times l2 + F_{ht} \times h}{l} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Trasladando las cargas a los puntos F_{1rht} y F_{4rht} , en el d.c.l. en la figura 4.4 y realizando $\sum M_{F_{4rht}}$ se obtiene la ecuación 4.19

$$\begin{aligned} \sum M_{F_{4rht}} &= 0 \\ F_{1rht} &= (F_{r1ht} + F_{4rht}) \frac{d3 - d1}{d2 - d1} \end{aligned} \quad (4.19)$$

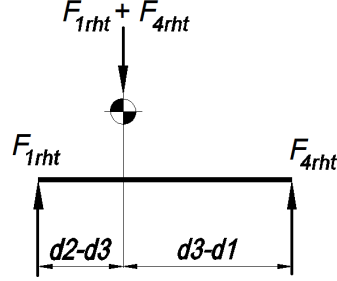


Figura 4.4: Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a F_{1rht} y F_{4rht}

Trasladando las cargas a los puntos F_{1rht} y F_{4rht} , en el d.c.l. en la figura 4.4 y realizando $\sum M_{f_{1rht}}$ se obtiene la ecuación 4.20

$$\begin{aligned} \sum M_{F_{1rht}} &= 0 \\ F_{4rht} &= (F_{1rht} + F_{4rht}) \frac{d2 - d3}{d2 - d1} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Ahora para encontrar las reacciones originadas por F_{ht} en los puntos 3 y 4, es necesario analizar el siguiente d.c.l. en la figura 4.3 y realizar:

$$\begin{aligned} \sum M_{1rht+4rht} &= 0 \\ -(F_{2rht} + F_{3rht}) \times l + (-F_v + P) \times l1 + F_{ht} \times h &= 0 \\ (F_{2rht} + F_{3rht}) &= \frac{(-F_v + P) \times l1 + F_{ht} \times h}{l} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Trasladando las cargas a los puntos F_{2rht} y F_{3rht} , en el d.c.l. en la figura 4.5 y realizando $\sum M_{f_{3rht}}$ se obtiene la ecuación 4.22

$$\begin{aligned} \sum M_{F_{3rht}} &= 0 \\ F_{2rht} &= (F_{2rht} + F_{3rht}) \frac{d3 - d1}{d2 - d1} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Trasladando las cargas a los puntos F_{2rht} y F_{3rht} , el d.c.l. en la figura 4.5 y realizando $\sum M_{f_{2rht}}$ se obtiene la ecuación 4.23

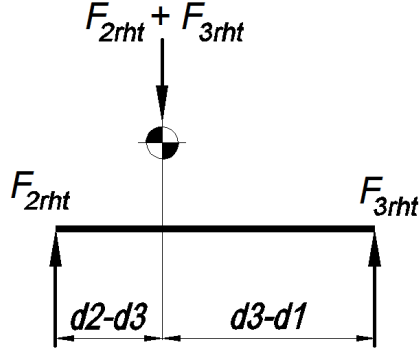


Figura 4.5: Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a F_{2rht} y F_{3rht}

$$\sum M_{F_{2rht}} = 0$$

$$F_{3rht} = (F_{2rht} + F_{3rht}) \frac{d2 - d3}{d2 - d1} \quad (4.23)$$

4.2.0.6. Tensión en los puntos 1 a 4 debido a F_{hl}

El análisis en el d.c.l. de figura 4.6 y realizando $\sum M_B$: y ($F_v < P$).

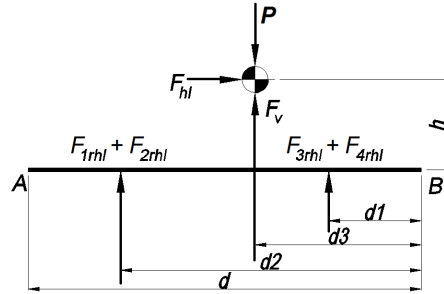


Figura 4.6: Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$

Se tiene:

$$\sum M_B = 0$$

$$-(F_{hl}) \times h - (F_v - P) \times d3 - (F_{1rhl} + F_{2rhl}) \times d2 - (F_{3rhl} + F_{4rhl}) \times d1 = 0 \quad (4.24)$$

La base se considera rígida, se obtiene la relación de tangente con las fuerzas $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$ respectivamente, ver figura 4.7 y se obtiene la ecuación 4.25

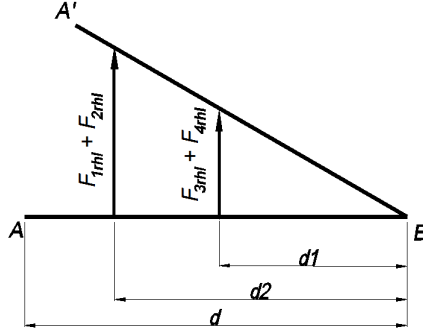


Figura 4.7: Diagrama relación tangente del punto B de las fuerzas $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$

$$\begin{aligned} \frac{F_{1rhl} + F_{2rhl}}{d_2} &= \frac{F_{3rhl} + F_{4rhl}}{d_1} \\ F_{3rhl} + F_{4rhl} &= \frac{F_{1rhl} + F_{2rhl}}{d_2} \times d_1 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Sustituyendo la ecuación 4.25 en la ecuación 4.24 obtenemos:

$$F_{r1hl} + F_{r2hl} = (-F_{ht} \times h - (F_v - P) \times d_3) \times \frac{d_2}{d_2^2 \times d_1^2} \quad (4.26)$$

Obtenidas las cargas verticales $F_{r1hl} + F_{r2hl}$ aplicadas en el centro de gravedad, se realiza la sumatoria de momentos en el eje opuesto ver el diagrama de cuerpo libre 4.8

:

Realizando M_{1rhl} :

$$\begin{aligned} \sum M_{r1ht} &= 0 \\ (F_{r1ht} + F_{2rhl}) \times l_1 - F_{2rhl} \times l &= 0 \\ F_{2rhl} &= (F_{1rhl} + F_{2rhl}) \frac{l_1}{l} \end{aligned} \quad (4.27)$$

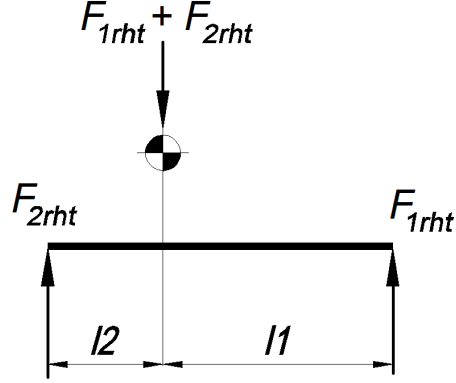


Figura 4.8: Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a $F_{1rhl} + F_{2rhl}$

Ahora en M_{2rhl} :

$$\begin{aligned} \sum M_{2rhl} &= 0 \\ -(F_{1rhl} + F_{2rhl}) \times l2 + F_{1rhl} \times l &= 0 \\ F_{1rhl} &= (F_{1rhl} + F_{2rhl}) \frac{l2}{l} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Ahora realizando la $\sum M_A$:, en la figura 4.6

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0 \\ (F_h) \times h + (F_v - P) \times (d - d3) - (F_{1rhl} + F_{2rhl}) \times (d - d2) - (F_{3rhl} + F_{4rhl}) \times (d - d1) &= 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

La base se considera rígida, se obtiene del punto A la relación de tangente con las fuerzas $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$ respectivamente, ver figura 4.9 y se obtiene la ecuación 4.32

Si $F_{1rhl} + F_{2rhl}$ y $F_{3rhl} + F_{4rhl}$ son simétricas en el transformador queda:

$$d - d2 = d1 \quad (4.30)$$

$$d - d1 = d2 \quad (4.31)$$

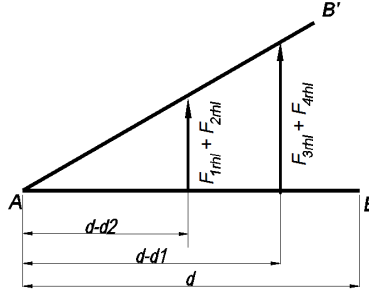


Figura 4.9: Diagrama relación tangente de las fuerzas $F_{1rh1} + F_{2rh1}$ y $F_{3rh1} + F_{4rh1}$

$$\begin{aligned} \frac{F_{1rh1} + F_{2rh1}}{d1} &= \frac{F_{3rh1} + F_{4rh1}}{d2} \\ F_{1rh1} + F_{2rh1} &= \frac{F_{3rh1} + F_{4rh1}}{d2} \times d1 \end{aligned} \quad (4.32)$$

Sustituyendo la ecuación 4.32 en la ecuación 4.29 obtenemos:

$$F_{3rh1} + F_{4rh1} = (F_{ht} \times h + (F_v - P) \times (d - d3)) \times \frac{d2}{d2^2 \times d1^2} \quad (4.33)$$

Obtenidas las cargas verticales $F_{3rh1} + F_{4rh1}$ aplicadas en el centro de gravedad, se realiza la sumatoria de momentos en el eje opuesto ver el diagrama de cuerpo libre 4.8 [10]

:

Realizando M_{3rh1} :

$$\begin{aligned} \sum M_{1rh1} &= 0 \\ -(F_{3rh1} + F_{4rh1}) \times l2 + F_{4rh1} \times l &= 0 \\ F_{4rh1} &= (F_{3rh1} + F_{4rh1}) \frac{l2}{l} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Ahora en M_{4rh1} :

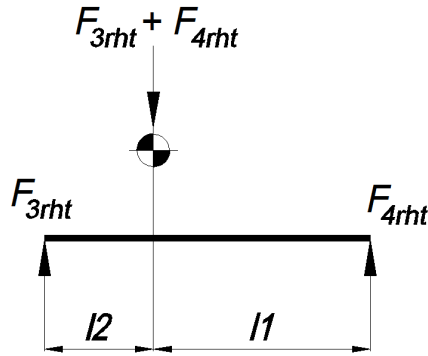


Figura 4.10: Diagrama de cuerpo libre muestra las reacciones debidas a $F_{3rhl} + F_{4rhl}$

$$\begin{aligned} \sum M_{4rhl} &= 0 \\ -(F_{3rhl} + F_{4rhl}) \times l/1 + F_{3rhl} \times l &= 0 \\ F_{3rhl} &= (F_{3rhl} + F_{4rhl}) \frac{l/1}{l} \end{aligned} \quad (4.35)$$

4.2.0.7. Análisis de resultados

Conforme las ecuaciones determinadas y ordenadas en la tabla 4.3, se debe seleccionar de la tabla la tensión máxima que va a ser aplicada al perno de anclaje y será llamada como F_T . En la figura 4.11 muestra la representación de todas las cargas.

Tabla 4.3: Valores de la fuerza de tensión en los apoyos bajo la acción de las aceleraciones de a_v y a_h .

Reacción	Fuerza a la tensión
F_{1rht}	$x1$
F_{2rht}	$x2$
F_{3rht}	$x3$
F_{4rht}	$x4$
F_{1rhl}	$x5$
F_{2rhl}	$x6$
F_{3rhl}	$x7$
F_{4rhl}	$x8$

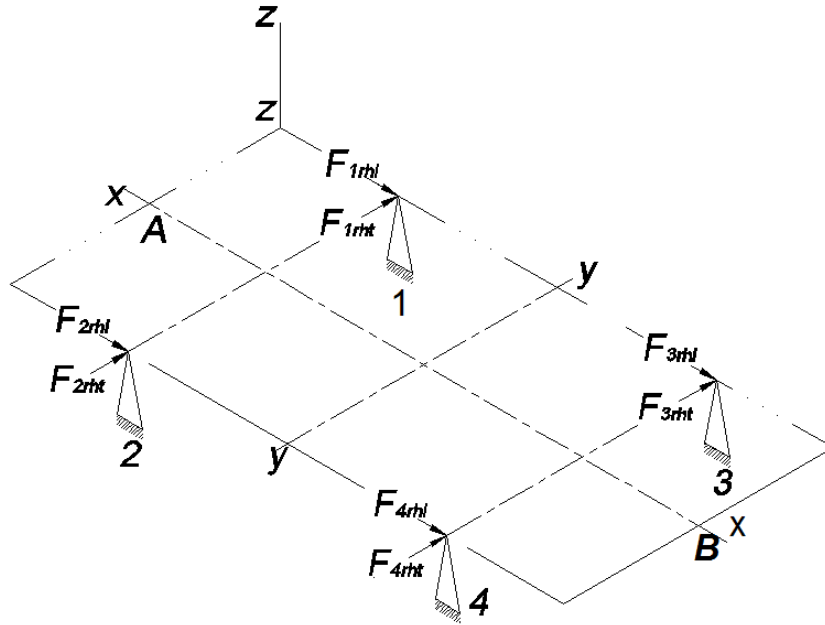


Figura 4.11: Diagrama de las fuerzas en los puntos de fijación del transformador.

4.2.0.8. Elementos de anclaje entre la base del transformador y la fundación de concreto.

Para realizar el cálculo analítico de el anclaje es importante definir los siguientes parámetros mostrados en la tabla 4.4:

La ecuación 4.36 determina la fuerza horizontal longitudinal y transversal F_{HP} aplicada para cada perno:

$$F_{HP} = \frac{F_H - m_1 \times (P - F_V)}{Y \times Z} \quad (4.36)$$

La ecuación 4.37 determina la fuerza requerida de precarga F_{PC} aplicada por perno para evitar el deslizamiento :

$$F_{PC} = \frac{F_{HP}}{m_2} \quad (4.37)$$

La precarga requerida para eliminar el esfuerzo cortante en el tornillo se obtiene con la ecuación 4.38

Tabla 4.4: Parámetros particulares para el análisis estructural en los pernos de anclaje.

Parámetro	Valor
Fuerza máxima cortante ($F_{hl,ht}$)	en N
Fuerza máxima tensión (F_T)	en N
Cantidad de puntos de anclaje	Y
Cantidad de pernos por punto de anclaje	Z
Coefficiente de fricción entre la base y la fundación	m_1
Coefficiente de fricción entre los componentes de fijación	m_2
Datos del perno de anclaje:	
Diámetro de perno (ϕd)	en mm
Normas	ASTM 449, A354BD Y A354 BC
Esfuerzo a la fluencia de tensión (σ_f):	en MPa
Esfuerzo máximo de trabajo (σ_t) de tensión es 0.8 de(σ_f):	en MPa
Área del perno	A_p

$$T_{req} = F_{PC} \times F_T \quad (4.38)$$

El valor del T_{req} se ajusta, sumándole 100 Nm y pasa a ser el torque total aplicado a cada perno de anclaje T_t ejemplo:

$$T_t = 222Nm \rightarrow 300Nm \quad (4.39)$$

La fuerza máxima de tensión en el perno se obtiene de la ecuación 4.40

$$F_{perno} = \frac{T_t}{F_T} + F_T \quad (4.40)$$

Y el esfuerzo máximo se obtiene con la ecuación 4.41:

$$\sigma_p = \frac{F_{perno}}{A_p} \quad (4.41)$$

Para validar este valor la ecuación $\sigma_p < \sigma_t$.

4.3. Análisis sísmico estructural de elementos del transformador.

El transformador está compuesto de cientos de partes y elementos ver 4.12. La norma IEEE 693-2005 especifica en el punto D.4.1.2 [1]: Todos los subensamblados como radiadores y tanque conservador deben ser calificados por la especificación mediante un análisis estático de acuerdo A.1.3.1 [1] y el valor de la aceleración debe multiplicarse por 3.

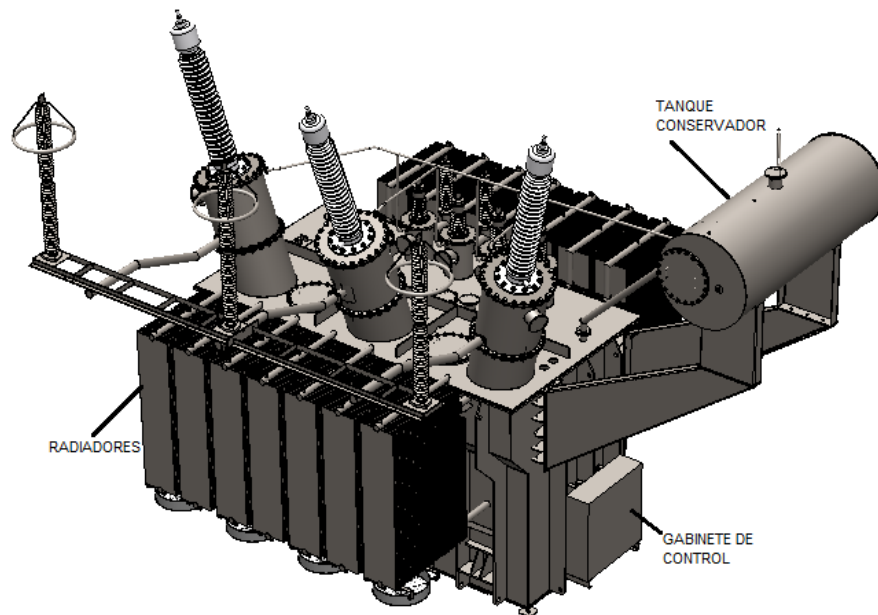


Figura 4.12: Transformador de potencia 100 MVA 230 kV

4.3.1. Parámetros de sismo del soporte conexión de los radiadores

En la tabla 4.5 contiene los parámetros considerados para el presente análisis, tales como los valores de aceleración, conforme al nivel de calificación sísmica IEEE 693-2005, y las características particulares para el transformador analizado.

Tabla 4.5: Parámetros particulares para el análisis estructural del soporte/conexión de los radiadores.

Parámetro	Valor /Variable
Datos de la aceleración:	
Múltiplo de la aceleración [1]	3
Aceleración horizontal	a_h
Aceleración vertical	a_v
Masa de un (1) radiador en operación (m_r)	1100 kg
Número de apoyos	2
Número de tornillos	8
Diámetro de perno	15.8 mm
Datos del tornillo:	
Normas	ASTM 307 y astm F2329,
Esfuerzo a la fluencia de tensión (σ_f):	248 MPa

4.3.1.1. Determinación del centro de gravedad del radiador

Esta operación se realizó utilizando el programa AutoCAD y aplicaciones propias, tomando en cuenta la geometría, masa y dimensiones de los accesorios y estructura del radiador, el resultado obtenido se muestra en la figura 4.13, las dimensiones están en milímetros (mm),

4.3.1.2. Fuerzas actuantes en el centro de gravedad del radiador

Las fuerzas producidas durante un sismo que genera aceleraciones de 0.25g y 0.2g en las direcciones vertical y horizontal respectivamente, se determinan con las siguientes

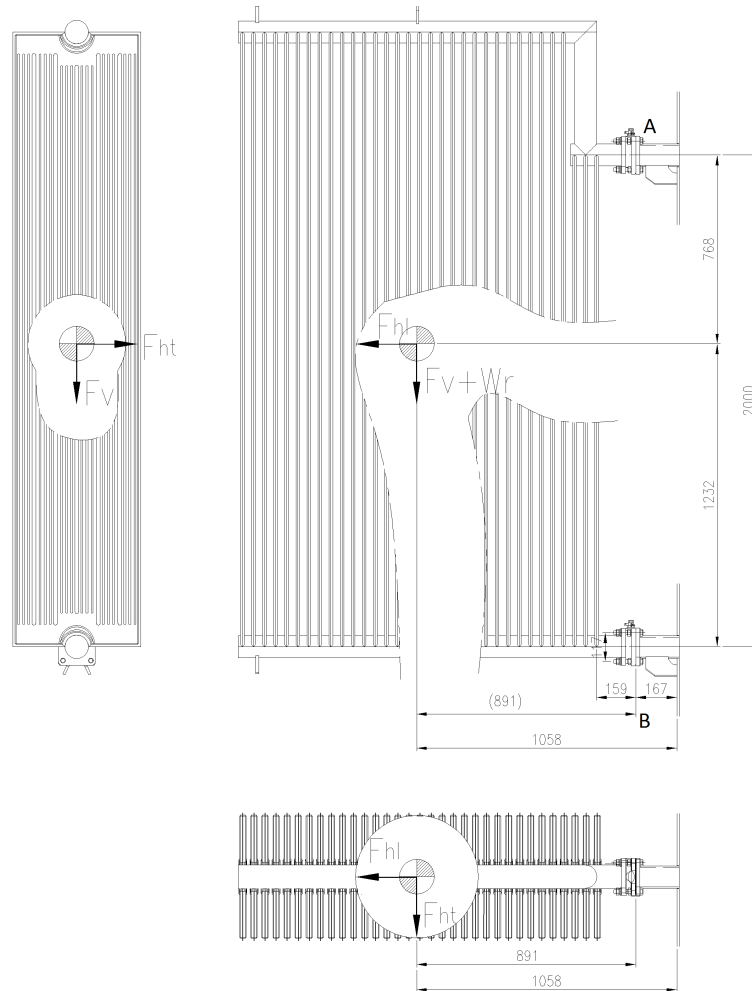


Figura 4.13: Diagrama que indica la posición del centro de gravedad del sistema de conexión y soporte del radiador

ecuaciones:

$$g_h = 0.25$$

$$g_v = 0.20$$

$$a_h = 0.25 \times 3 = 0.75g = 7.35 \text{ m/s}^2 \quad (4.42)$$

$$a_v = 0.20 \times 3 = 0.6g = 5.886 \text{ m/s}^2 \quad (4.43)$$

$$W_r = m_r \times g = (1100 \text{ kg}) \times (9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$W_r = 10792 \text{ N} \quad \text{Peso del radiador escalonado con aceite} \quad (4.44)$$

$$F_{vr} = m_r \times a_v = (1100 \text{ kg}) \times 5.8 \text{ m/s}^2$$

$$F_{vr} = 6380 \text{ N} \quad \text{Fuerza vertical} \quad (4.45)$$

$$F_{hl} = F_{ht} = m_r \times a_h = (1100 \text{ kg}) \times (7.3 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{hl} = F_{ht} = 8030 \text{ N} \quad \text{Fuerza horizontal por sismo} \quad (4.46)$$

4.3.1.3. Determinación de las fuerzas que actúan en el la fijación del radiador

4.3.1.3.1. Tensión en los puntos A y B debido a F_{ht} , F_{hl} y F_{vr} Analizando la figura 4.13 se obtienen las fuerzas horizontales producidas por la carga longitudinal y vertical [12]:

$$\sum M_B = 0$$

$$F_{hlA} = \frac{(6380 + 10792) \times 891 + 8030 \times 1232}{1232 + 768}$$

$$F_{hlA} = 10640 \text{ N} \quad (4.47)$$

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{hlB} = \frac{(6380 + 10792) \times 891 - 8030 \times 768}{1232 + 768}$$

$$F_{hlB} = 4566 \text{ N} \quad (4.48)$$

Fuerzas horizontales producidas por la carga transversal y vertical:

$$F_{htA} = \frac{8030 \times 1232}{1232 + 768}$$

$$F_{htA} = 4946 \text{ N} \quad (4.49)$$

$$F_{htB} = \frac{8030 \times 768}{1232 + 768}$$

$$F_{htB} = 3155 \text{ N} \quad (4.50)$$

Momentos producidos por la carga horizontal transversal en las juntas atornilladas A y B:

$$M_{htA} = (4946 \text{ N}) \times (0.892 \text{ m})$$

$$M_{htA} = 4411 \text{ Nm} \quad (4.51)$$

$$M_{htB} = (3155 \text{ N}) \times (0.892 \text{ m})$$

$$M_{htB} = 2814 \text{ Nm} \quad (4.52)$$

Fuerzas de tensión en los tornillos de las juntas A y B por la carga horizontal transversal:

$$L_t = 0.117 \text{ m} \quad \text{Distancia entre tornillos}$$

$$T_{A1} = \frac{4411}{2 \times 0.117}$$

$$T_{A1} = 18.8 \text{ kN} \quad (4.53)$$

$$T_{B1} = \frac{2814}{2 \times 0.117}$$

$$T_{B1} = 12.02 \text{ kN} \quad (4.54)$$

$$(4.55)$$

4.3.1.4. Normales y cortantes en los tornillos de las juntas A y B

Diámetro nominal del tornillo 15.88 mm(5/8)
 Área efectiva a la tensión 0.000145 m²

$$\tau_{\text{tornillo-Aht,hl}} = \frac{\sqrt{10640^2 + \left((6380 + 10792) \times \frac{768}{1232+768}\right)^2}}{4 \times 0.000145}$$

$$\tau_{\text{tornillo-Aht}} = 21.5 \text{ MPa} \quad (4.56)$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Aht}} = \frac{18800}{0.000145}$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Aht}} = 129 \text{ MPa} \quad (4.57)$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Ahl}} = \frac{10640}{4 \times 0.000145}$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Ahl}} = 18.3 \text{ MPa} \quad (4.58)$$

$$(4.59)$$

$$\tau_{\text{tornillo-Bht,hl}} = \frac{\sqrt{4566^2 + \left((6380 + 10792) \times \frac{1232}{1232+768}\right)^2}}{4 \times 0.000145}$$

$$\tau_{\text{tornillo-Bht,hl}} = 19.864 \text{ MPa} \quad (4.60)$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Bht}} = \frac{12200}{0.000145}$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Bht}} = 84.1 \text{ MPa} \quad (4.61)$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Bhl}} = \frac{4566}{4 \times 0.000145}$$

$$\sigma_{\text{tornillo-Bhl}} = 7.8 \text{ MPa} \quad (4.62)$$

$$(4.63)$$

4.3.1.4.1. Esfuerzos principales en los tornillos de las juntas A y B

$$\sigma_{1-A} = \frac{\sigma_{\text{tornillo-Aht}} + \sigma_{\text{tornillo-Ahl}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{tornillo-Aht}} + \sigma_{\text{tornillo-Ahl}}}{2}\right)^2 + \tau_{\text{tornillo-A}}^2} \quad (4.64)$$

$$\sigma_{1-A} = \frac{129 + 18.3}{2} + \sqrt{\left(\frac{129 + 18.3}{2}\right)^2 + 21.5^2}$$

$$\sigma_{1-A} = 150.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max-A}} = \sqrt{\left(\frac{129 + 18.3}{2}\right)^2 + 21.5^2}$$

$$\tau_{\text{max-A}} = 49.86 \text{ MPa} \quad (4.65)$$

$$\sigma_{1-B} = \frac{\sigma_{\text{tornillo-Bht}} + \sigma_{\text{tornillo-Bhl}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{tornillo-Bht}} + \sigma_{\text{tornillo-Bhl}}}{2}\right)^2 + \tau_{\text{tornillo-B}}^2} \quad (4.66)$$

$$\sigma_{1-B} = \frac{84 + 7.8}{2} + \sqrt{\left(\frac{84.1 + 7.8}{2}\right)^2 + 19.8^2}$$

$$\sigma_{1-B} = 94.4 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max-B}} = \sqrt{\left(\frac{129 + 18.3}{2}\right)^2 + 21.5^2}$$

$$\tau_{\text{max-B}} = 50 \text{ MPa} \quad (4.67)$$

4.3.1.5. Análisis de resultados

Conforme a los resultados obtenidos y ordenados en la tabla 4.6 [5], se observa que todos los esfuerzos son menores a la resistencia a la cedencia de los tornillos empleados para la sujeción de los radiadores. Por lo que se asegura su integridad estructural durante un sismo que genere aceleraciones iguales o menores a las contempladas en este estudio.

Tabla 4.6: Esfuerzos principales y factor de seguridad en los tornillos de las juntas A y B

Esfuerzos (MPa)	principales	Factor de seguridad
σ_{1-A}	150.2	1.6
σ_{1-B}	94.4	2.6
τ_{xy}	50	2.5
Resistencia a la fluencia de los tornillos (MPa)		
σ_y	248	
Resistencia a cortante de los tornillos (MPa)		
τ_{xy}	124	

4.3.1.5.1. Validación del análisis estático del radiador La estructura fue proyectada en solid works 2014, se transporto a ANSYS 14 para realizar la simulación de la estructura estática, mediante el esfuerzo máximo Von Mises.

Las condiciones iniciales se muestran en la tabla 4.7:

Tabla 4.7: Condiciones iniciales

Parámetro	Valor
Aceleración gravedad	$a_g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Aceleración horizontal	$a_h=0.25g$
Aceleración vertical	$a_v=0.2g$
Masa del radiador escalonado con aceite	1100kg
Peso del radiador escalonado	10792 en N
Fuerza horizontal	8030 en N
Fuerza vertical	6380 en N

En la figura 4.14 muestra que los esfuerzos se encuentran en la zona de cambio de geometría con un esfuerzo de tensión máximo de 270 Mpa, lo cual no garantiza la una operación correcta del radiador, y es necesario colocar un nervio como refuerzo.

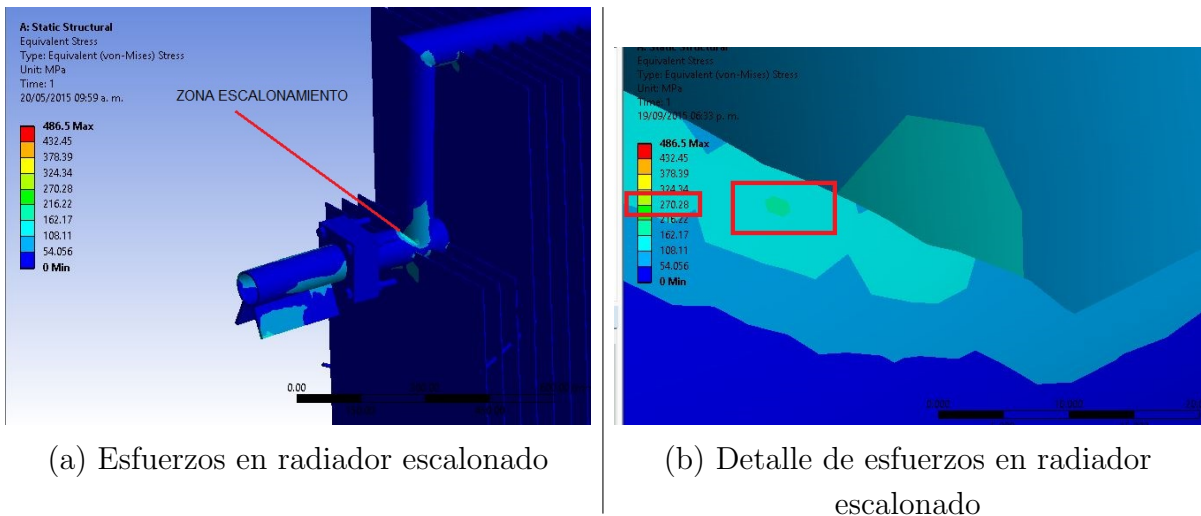


Figura 4.14: Esfuerzo máximo en zona de escalonamiento

La figura 4.15 muestra que el esfuerzo máximo se encuentran en la parte inferior del radiador con un esfuerzo de tensión máximo de 486 Mpa, lo cual indica que se debe cambiar el diseño de estos elementos o poner refuerzos en la dirección horizontal.

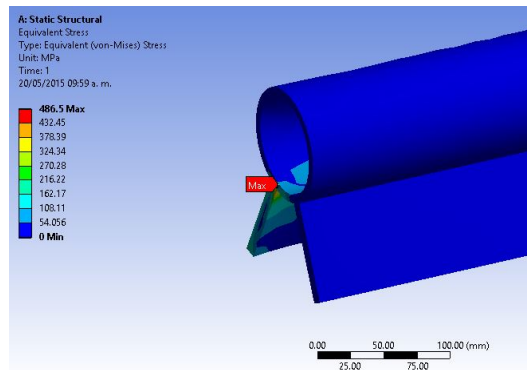


Figura 4.15: Esfuerzos máximos en el sistema de conexión y soporte del radiador

4.3.1.5.2. Análisis de resultados Conforme a los resultados obtenidos y ordenados en la tabla 4.8, se observa que los esfuerzos de 270 Mpa están muy cerca de la resistencia a la cedencia de material A36 empleados para la sujeción de los radiadores. Por lo que se no asegura su integridad estructural durante un sismo que genere aceleraciones iguales

o mayores a las contempladas en esta simulación.

Tabla 4.8: Esfuerzos principales del radiador escalonado

Esfuerzos (MPa)	principales	Factor de seguridad
σ_A	270	0.92
Resistencia a la fluencia A36 (MPa)		
σ_y	248	
Resistencia a cortante A36 (MPa)		
τ_{xy}	124	

4.3.2. Análisis estructural del soporte del tanque conservador

En esta sección se obtiene el análisis y resultados del cálculo estructural llevado a cabo en el soporte del tanque conservador considerando los parámetros y normas determinadas.

4.3.2.0.3. Parámetros de sismicidad y del soporte del tanque conservador

En la tabla 4.9 contiene los parámetros considerados para el presente análisis, tales como los valores de aceleración, conforme al nivel de calificación sísmica IEEE 693-2005, y las características particulares para el transformador analizado.

Tabla 4.9: Parámetros particulares para el análisis estructural del soporte del tanque conservador.

Parámetro	Valor /Variable
Múltiplo de la aceleración [1]	3
Aceleración horizontal	a_h
Aceleración vertical	a_v
Masa del soporte del tanque conservador (m_s)	520 kg
Masa del tanque conservador y aceite (m_c)	5142 kg
Número de piernas	2
Material del soporte conservador y piernas:	Acero ASTM A36
Resistencia a la fluencia (σ_{A36})	248 MPa
Datos de los tornillos:	
Número de tornillos en cada pierna	3
Diámetro de los tornillos	25.4
Normas	ASTM 449,

4.3.2.0.4. Determinación del centro de gravedad del tanque conservador

Esta operación se realizó utilizando el programa AutoCAD y aplicaciones propias, tomando en cuenta la geometría, masas y dimensiones de los accesorios y estructura del radiador, el resultado obtenido se muestra en la figura 4.16, las dimensiones están en milímetros (mm),

4.3.2.0.5. Fuerzas actuantes en el centro de gravedad del tanque conservador

Las fuerzas producidas durante un sismo que genera aceleraciones de 0.25g y 0.2g en

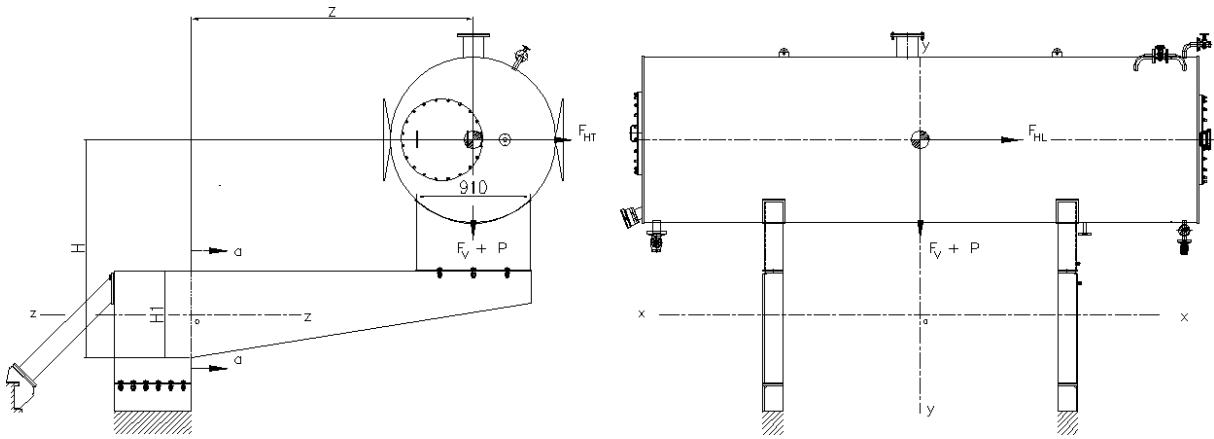


Figura 4.16: diagrama que indica la posición del centro de gravedad del tanque conservador, su soporte y la forma de aplicación de las cargas

las direcciones vertical y horizontal respectivamente, se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$g_h = 0.25$$

$$g_v = 0.20$$

$$a_h = 0.25 \times 3 = 0.75g = 7.35 \text{ m/s}^2 \quad (4.68)$$

$$a_v = 0.20 \times 3 = 0.6g = 5.886 \text{ m/s}^2 \quad (4.69)$$

$$F_{hl} = F_{ht} = F_h$$

$$F_h = (m_c + m_s) \times a_h = 5662 \times 7.35 \text{ m/s}^2 \quad (4.70)$$

$$F_h = 41.6 \text{ kN} \quad (4.71)$$

Fuerza vertical:

$$F_v = (m_c + m_s) \times a_v = 5662 \times 5.886 \text{ m/s}^2 \quad (4.72)$$

$$F_v = 33.6 \text{ kN} \quad (4.73)$$

Fuerza Peso:

$$P = (m_c + m_s) \times g = 5662 \times 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$P = 55.5 \text{ kN} \quad (4.74)$$

$$(4.75)$$

4.3.2.0.6. Esfuerzos en el soporte del conservador Primeramente se determinaron los valores del módulo de sección W_{xx} y W_{yy} para las dimensiones y geometría del soporte conservador, utilizando el teorema de Steiner. la figura 4.17 muestra la geometría del soporte conservador diseñado y fabricado que se analizará.

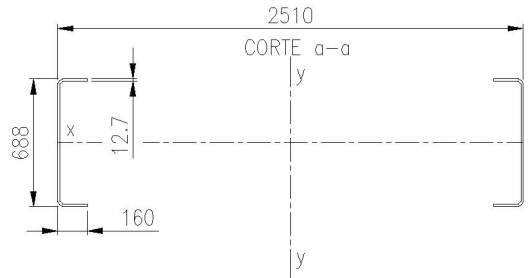


Figura 4.17: Sección transversal del soporte conservador.

$$W_{xx} = I_{xx}/344 = 4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{yy} = I_{yy}/1255 = 29.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

4.3.2.1. Esfuerzo de flexión en los soportes

Momento de flexión debido a fuerza horizontal:

$$M_{Fht} = F_{ht} \times \left(1738 - \frac{688}{2} \right) = 41600 \times 1.394$$

$$M_{Fht} = 57.9 \text{ kNm} \quad (4.76)$$

Momento de flexión debido a fuerza vertical y peso:

$$\begin{aligned} M_{FvP} &= (F_v + P) \times 2.555 = (33300 + 55544) \times 2555 \\ M_{FvP} &= 227 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (4.77)$$

Esfuerzo en el corte A-A debido a M_{Fht} y M_{FvP} :

$$\begin{aligned} \tau_{aa} &= \frac{(M_{Fht} + M_{FvP})}{W_{xx}} = \frac{57900 + 227000}{4.3 \times 10^{-3}} \\ \tau_{aa} &= 66 \text{ MPa} < 0,5 \times \sigma_y = 127 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.78)$$

4.3.2.2. Esfuerzo en los tornillos de fijación del tanque conservador

En esta parte, se determinaron las fuerzas y esfuerzos a los que están sujetos los tornillos de la fijación del conservador, mismos que se muestra en la figura 4.18, así como las fuerzas en los puntos y direcciones en que son aplicadas.

Tornillos utilizados: 25.4 mm – clase de resistencia A449

Sección transversal de los tornillos: $A=390 \text{ mm}^2$

Esfuerzo a la fluencia $\sigma_y=558 \text{ MPa}$

Cantidad de tornillos por pierna: 3

Fuerza de tensión en los tornillos debido a la fuerza horizontal:

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{F_h}{2} \times 1050 \times \frac{725}{185^2 + 725^2} = \frac{41600}{2} \times 1050 \times \frac{725}{55850} \\ F_t &= 283 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.79)$$

Tensión:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{F_t}{A} = \frac{283000}{390 \times 3} \\ \sigma_t &= 241 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.80)$$

Esfuerzo cortante en los tornillos:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{F_h}{6 \times A} = \frac{41600}{6 \times 390} \\ \tau &= 17.7 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.81)$$

Esfuerzo máximo a la tensión:

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{1}{2} \times \left(\sigma_t + \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau^2} \right) = \frac{1}{2} \times \left(439 + \sqrt{439^2 + 4 \times 17.7^2} \right) \\ \sigma_{max} &= 441 \text{ MPa} < \sigma_y \end{aligned} \quad (4.82)$$

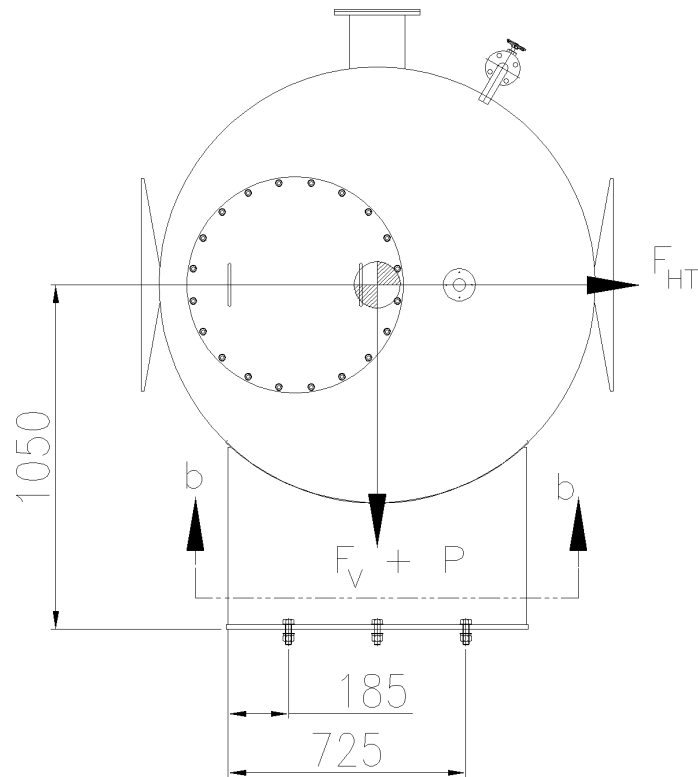


Figura 4.18: Diagrama de cuerpo libre para determinar las reacciones en los tornillos del conservador.

4.3.2.3. Esfuerzo en las piernas del conservador

Primeramente se determinaron los valores del módulo de sección W_{xx}, W_{yy} para las dimensiones y geometría de las piernas del conservador, utilizando el teorema de Steiner. En la figura 4.19 muestra la geometría del soporte conservador diseñado y fabricado que se analizará.

$$W_{xx} = 4.3 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

$$W_{yy} = 23 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

Material de las piernas: acero ASTM A36

Esfuerzo a la fluencia σ_y : 248 MPa

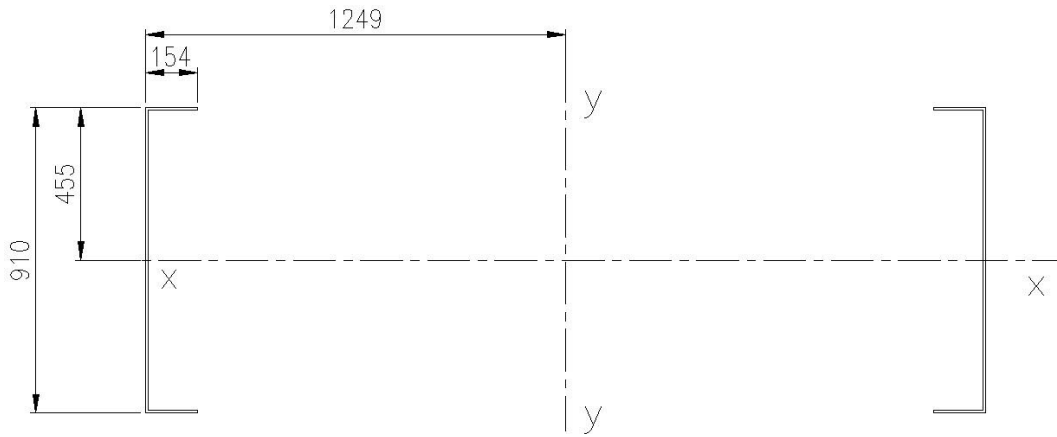


Figura 4.19: Sección transversal para determinar las propiedades de sección transversal de las piernas del conservador.

Momento debido a la fuerza horizontal:

$$\begin{aligned}
 M_h &= F_h \times 1240 = 41.6 \times 1.240 \\
 M_h &= 51.58 \text{ kNm}
 \end{aligned}
 \tag{4.83}$$

Tensión de flexión:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{ft} &= \frac{M_h}{W_{xx}} = \frac{51.58 \times 10^3}{4.3 \times 10^{-3}} \\
 \sigma_{ft} &= 12 \text{ MPa} < 0,5 \times \sigma_y = 127 \text{ MPa}
 \end{aligned}
 \tag{4.84}$$

4.3.2.4. Análisis de resultados

Conforme a los resultados obtenidos y ordenados en la tabla 4.10, se observa que todos los esfuerzos son menores a la resistencia a la cedencia de los materiales empleados para el soporte del tanque conservador. Por lo que se asegura la integridad estructural durante un sismo que genere aceleraciones iguales o menores a las contempladas en este estudio.

Tabla 4.10: Esfuerzos principales y factor de seguridad en la placa y los tornillos del soporte conservador.

Esfuerzos máximos (MPa)	componente	Factor de seguridad
$\sigma_{AA} = 66 \text{ MPa} < \sigma_{A36}$	Placa soporte	3.7
$\sigma_{tornillos} = 441 \text{ MPa} < \sigma_y$	Tornillos	1.2

4.3.2.5. Validación del análisis estático del soporte tanque conservador

La estructura fue proyectada en solid works 2014, se exportó a ANSYS 14 para realizar la simulación de la estructura estática, mediante el esfuerzo máximo Von Mises.

Las condiciones iniciales se establecen en la tabla 4.11:

Tabla 4.11: Condiciones iniciales

Parámetro	Valor
Aceleración gravedad	$a_g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Aceleración horizontal	$a_h = 0.25g$
Aceleración vertical	$a_v = 0.2g$
Masa del tanque conservador con aceite	5142kg
Peso del tanque conservador con aceite	50.443 en kN
Fuerza horizontal	41.6 en kN
Fuerza vertical	33.6 en kN

En la figura 4.20 muestra un esfuerzo 226 MPa es alto, está dentro de los límites permitidos para un acero A36. Con ello se demuestra en el corte a-a de la figura 4.16 tiene un valor de esfuerzo de 127 Mpa.

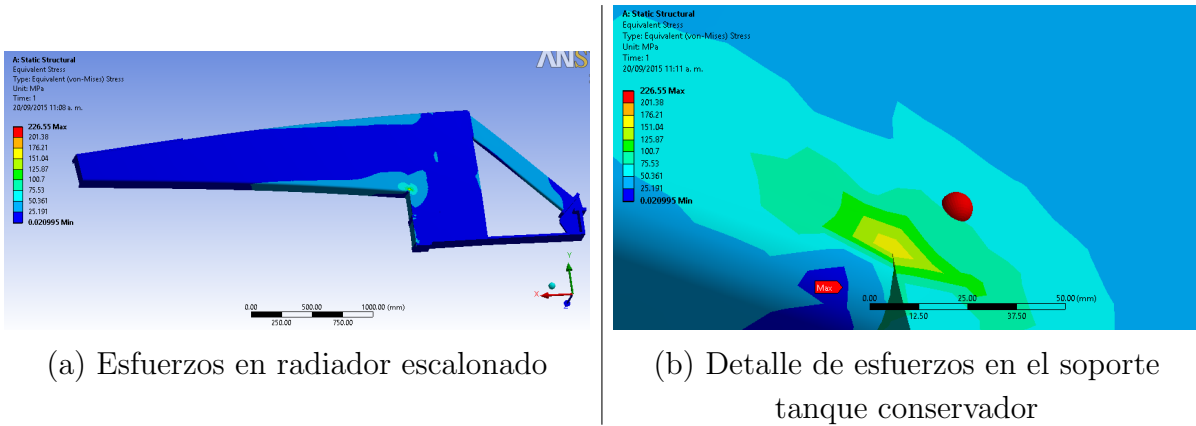


Figura 4.20: Esfuerzo máximo en zona de escalonamiento

La figura 4.21 muestra que la deformación máxima se encuentran en el extremo de la viga en cantilever o voladizo con 3mm.

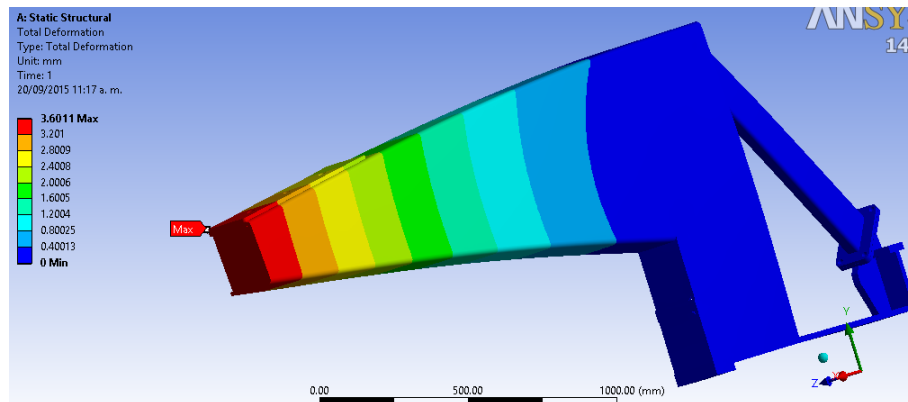


Figura 4.21: Esfuerzos máximos en el soporte del tanque conservador

4.3.2.5.1. Análisis de resultados del soporte del tanque conservador Conforme a los resultados obtenidos y ordenados en la tabla 4.12, se observa que todos los esfuerzos son menores a la resistencia a la cedencia de material A36 empleados para la sujeción del tanque conservador y la deformación es mínima, Por lo que se asegura su integridad estructural durante un sismo que genere aceleraciones iguales o menores a las contempladas en esta simulación.

Tabla 4.12: Esfuerzo y deformación máximos del soporte del tanque conservador

Esfuerzos (MPa)	principales	Factor de seguridad
σ_A	226	1.1
Deformación (MPa)	máxima	
σ_A	3.6 mm	
Resistencia a la fluencia A36 (MPa)		
σ_y	248	
Resistencia a cortante A36 (MPa)		
τ_{xy}	124	

Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1. Resultados de elementos del transformador para condiciones normales de terreno (No sísmico)

Los transformadores para operar en un terreno no sísmico o no calificado de acuerdo a la IEEE 693-2005, la aceleraciones son muy bajas el contratista encargado de la estructura de la subestación eléctrica define si necesito o no calificación sísmica el transformador. Como resultado, este transformador se ilustra en la siguiente figura.

5.1

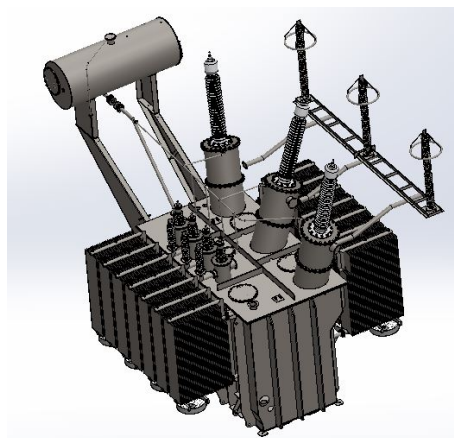


Figura 5.1: Transformador de potencia 100 mVA para terreno no sísmico

5.1.1. Base de transformador para terreno no sísmico

Algunos transformadores son instalados sin anclaje sobre la fundación, pero esta opción debe ser rechazada debido a los costos directos y indirectos asociados con el peligro del transformador. Los dueños de las subestaciones eléctricas han evaluado el riesgo relacionado con un anclaje inadecuado del transformador el costo es muy alto, por la tanto en las subestaciones ya construidas los transformadores ya instalados deben repararse y anclarse a la subestación, para los transformadores nuevos el costo es mínimo y debe proporcionarse con sus sistema de anclaje donde se requiera, especialmente cuando se encuentra instalado en una zona sísmica.

El transformador sin sistema de anclaje puede moverse hasta 0.6 m, como resultado las conexiones de las boquillas de alta y baja tensión fallaron y las porcelanas se quebraron. En una subestación en Japón se colocó 0.019 m de hule en la parte inferior, entre la base y la fundación para reducir el efecto del ruido por el transformador en operación sin anclar. Al parecer solo era una modificación menor, una base aislada, tuvo efectos adversos de respuesta y de funcionamiento en el transformador. El transformador no se deslizó durante el terremoto en Sendai Japón en 1978. Pero las boquillas resultaron dañadas. Una evaluación después del terremoto la empresa eléctrica indicó, que las carpetas reducen la frecuencia natural de los transformadores de tal manera que las boquillas fueron excitadas cerca de la resonancia y fueron dañadas. Uno o más boquillas fueron dañadas, cinco de las tres fases fueron dañadas. El uso de colchón de hule debajo del transformador fue descontinuado. Esto demuestra que el uso de aislamiento en la base requiere un análisis muy cuidadoso para asegurarse que los efectos deseados se alcancen [15]. Cuando el transformador se mueve relativamente en su cimentación, la entrada de los cables a la caja de control puede ser dañada

El transformador carece principalmente de anclaje. La figura muestra 5.2 una base de transformador sin preparación de anclaje.

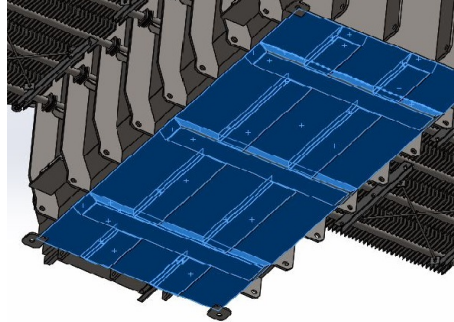


Figura 5.2: Base de transformador para terreno no sísmico

5.1.2. Banco de radiadores de transformador para terreno no sísmico

Los radiadores en los transformadores son usados para enfriar el aceite que circula alrededor de las bobinas. Los radiadores soportan en voladizo su propio peso y el del aceite contenido. También debe soportar las cargas sísmicas desarrolladas por el sismo. Los radiadores son compuestos por varias obleas de acero con forma de canal para incrementar su área de disipación de calor, 45 mm entre ellas, dos tubos con bridas en sus extremidades que se conecta a una válvula de aislamiento, en caso de algún daño originado por el sismo se cierra la válvula y se cambia el radiador, muchas veces durante la actividad de terremoto las juntas bridadas se aflojan y fugan. Después del evento se aprieta y se verifica que no exista fuga y se energiza el transformador [15]. El radiador diseñado para la actividad no sísmica, se coloca una solera en la parte superior para reducir el movimiento horizontal y un tirante inclinado para mitigar la carga en la posición vertical, sin llegar a restringirlo por completo el movimiento horizontal la figura 5.3 muestra un radiador diseñado para la actividad no sísmica.

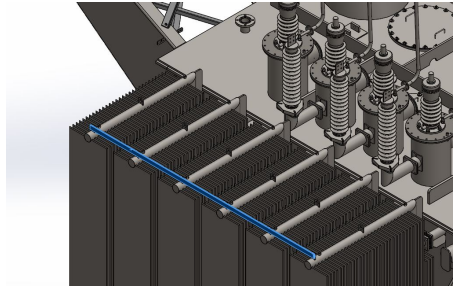
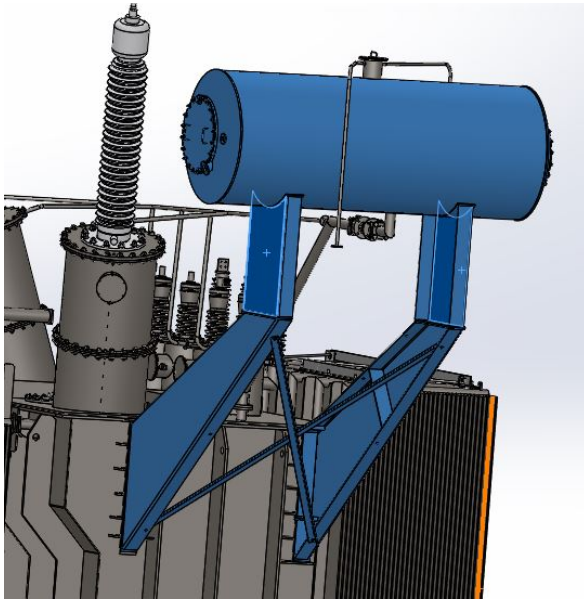


Figura 5.3: Banco de radiadores de transformador para terreno no sísmico

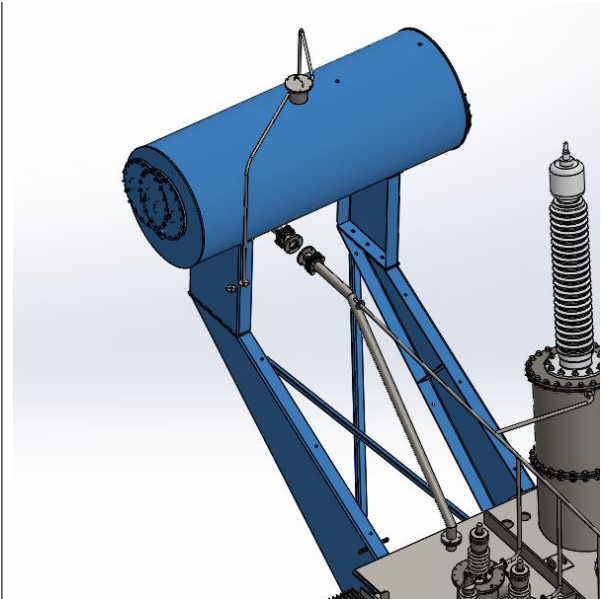
5.1.3. Tanque conservador de transformador para terreno no sísmico

El tanque conservador es largo puede almacenar cerca de 4000 litros de aceite y es soportado por encima del tanque principal. Este sirve de reserva para absorber el volumen de aceite que se expande en el tanque principal, todo el sistema, es aislado de la atmósfera por medio de un diafragma de hule. Dos tipos de falla que se han observado en el soporte del conservador y la otra en la tubería de conexión del tanque principal. En Chile los tornillos de un tanque conservador fallaron, el tanque conservador quedó recargado sobre la pared del muro cortafuego. Varios factores contribuyen a las fallas de los conservadores. Algunos conservadores son ensamblados entre placas con corredera. Las fuerzas sísmicas mueven el conservador relativamente del tanque principal. La segunda causa es el movimiento entre el tanque principal es la flexibilidad del conservador para vibrar paralelo al eje del tanque conservador. La mayoría de los diseños, el movimiento relativo entre el conservador y el tanque principal es pequeño y no causa ningún problema, Pero la tubería de conexión resulta que fuga [15].

El tanque conservador lleva un soporte desmontable al tanque principal del transformador. la figura 5.4 muestra la fijación y el reforzamiento se compone de ángulos en forma de X que forman una estructura.



(a) Soporte de conservador de transformador para terreno no sísmico visto del lado externo



(b) Soporte de conservador de transformador para terreno no sísmico visto del lado interno

Figura 5.4: Comparación de radiadores

5.2. Comparación de resultados obtenidos del transformador para condiciones normales sin calificación sísmica contra las condiciones del transformador con calificación sísmica

Realizando la comparación de ambos sistemas, tenemos un transformador para calificación sísmica muy similar transformador estándar. El costo en cada proceso es quien da la pauta a que no todos los transformadores se estandaricen para obtener la calificación sísmica. Existen terrenos de poca actividad sísmica, un transformador estándar instalado en un suelo con estas características no necesita sistema de anclaje y calificación por la IEEE 693. El cliente en su requerimiento de compra es el que indica si el transformador

requiere o no calificación sísmica por la IEEE 693. A su vez el cliente debe cumplir con lo solicitado por el gobierno para la instalación de una subestación eléctrica. La comparación se puede ver en la siguiente gráfica 5.5 y en seguida se muestra una lista de los accesorios necesarios a reforzar para obtener la calificación sísmica.

1. Base con barrenos para restringir el movimiento del transformador a la fundación de la subestación eléctrica.
2. Colocación de soporte en banco de radiadores
3. Reforzamiento en base del taque conservador

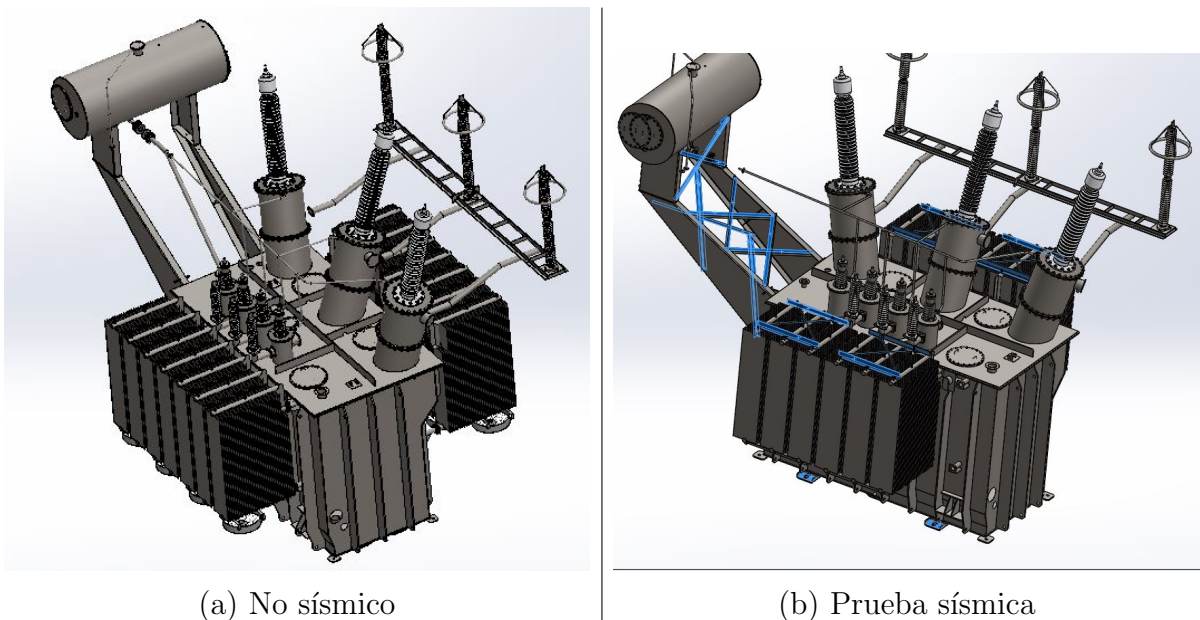


Figura 5.5: Comparación de base

5.2.1. Comparación de resultados de base de transformador con y sin calificación sísmica

La base tiene una extensión en sus extremidades para fijar a la cimentación de la estructura de la subestación eléctrica, la especificación [1] indica que el suministro de anclas y elementos embebidos no es responsabilidad del fabricante del transformador, pero si es responsable de calcular las reacciones originadas por el sismo en el cuerpo del transformador, para la selección de la ancla.

La figura 5.6 muestra la base del transformador diseñado para calificación no sísmica y sísmica respectivamente.

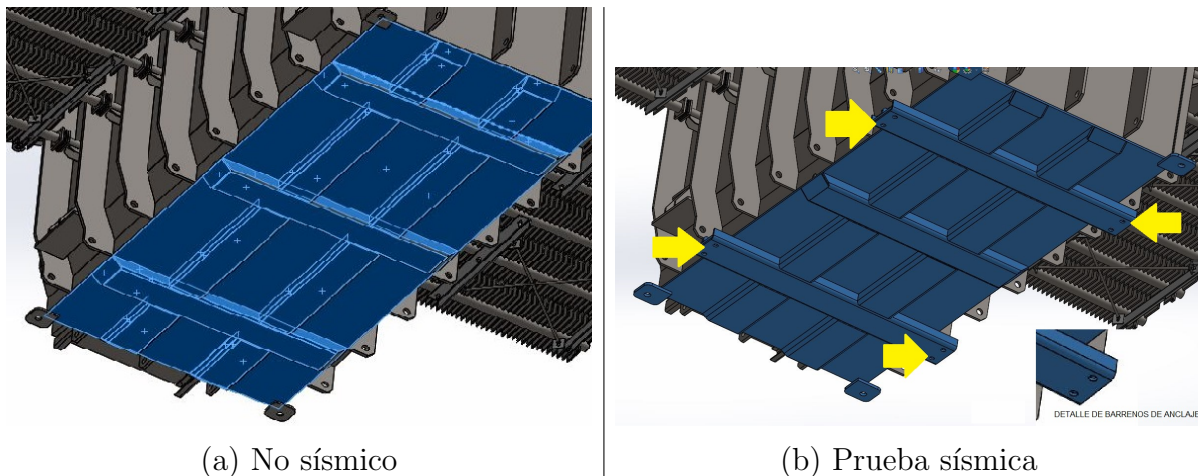


Figura 5.6: Comparación de base, radica principalmente en la extensión de la base en el eje transversal y sus barrenos para anclaje a la cimentación

Hay evidencia que aún con un sistema de anclaje, si no es el correcto puede moverse el transformador o romperse el ancla. El sistema de anclaje debe diseñarse para que se soporte el esfuerzo cortante en los tornillos, que el par de apriete y diámetro externo de la ancla permitan tener una junta atornillada lo suficientemente resistente para soportar el esfuerzo cortante. La figura 5.7 muestra un transformador en el terremoto de Chile febrero 2010 con movimiento del transformador y con el ancla deformada.

En ese mismo día el terremoto hizo una destrucción masiva en las subestaciones eléctricas. La figura 5.8 muestra como falló por cortante en el ancla.

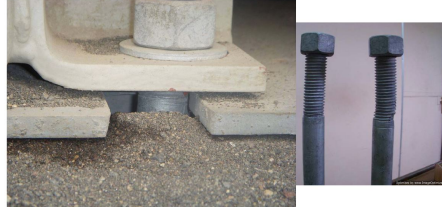


Figura 5.7: El ancla alcanzó la fluencia producida por el esfuerzo cortante causado por el sismo



Figura 5.8: El ancla alcanzó la fluencia producida por el esfuerzo cortante causado por el sismo

5.2.2. Comparación de resultados del banco de radiadores del transformador con y sin calificación sísmica

Durante un sismo los elementos con mayor daño han sido los radiadores, la figura 5.9 muestra la comparación de banco de radiadores del transformador diseñado para calificación no sísmica y sísmica respectivamente.

La especificación IEEE 693-2005 [1] es clara, la aceleración para los radiadores debe multiplicarse por 3. Es por ello que se restringe su movimiento horizontal y vertical como se muestra en la figura 5.9 (b) a diferencia de la figura 5.9 (a).

La figura 5.9 (b) también puede observarse que se reforzó el cuello del radiador para solucionar el problema que se tuvo en la figura 4.14

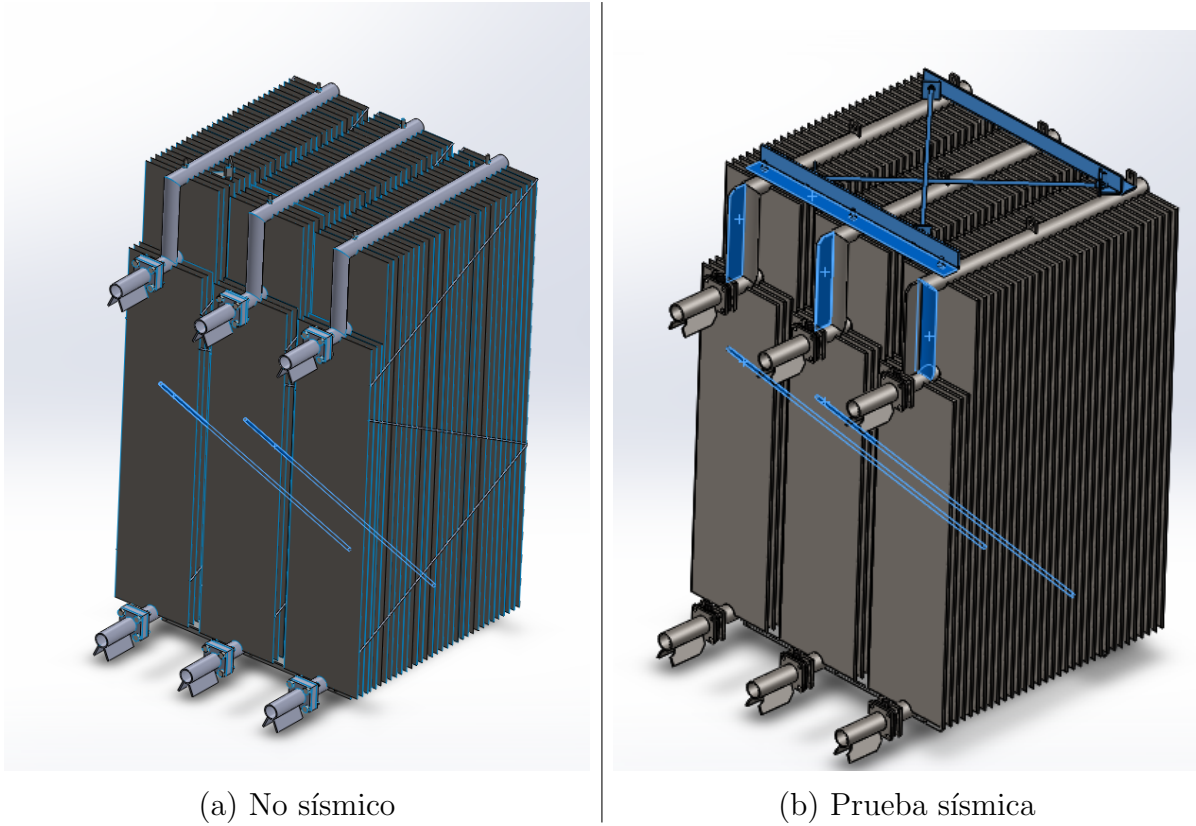


Figura 5.9: Comparación de radiadores

5.2.3. Comparación de resultados para el taque conservador del transformador con y sin calificación sísmica

El tanque conservador es uno de los elementos que la especificación considera como críticos y debe de multiplicarse la aceleración del terreno por 3.

En la figura 5.10 se muestran el reforzamiento que se colocó sobre la estructura estándar. Aunado a la junta flexible para la conexión del relevador.

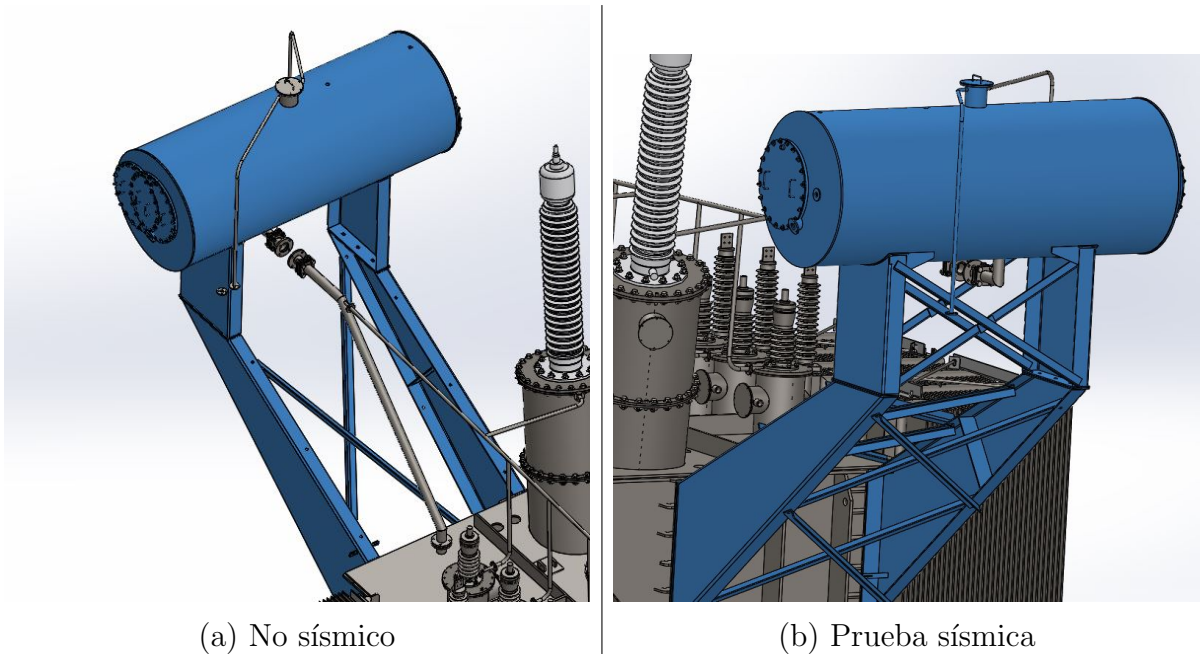


Figura 5.10: Comparación de radiadores

La junta flexible se usa para reducir la posible fuga después del sismo.

Conclusiones

Con la experiencia en el diseño de transformadores y la experiencia que se adquirió en la maestría durante dos años se concluye es posible generar reportes de sismo siguiendo los lineamientos de la IEEE 693. El método para el cálculo para encontrar las aceleraciones del proyecto, se realizó en MATHCAD, se valida con la aplicación: <http://earthquake.usgs.gov/designmaps/us/application.php>, y se obtienen resultados semejantes, esto es muy buen punto, si la página llega a cerrarse se tiene la confianza de usar la aplicación MATHCAD y seguir con los estudios. Conocidas la aceleraciones se puede conocer el nivel de sismo desarrollado en un suelo de los Estados Unidos de Norte América con forme a la IEEE 693-2005.

El procedimiento para el cálculo de las fuerzas máximas en la base del transformador permite diseñar los tornillos de anclaje y el torque requerido para que soporte adecuadamente el esfuerzo cortante directamente en el tornillo de anclaje.

La simulaciones realizadas en ANSYS 14 Work bench permite visualizar las áreas a reforzar. Se observó un esfuerzo alto en los radiadores escalonados, por lo que en la practica se coloca un nervio para reducir el esfuerzo en el área del escalonamiento. Para el tanque conservador se reforzó con nervios la base del conservador y se cambió la placa de sujeción incrementando el espesor para reducir los esfuerzos.

La comparación que se realizó en transformadores no calificados y calificados para la actividad sísmica bajo condiciones de la norma IEEE 693-2005. Es excelente para una ayuda visual y para saber que efectos tiene el diseño. Con ello obtuvo que componentes, procesos deben cambiar para obtener un transformador calificado por la IEEE 693-2005.

Apéndice

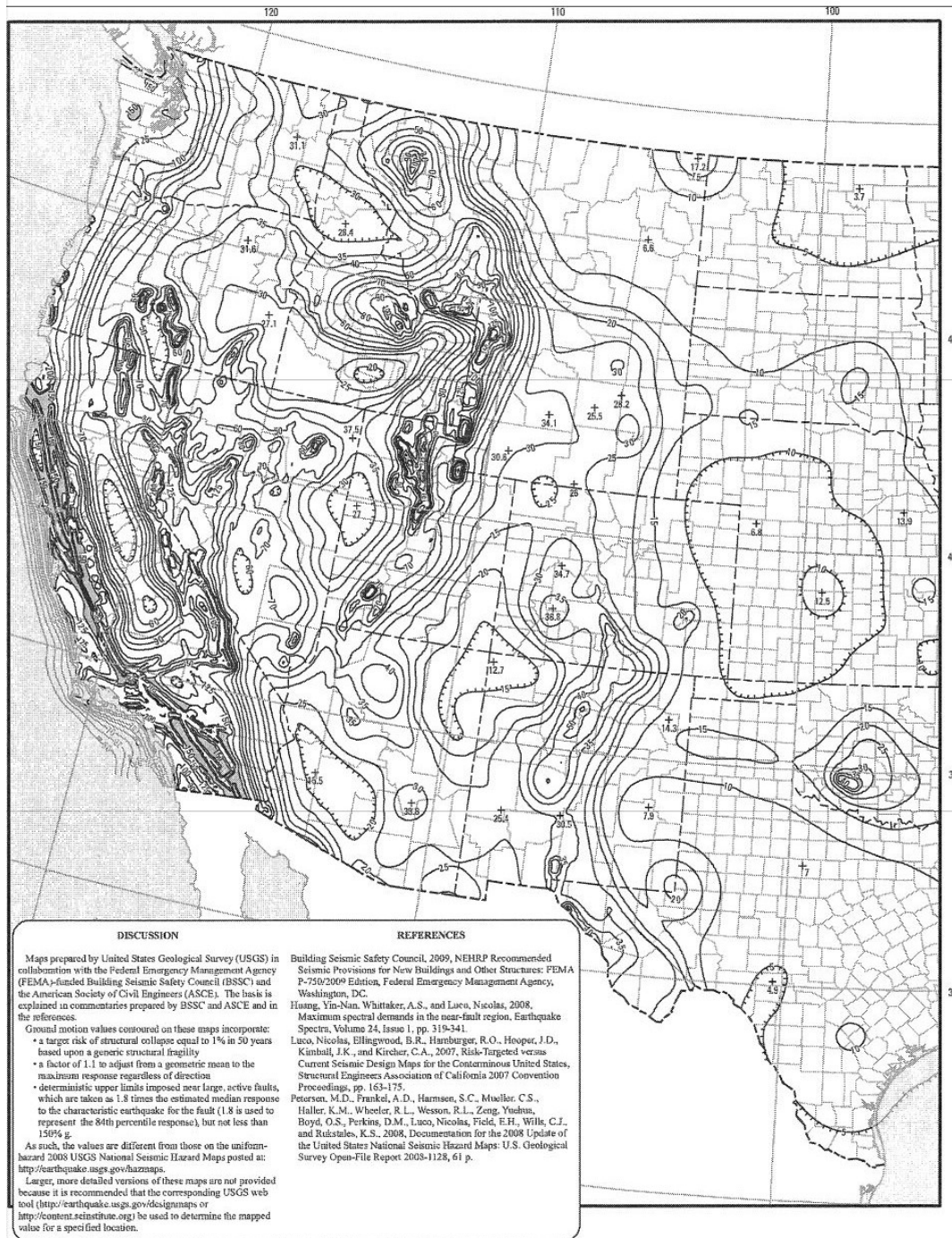


Figura 11: S_g Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en los Estados Unidos de América para una aceleración de respuesta espectral de 0.2s (Para % 5 amortiguamiento crítico), Clase de sitio B. [3]

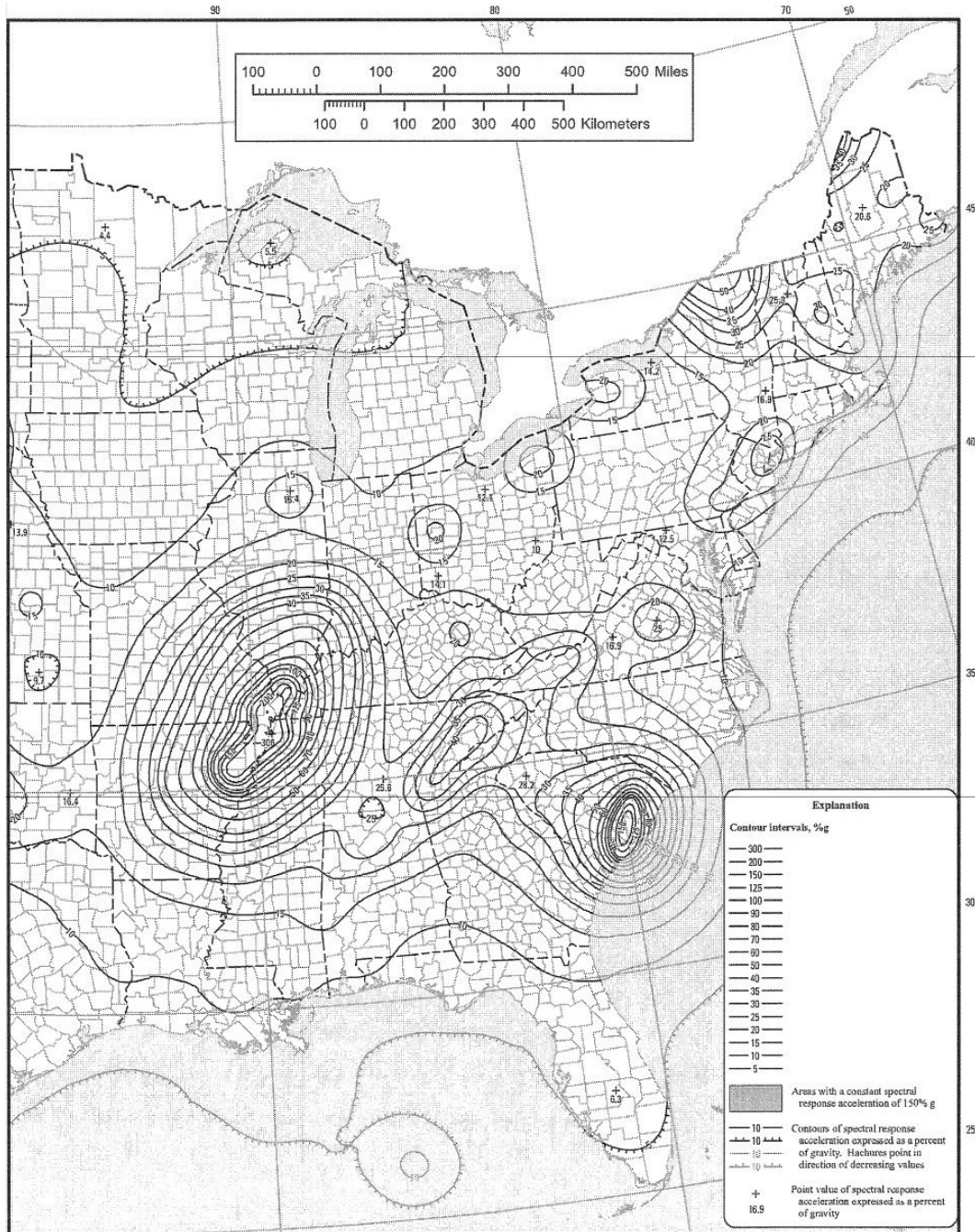


Figura 12: Continuación 11. [3]

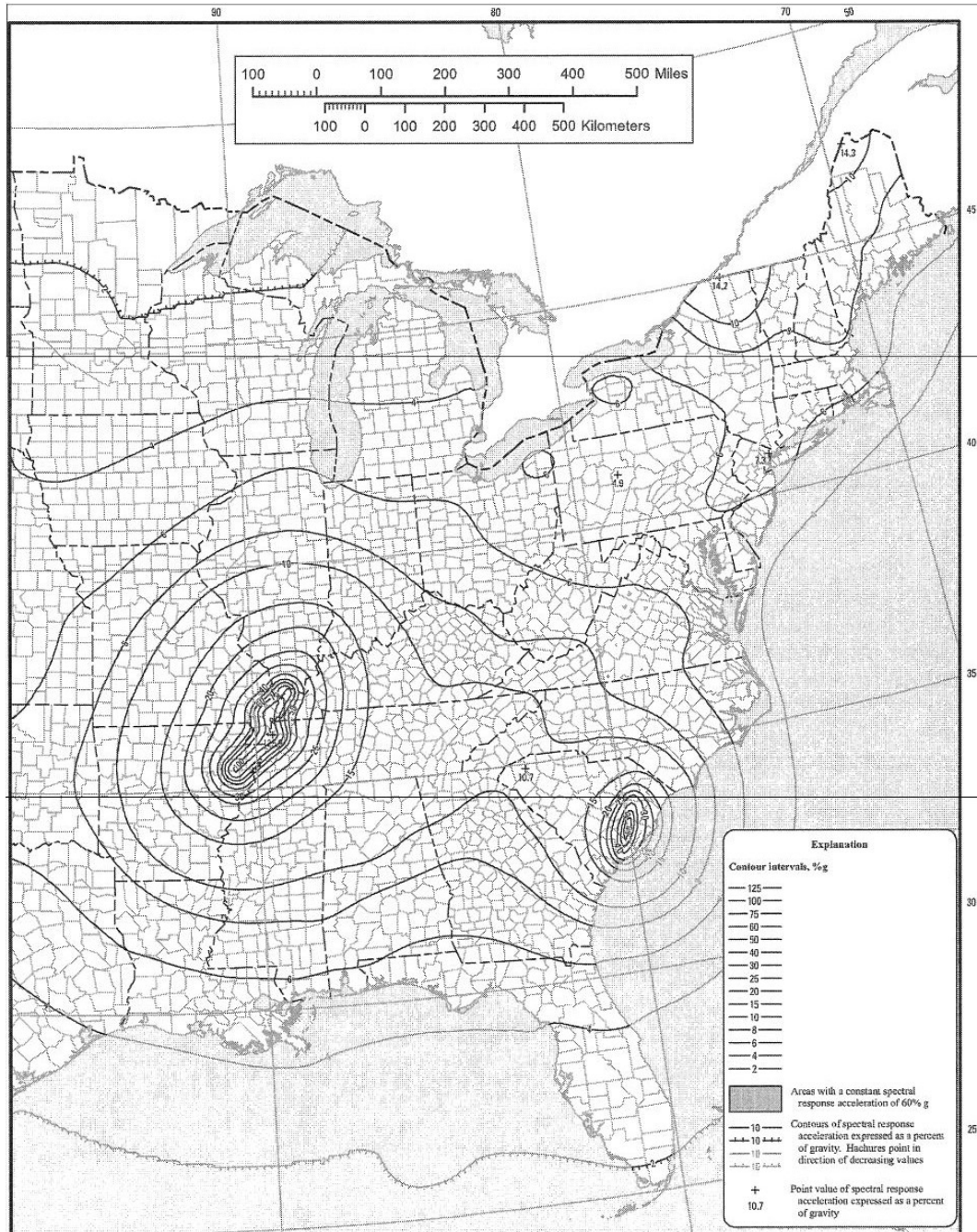


Figura 14: Continuación 13. [3]

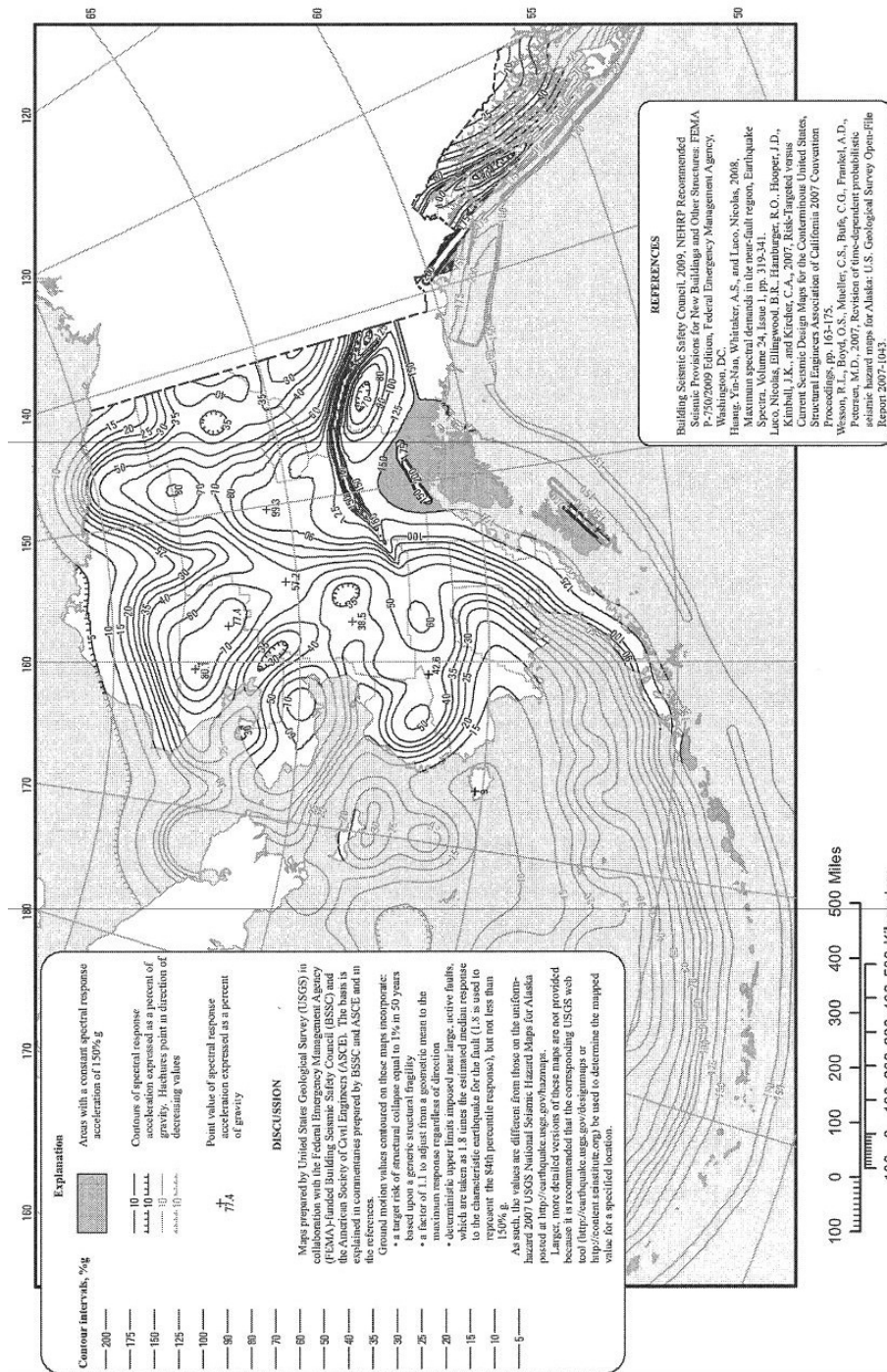


Figura 15: S_S Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Alaska para una aceleración de respuesta espectral de 0.2s (Para % 5 amortiguamiento crítico), Clase de sitio B. [3]

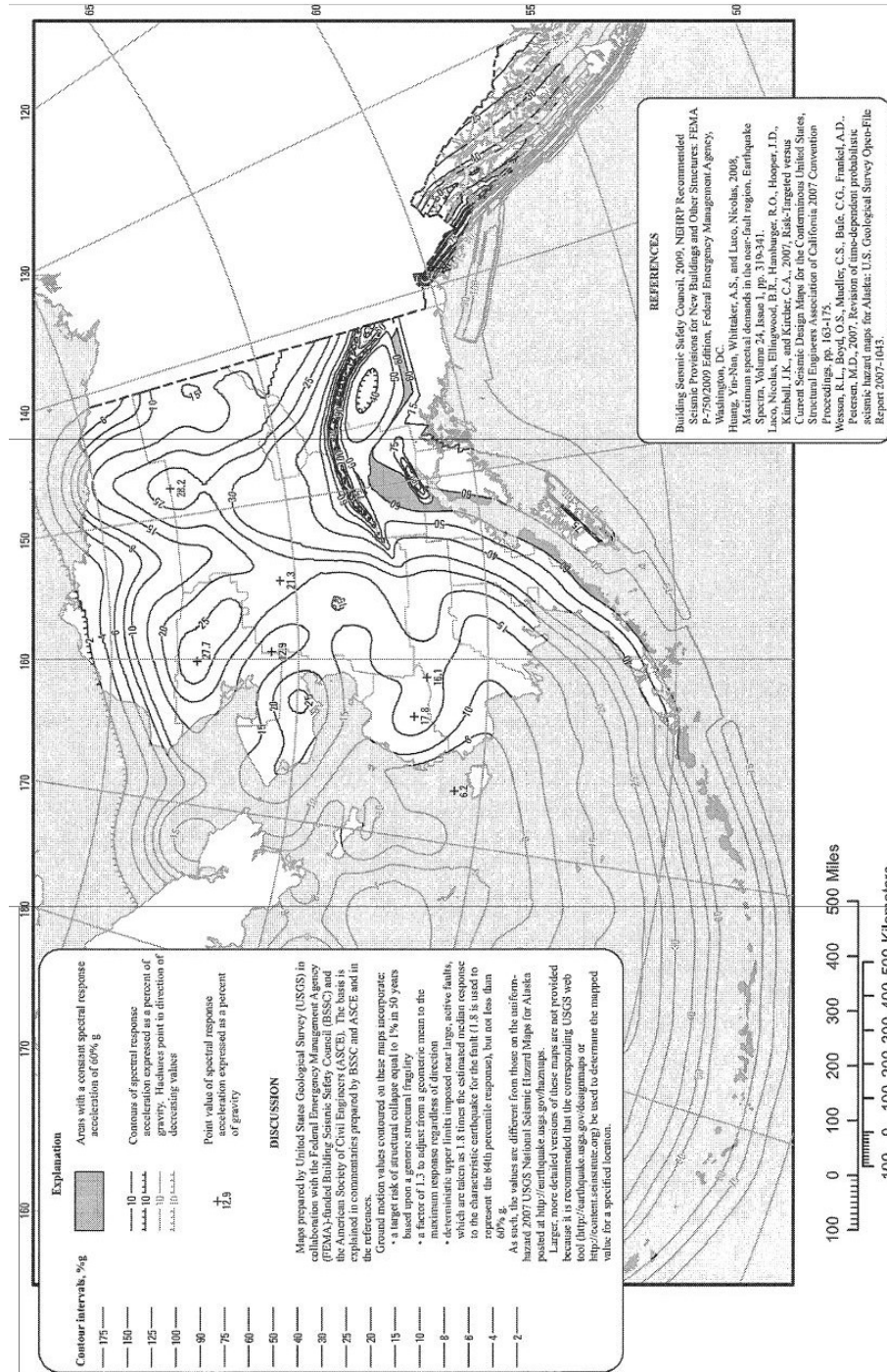
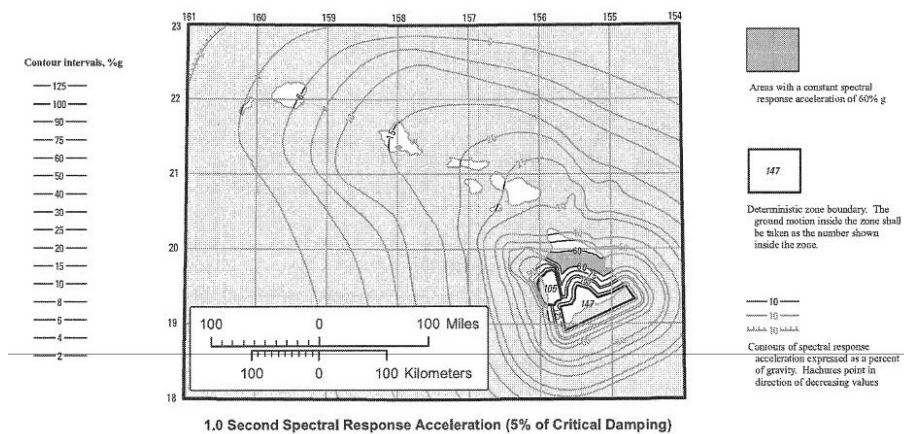
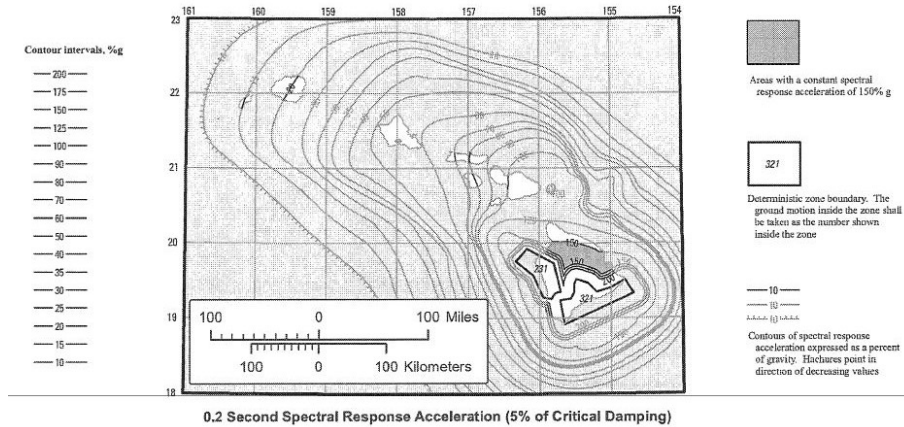


Figura 16: S_1 Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Alaska para una aceleración de respuesta espectral de 1s (Para % 5 amortiguamiento crítico), Clase de sitio B [3]



DISCUSSION	REFERENCES
<p>Maps prepared by United States Geological Survey (USGS) in collaboration with the Federal Emergency Management Agency (FEMA)-funded Building Seismic Safety Council (BSSC) and the American Society of Civil Engineers (ASCE). The basis is explained in commentaries prepared by BSSC and ASCE and in the references.</p> <p>Ground motion values contoured on these maps incorporate:</p> <ul style="list-style-type: none"> • a target risk of structural collapse equal to 1% in 50 years based upon a generic structural fragility • deterministic upper limits imposed near large, active faults, which are taken as 1.8 times the estimated median response to the characteristic earthquake for the fault (1.8 is used to represent the 9th percentile response), but not less than 150% and 60% g for 0.2 and 1.0 sec, respectively. <p>As such, the values are different from those on the uniform-hazard 1998 USGS National Seismic Hazard Maps for Hawaii posted at http://earthquake.usgs.gov/hazmaps.</p> <p>Larger, more detailed versions of these maps are not provided because it is recommended that the corresponding USGS web tool (http://earthquake.usgs.gov/designmaps or http://content.seisintstitute.org) be used to determine the mapped value for a specified location.</p>	<p>Building Seismic Safety Council, 2009, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, FEMA P-750/2009 Edition, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.</p> <p>Huang, Yi-Nan, Whitaker, A.S., and Luco, Nicolas, 2008, Maximum spectral demands in the near-fault region, Earthquake Spectra, Volume 24, Issue 1, pp. 319-341.</p> <p>Klein, F., Frankel, A.D., Mueller, C.S., Weston, R.L., and Okubo, P., 2001, Seismic hazard in Hawaii: high rate of large earthquakes and probabilistic ground-motion maps, Bulletin of the Seismological Society of America, Volume 91, pp. 479-498.</p> <p>Luco, Nicolas, Ellingwood, B.R., Hamburger, R.O., Hooper, J.D., Kimball, J.K., and Kircher, C.A., 2007, Risk-targeted versus Current Seismic Design Maps for the Conterminous United States, Structural Engineers Association of California 2007 Convention Proceedings, pp. 163-175.</p>

Figura 17: S_S y S_1 Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Hawaii para una aceleración de respuesta espectral de 0.2s y 1s (Para % 5 amortiguamiento crítico), Clase de sitio B. [3]

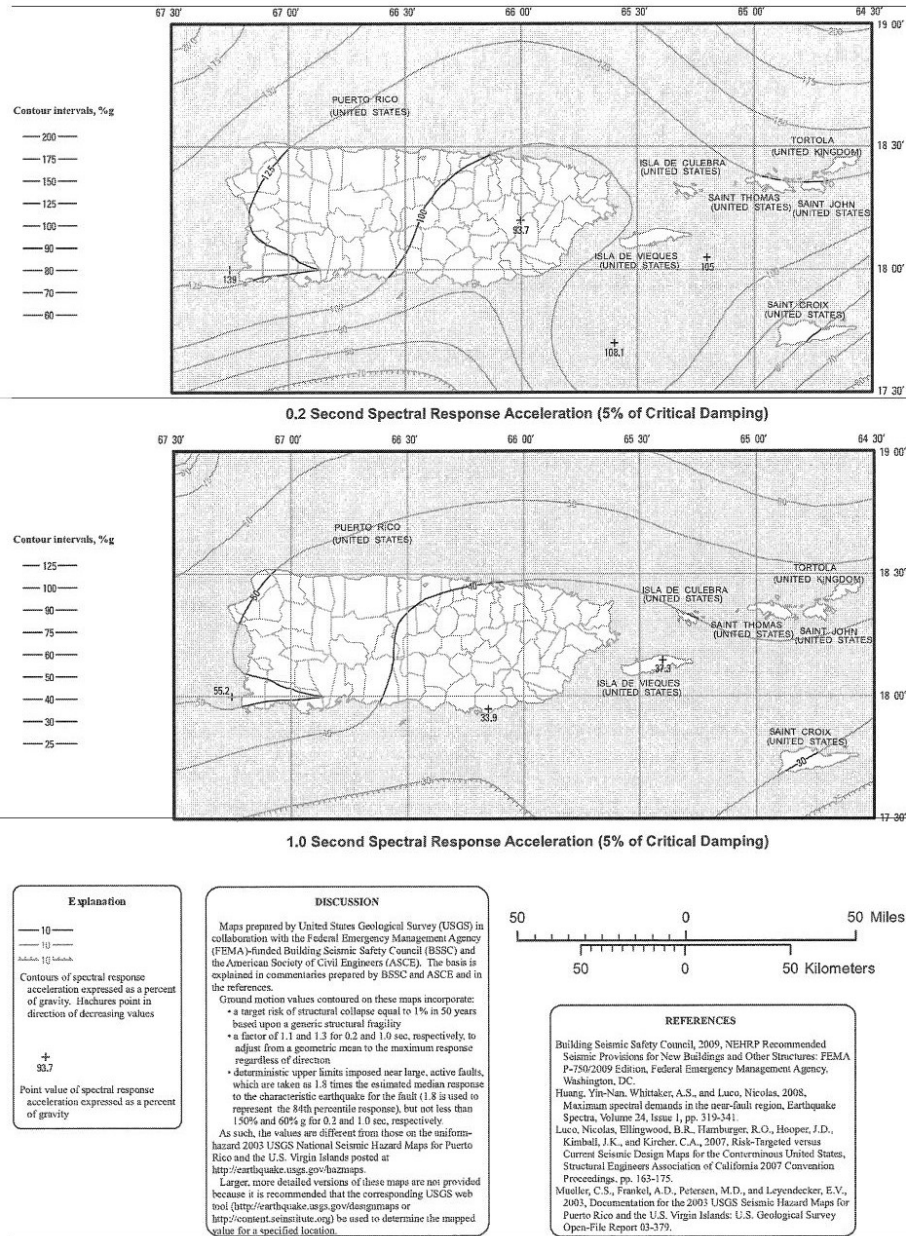


Figura 18: S_S y S_1 Riesgo ajustado considerando un terremoto máximo (MCE_R) Parámetros de movimiento sísmico en Puerto Rico para una aceleración de respuesta espectral de 1s (Para % 5 amortiguamiento crítico), Clase de sitio B. [3]

Table 11.4-1 Site Coefficient, F_a

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
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	See Section 11.4.7				

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_s .

Table 11.4-2 Site Coefficient, F_v

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE _R) Spectral Response Acceleration Parameter at 1-s Period				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
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	See Section 11.4.7				

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S_1 .

Figura 19: Coeficientes de sitio F_a y F_v . [3]

Table 13.6-1 Seismic Coefficients for Mechanical and Electrical Components

Mechanical and Electrical Components	a_p^a	R_p^b
Air-side HVAC, fans, air handlers, air conditioning units, cabinet heaters, air distribution boxes, and other mechanical components constructed of sheet metal framing	2.5	6.0
Wet-side HVAC, boilers, furnaces, atmospheric tanks and bins, chillers, water heaters, heat exchangers, evaporators, air separators, manufacturing or process equipment, and other mechanical components constructed of high-deformability materials	1.0	2.5
Engines, turbines, pumps, compressors, and pressure vessels not supported on skirts and not within the scope of Chapter 15	1.0	2.5
Skirt-supported pressure vessels not within the scope of Chapter 15	2.5	2.5
Elevator and escalator components	1.0	2.5
Generators, batteries, inverters, motors, transformers, and other electrical components constructed of high deformability materials	1.0	2.5
Motor control centers, panel boards, switch gear, instrumentation cabinets, and other components constructed of sheet metal framing	2.5	6.0
Communication equipment, computers, instrumentation, and controls	1.0	2.5
Roof-mounted stacks, cooling and electrical towers laterally braced below their center of mass	2.5	3.0
Roof-mounted stacks, cooling and electrical towers laterally braced above their center of mass	1.0	2.5
Lighting fixtures	1.0	1.5
Other mechanical or electrical components	1.0	1.5

Figura 20: Coeficientes sísmicos para componentes eléctricos. [3]

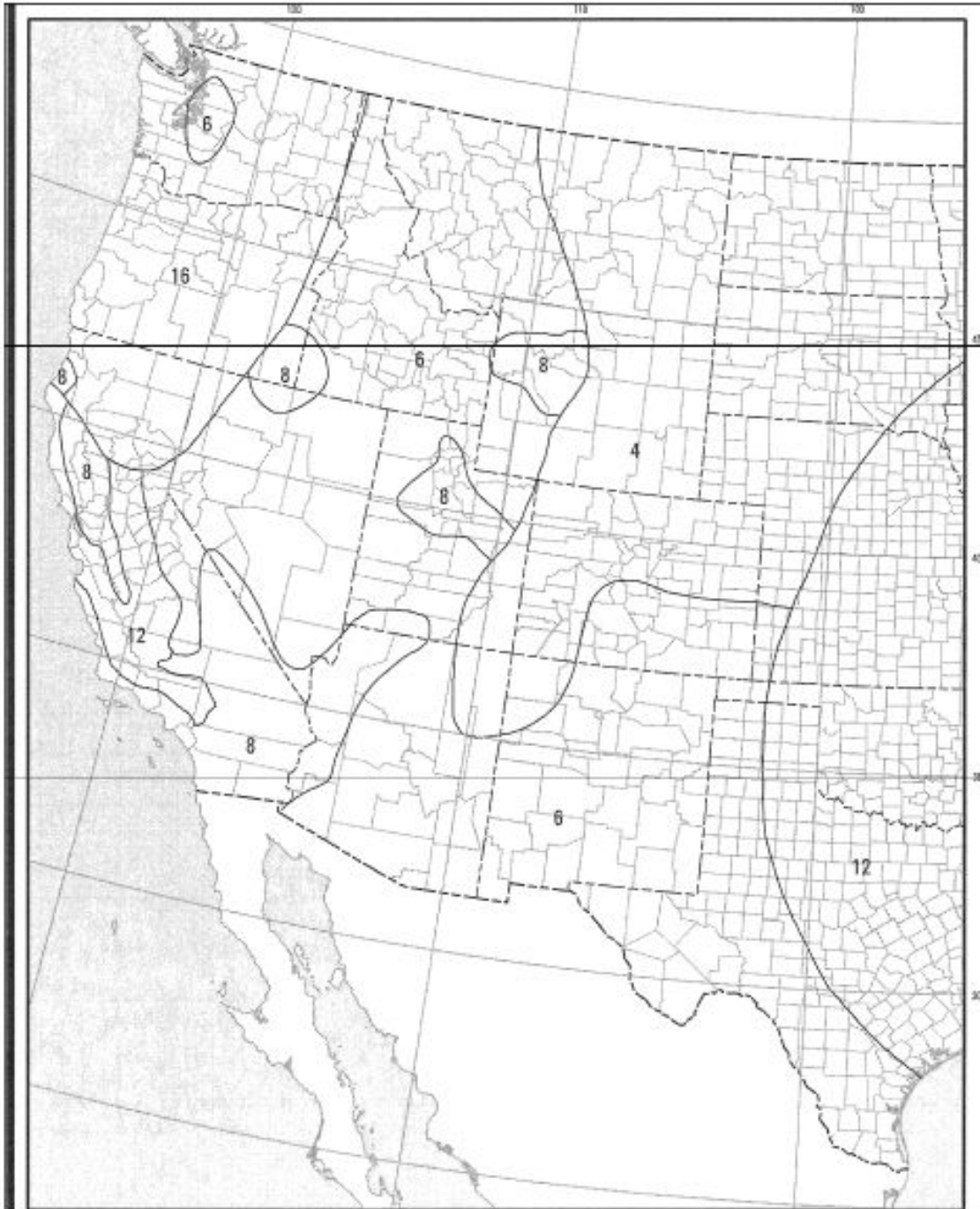


Figura 21: Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para Estados Unidos de América. [3]

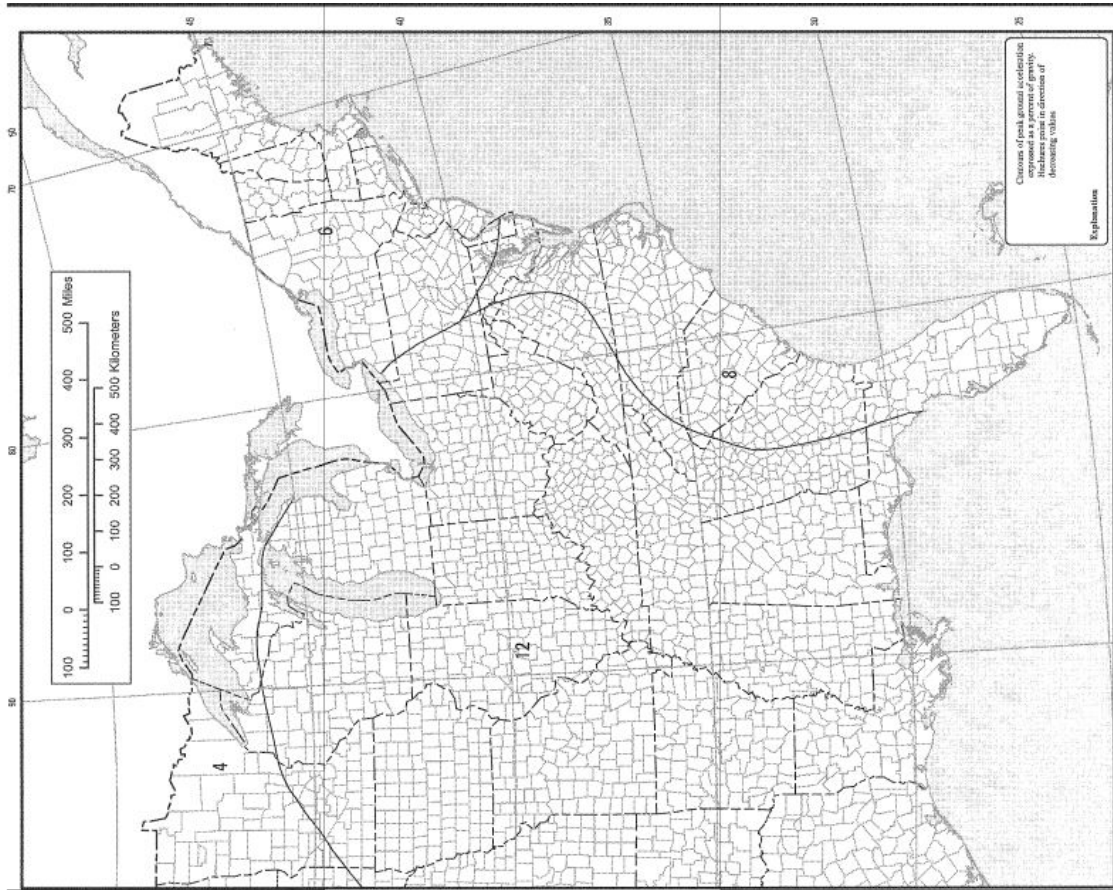


Figura 22: Continuación 21. [3]

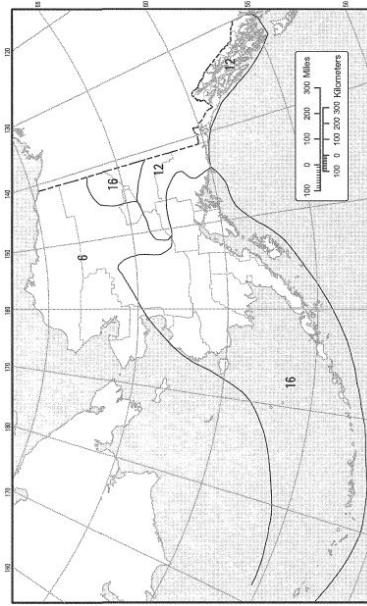


Figura 23: Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para Alaska. [3]

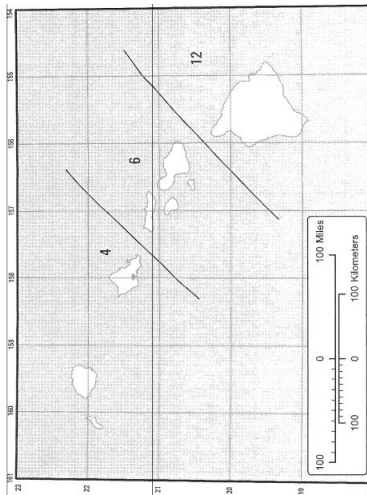


Figura 24: Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para Hawaii. [3]

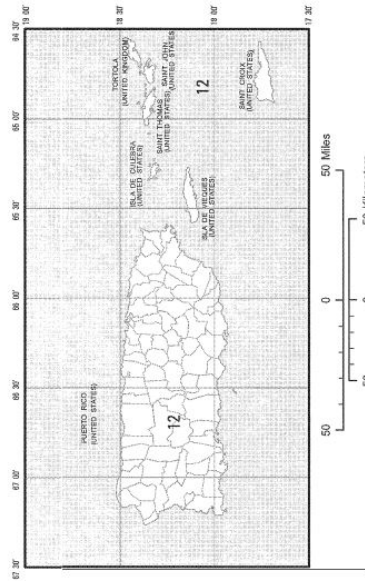


Figura 25: Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para las Islas Virgen. [3]

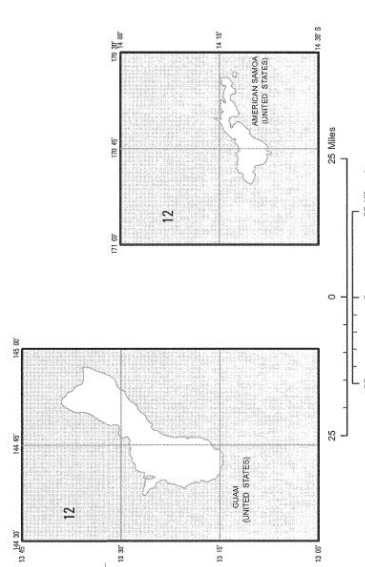


Figura 26: Mapa período de transición largo-periodo, $T_L(s)$, para puerto Guam y América Samoa. [3]

Bibliografía

- [1] *IEEE-693-2005 Recommended Practice for Seismic Design of Substations*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, NY, 2005.
- [2] *International code building 2009*. International Code Building, Estados Unidos, 2009.
- [3] *ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Structures*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2010.
- [4] A., U. *Principles of seismology*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 1999.
- [5] BUDINAS, R. G. Mc Graw Hill.
- [6] C.H., S. *The mechanics of earthquakes and fouling*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 1990.
- [7] CHOPRA, A. K. *Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall international series, 2012.
- [8] DE USA, S. G. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/background.php> (2011).
- [9] ELNASHA, A. S., AND SAMO, L. D. *Fundamentals of earthquake engineering*. John Wiley and Sons,Ltd, Inglaterra, 2008.
- [10] FITZGERALD, R. W. *Mecánica de materiales*. Alfahomega, México, D.F., 1996.
- [11] HIBBELER, R. C. *Mecánica para ingenieros*. CECSA, México, D.F, 1995.
- [12] JOHNSTON, F. B. E. R. *Mecánica de materiales*. Mc Graw Hill, México, D.F, 2007.

- [13] KANAI, K. *Engineering seismology*. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 1983.
- [14] KEMPER, L. *ASCE 113 Substation Structure Design Guide*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2007.
- [15] SCHIFF, A. *Guide to improved earthquake performance of electric power systems*. US Department of Commerce, Estados Unidos de Norteamérica, 1998.
- [16] WAI-FAH CHEN, C. S. *Earthquake engineering-Handbook*. CRC PRESS, Inglaterra, 2002.