



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS SÍSMICO CON MÉTODOS MODAL ESPECTRAL Y TIEMPO HISTORIA
PARA UN MODELO INTEGRADO DE TURBO GENERADOR DE 375 MW, NCh2369
ACTUALIZADA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RODRIGO ANDRÉS MANQUELA FQUÉN VILLALOBOS

PROFESOR GUÍA:

HUGO BAESLER CORREA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALEJANDRO FONT FILAX

VIVIANA MERUANE NARANJO

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Rodrigo Andrés Manquelaquén Villalobos
FECHA: 02/04/2018
PROFESOR GUÍA: Hugo Baesler Correa

ANÁLISIS SÍSMICO CON MÉTODOS MODAL ESPECTRAL Y TIEMPO HISTORIA PARA UN MODELO INTEGRADO DE TURBO GENERADOR DE 375 MW

El avance en la investigación y tecnología del equipamiento mecánico ha conducido al desarrollo de equipos más eficientes, pero a su vez de mayor complejidad. En el caso de la ingeniería civil, sus métodos de análisis y modelos permitidos por los softwares, en particular en la ingeniería sísmica de equipos, en la cual se debe cumplir con los límites operacionales que impone el fabricante del equipo, ya sea en su comportamiento dinámico con operación normal, operación de emergencia y operación con sismo. En Chile, estos problemas ocurren en proyectos de gran envergadura como es el caso de las centrales termoeléctricas, en donde las normas de diseño estructural y sísmico no siempre abordan el análisis de interacción de la estructura de soporte y los componentes mecánicos del equipo. Sin embargo se ha desarrollado una actualización de la norma NCh2369, la cual se encuentra en estado de consulta pública por el INN, que exige un nuevo método de análisis mediante el “Modelo Integrado de Análisis de Turbo Generador” (MIATG). Esta metodología de análisis permitirá obtener resultados más precisos de verificación de los límites operacionales del equipo y considerando la interacción suelo-estructura-equipo.

En este trabajo de título se crea un modelo computacional según los requisitos que impone el MIATG en la actualización de la norma, considerando información de condiciones de sitio, estructura y equipo de un proyecto construido, entregado para esta investigación. El modelo considera una mesa de fundación (estructura soportante), el equipo turbo generador, la interacción suelo-estructura a través de resortes y las cargas existentes vivas y muertas. Adicional a lo anterior, se utilizan dos programas de modelamiento estructural para cumplir con los objetivos de la memoria: SAP2000 v.19 y ANSYS apdl.

La investigación considera el desarrollo del modelo en dos versiones: la primera considerando propiedades de rigidez y amortiguamiento simétricas en los descansos del rotor del equipo, en tanto la segunda versión considerando las propiedades de rigidez y amortiguamiento asimétricas en los descansos del rotor entregados por el fabricante del equipo. Los modelos se analizan en unos puntos de control en el eje longitudinal del rotor, a través de dos métodos de análisis dinámico: modal espectral y tiempo-historia utilizando registros sísmicos de aceleraciones reales de la zona, de acuerdo a la norma actualizada NCh2369.

Los resultados de desplazamiento en los puntos de control del rotor demuestran que la importancia del mallado en un modelo integrado presenta un límite óptimo. También es importante tener presente el rango de diferencia de las respuestas de desplazamiento entre los programas de análisis que se utilizan para comparar resultados con un mismo modelo. Por otra parte, los métodos de análisis dinámicos aplicados en el modelo integrado para la obtención de los desplazamientos en el rotor difieren en sus resultados, dado que el método de análisis modal espectral entrega respuestas mayores al método de análisis tiempo-historia. En cuanto a las propiedades dinámicas de los descansos del rotor, la utilización de las propiedades con una matriz simétrica entrega respuestas de desplazamiento en los puntos de control del rotor menores que las respuestas de desplazamiento utilizando propiedades con una matriz asimétrica.

AGRADECIMIENTOS

En esta etapa de vida universitaria y crecimiento personal, tanto física como intelectual, quiero agradecer a todas las personas, que en algún momento de sus vidas, me apoyaron y ayudaron a seguir y terminar este proceso, ya sea mediante un diálogo ameno o unas palabras de ánimo. Agradecer infinitamente a mi familia y a mis padres, quienes siempre han sido un pilar fundamental en mi vida y además me han querido, aconsejado y ayudado hasta el día de hoy. Agradecer a mis amigos de la vida y compañeros de universidad, con quienes compartí muchos momentos agradables e inolvidables e hicieron mi estadía universitaria y vida personal increíble. Al cuerpo docente de la Universidad de Chile, en especial a mi profesor guía Hugo Baesler, por darme la oportunidad de trabajar en este tema interesante e importante para el desarrollo del país. Por último agradecer a mi novia Wiviany, quien estuvo siempre a mi lado en estas últimas etapas de mi trabajo de título sin otro interés más que un amor incondicional.

Tabla de Contenido

1. Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivos Generales	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Metodología	4
1.4 Marco Teórico	7
1.4.1 Contextualización	7
1.4.2 Método de Superposición Modal Espectral	9
1.4.3 Método Tiempo-Historia	12
2. Capítulo 2: Revisión de normas y estado actual	15
2.1 Norma NCh2369. Of2003	15
2.2 ASCE 7-10	18
2.3 Estado actual en Chile	19
2.3.1 Extractos de la norma NCh2369 actualizada	19
3. Capítulo 3: Desarrollo de un modelo	22
3.1 Modelo SAP2000	22
3.1.1 Geometría	22
3.1.2 Interacción suelo-estructura	35
3.1.3 Cargas asignadas	37
3.1.4 Análisis dinámico	40
3.2 Modelo ANSYS	45
3.2.1 Propiedades dinámicas de los descansos del rotor	45
3.3 Información del equipo	46
4. Capítulo 4: Resultados y discusión	48
4.1 Modos considerados	48
4.2 Caso 1: Comparación de mallados en SAP2000	52
4.3 Caso 2: Comparación entre programas SAP2000 y ANSYS apdl	54
4.4 Caso 3: Comparación entre métodos modal espectral y tiempo-historia	56
4.5 Caso 4: Comparación de modelos considerando distintas propiedades dinámicas en los descansos del rotor del equipo	58
5 Capítulo 5: Conclusiones y comentarios	60

6	Bibliografía	64
7	Anexos	65
A)	Análisis Dinámico	65
a.	Código obtención de espectro.....	65
b.	Código comparación de espectros	66
B)	Interacción Suelo-Estructura	67

Índice de Figuras

Figura 1: Paso de tiempo Dt del registro sísmico de aceleración 2005 utilizado en el método de análisis tiempo-historia.....	14
Figura 2: Vista isométrica de la mesa de fundación.....	23
Figura 3: Vista en planta mesa de fundación.....	23
Figura 4: Vista en elevación mesa de fundación.....	23
Figura 5: Vista isométrica Generador y HP/IP casing.....	24
Figura 6: Vista en elevación Generador y HP/IP casing.....	25
Figura 7: Componentes del Generador.....	25
Figura 8: Componentes interiores y Estator.....	25
Figura 9: Vista isométrica Rotor.....	26
Figura 10: Vista en elevación Rotor.....	26
Figura 11: Constrains entre un descanso en pedestal (línea amarilla) y la losa superior.....	27
Figura 12: Modelación del comportamiento cinemático de un descanso en pedestal mediante Constrains.....	28
Figura 13: Vista isométrica de los apoyos del turbogenerador. Los elementos rectangulares en amarillo corresponden a los descansos en pedestal. En tanto los elementos resortes en verde, ubicados sobre cada descanso en pedestal, corresponden a los descansos hidrodinámicos.....	28
Figura 14: Vista en elevación de los descansos en pedestales (elementos rectangulares en verde).	29
Figura 15: Vista isométrica de los descansos hidrodinámicos (elementos en verde).....	29
Figura 16: Geometría completa del modelo de análisis construido en SAP2000.....	29
Figura 17: Disposición de los links a lo largo del rotor.....	30
Figura 18: Disposición de los links alrededor del estator.....	30
Figura 19: Propiedades dinámicas del link1, en unidades [tonf] y [m].....	31
Figura 20: Propiedades dinámicas del link2, en unidades [tonf] y [m].....	31
Figura 21: Propiedades dinámicas del link3, en unidades [tonf] y [m].....	32
Figura 22: Propiedades dinámicas del link4, en unidades [tonf] y [m].....	32
Figura 23: Propiedades dinámicas link5, en unidades [tonf] y [m].....	33
Figura 24: Propiedades dinámicas link6, en unidades [tonf] y [m].....	33
Figura 25: Propiedades dinámicas del link7, en unidades [tonf] y [m].....	34
Figura 26: Propiedades dinámicas del links estator, en unidades [tonf] y [m].....	34
Figura 27: Vista isométrica de los resortes asignados al modelo construido en SAP2000.....	35
Figura 28: División basal de la losa inferior de los modelos construidos para la asignación de rigidez por sector. $Re=0.3$; $Lf=37.65$ m; $Bf=14.5$ m.....	36
Figura 29: Carga de Relleno de suelo, expresada como masa en el modelo de análisis.....	37
Figura 30: Cargas operacionales del rotor del equipo turbo generador en unidades de [tonf].....	38
Figura 31: Carga del condensador del equipo turbo generador.....	39
Figura 32: Carga de Valveblock del equipo turbo generador.....	39
Figura 33: Carga de piping del equipo turbo generador.....	39
Figura 34: Espectro de diseño de aceleración norma NCh2369 actualizada.....	41
Figura 35: Registro sísmico de aceleración real, Mejillones 2005.....	42

Figura 36: Registro sísmico de aceleración real, Tocopilla 2007.	43
Figura 37: Registro sísmico de aceleración real, Iquique 2014.....	43
Figura 38: Comparación de espectros de aceleración utilizados en este estudio.	44
Figura 39: Modelo integrado construido en ANSYS apdl.	45
Figura 40: Ubicación de los puntos de control sobre el eje del rotor definidos en el modelo de análisis.	46
Figura 41: Período fundamental del modelo de análisis construido en SAP2000.	48
Figura 42: Período fundamental del modelo de análisis construido en ANSYS apdl.....	48

Índice de Tablas

Tabla 1: Cuadro resumen de los modelos construidos. M.E= Método modal espectral;	4
Tabla 2: Rigidez lateral total de la losa inferior de los modelos construidos.....	36
Tabla 3: Rigidez por sector en la base de los modelos construidos.	36
Tabla 4: Factores utilizados en el espectro de diseño de aceleración perteneciente a la norma chilena NCh2369 actualizada.	41
Tabla 5: Comparación de las propiedades dinámicas de rigidez, simétricas en SAP2000 y asimétricas en ANSYS, de los elementos links utilizados en ambos programas.	46
Tabla 6: Comparación de las propiedades dinámicas de amortiguamiento, simétricas en SAP2000 y asimétricas en ANSYS, de los elementos links utilizados en ambos programas.	46
Tabla 7: Límites admisibles de desplazamiento asignados por el fabricante del equipo a cada punto de control.	47
Tabla 8: Períodos considerados en el modelo SAP2000.....	49
Tabla 9: Períodos considerados en el modelo ANSYS apdl	50
Tabla 10: Período fundamental y masa modal efectiva de los modelos analizados en SAP2000 y ANSYS apdl.	50
Tabla 11: Tiempo de análisis de los modelos estudiados en este trabajo de título.	51
Tabla 12: Cantidad de elementos en el mallado de la mesa de fundación por cada modelo.....	52
Tabla 13: Comparación de los resultados de desplazamiento entre los modelos construidos en SAP2000, con respecto al mallado del modelo 1.	53
Tabla 14: Períodos y masas modales efectivas para los 3 primeros modos del modelo analizado, en los programas SAP2000 y ANSYS apdl.	54
Tabla 15: Comparación de los resultados de desplazamiento entre el programa de análisis ANSYS con respecto al programa SAP2000 (Caso 2).....	55
Tabla 16: Resultados de desplazamiento utilizando métodos modal espectral y tiempo-historia utilizando el programa SAP2000. La diferencia porcentual entre los métodos dinámicos modal espectral y tiempo-historia es con respecto al mayor resultado del método tiempo-historia.	57
Tabla 17: Comparación de las respuestas de desplazamiento con respecto al modelo con las propiedades dinámicas simétricas.	59

1. Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

En los proyectos de la industria estratégica, como aquellos que producen los recursos esenciales para la producción como es el caso de la generación eléctrica, se deben diseñar sus instalaciones con la mayor calidad y cumplimiento normativo, ya que la falla de sus estructuras y equipos, así como la paralización de su producción puede provocar importantes daños a otras industrias y a la población. Las centrales termoeléctricas pertenecen a la categoría C1, según la norma actualizada NCh2369 [3], e incluyen en el capítulo 14, equipos de gran complejidad, en particular calderas y turbogeneradores, equipos principales de la central de generación eléctrica. Estos equipos son comprados a fabricantes extranjeros reconocidos y se importan desde Asia, USA y Europa, por lo que es evidente que no está permitida la falla de componentes de estos equipos con el sismo de diseño. Por otra parte, en el caso del turbogenerador, los componentes rotatorios del equipo requieren una alta precisión en su fabricación y montaje, donde los desplazamientos operacionales, con y sin sismo, deben respetar límites admisibles, incluso llegando a magnitudes de décimas de milímetros. Por lo tanto es fundamental aplicar un modelo de análisis que permita obtener respuestas más precisas en la verificación del cumplimiento de los desplazamientos del rotor en toda su longitud.

El equipo turbogenerador utilizado en este trabajo consiste básicamente en una turbina con casing, descansos y rotor con álabes, un generador con casing-estator, rotor y descansos. La velocidad de rotación del rotor del turbogenerador de 3000 rpm se obtiene de la rotación de la turbina mediante presión de vapor, con el cual se produce en el generador, la conversión de energía mecánica a eléctrica. Los límites admisibles de desplazamiento del equipo en su conexión con la estructura de soporte y de la amplitud de vibración del rotor en los descansos y en los tramos de la turbina y el generador, son establecidos entre 100 a 200 micras, deformaciones que tienen menor orden de magnitud con respecto a los desplazamientos habituales que se permiten en las estructuras industriales y diseño civil, como por ejemplo un edificio de estructura industrial.

El equipo turbogenerador contiene descansos hidrodinámicos mediante aceite a presión para el soporte del rotor, los cuales tienen propiedades dinámicas de rigidez y amortiguamiento producto de la acción hidrodinámica del aceite en compresión, cuya función es mantener flotando al rotor. Estas propiedades de los descansos se especifican por parte del fabricante para la elaboración de los modelos en planos transversales YZ a través del eje longitudinal X del rotor mediante matrices asimétricas, lo que causa una complicación en el análisis dinámico tradicional que se aplica a las estructuras civiles, ya que las matrices que se utilizan en estructuras son simétricas y permiten el desacoplamiento de las ecuaciones dinámicas por cada grado de libertad.

Las normas chilenas estructurales, en particular la norma NCh2369. Of2003, no abordan con claridad el análisis de interacción suelo-estructura-equipos y sólo exigen para el equipo, el diseño de una estructura de soporte y fundación a partir de cargas de reacciones en el sistema de anclaje (estáticas, dinámicas, sísmicas) que suministra el fabricante del equipo. Además el fabricante establece para esa estructura de soporte, algunos límites operacionales de deformación, para los cuales el fabricante del equipo mantiene la garantía de operación de su suministro.

Esto se debe a que la gran mayoría de los proyectos que se desarrollan en Chile están enfocados en el área inmobiliaria y minera, en donde usualmente se aplican simplificaciones respecto a las interacciones estructura-equipo, ya que se considera que los equipos no tienen una importancia significativa en la respuesta.

De lo anterior, difícilmente se puede revisar el comportamiento operacional y sísmico del equipo, sin que se pueda contar con los antecedentes detallados de geometría y propiedades de sus componentes estructurales y mecánicos. Los nuevos métodos de análisis establecidos por el capítulo 14 de la nueva norma actualizada, principalmente para turbogenerador y caldera, establecen la exigencia de entrega de los antecedentes necesarios del equipo y sus componentes, para revisión sísmica o modelo de diseño operacional y sísmico.

El objetivo principal de este trabajo de título consiste en analizar de la forma más precisa, el comportamiento de un turbogenerador montado sobre una gran mesa de fundación. Esta investigación realiza un análisis de sensibilidad de los factores que podrían influir en una mejor respuesta, como es el caso de las propiedades dinámicas de los descansos (uso de dos softwares, SAP2000 y ANSYS apdl.), diferentes mallados del modelo de la estructura de soporte y distintos métodos de análisis sísmicos (Modal espectral y Tiempo-Historia).

El procedimiento para desarrollar los puntos de interés de esta investigación considera la completa utilización de la norma NCh2369 actualizada, con el fin de aplicar los requisitos y características mencionadas respecto a la construcción del modelo integrado de turbo generador. La construcción del modelo se efectúa en base a los documentos de un proyecto construido, considerando informaciones de condiciones de sitio, estructura y equipo, tanto planos como criterios de diseño.

La primera etapa de la investigación consiste en analizar la sensibilidad de mallado del “Modelo Integrado de Análisis Turbo Generador” (MIATG) mediante la construcción de tres modelos en SAP2000, pero con distinto mallado de la mesa de fundación.

En una segunda etapa, se analiza la influencia de las propiedades dinámicas del equipo turbogenerador en el MIATG a través de la construcción de dos modelos con distintas propiedades dinámicas de los descansos del rotor, ambos desarrollados con el software de modelación ANSYS apdl.

Todos los modelos mencionados anteriormente para la primera y segunda etapa de estudio, son analizados mediante dos métodos de análisis dinámico, superposición modal espectral y análisis tiempo-historia, para comparar sus respuestas en unos puntos de control ubicados en el eje del rotor, en los descansos y tramos del rotor.

El resultado de esta investigación es de utilidad para proyectos similares, en donde se podrá responder a las interrogantes de qué eficacia tendría la aplicación de la norma NCh2369 actualizada, qué efecto produciría el modificar las propiedades dinámicas de los descansos del rotor de un equipo turbogenerador, cuál sería la diferencia entre los resultados aplicando método de superposición modal espectral y método tiempo-historia, teniendo en cuenta el balance precisión v/s rapidez de análisis. Con respecto a la última pregunta, es importante entregar una opinión respecto a si el método modal espectral es adecuado para el análisis de equipos turbogeneradores con componentes rotatorios y límites admisibles de deformación exigentes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

- Analizar un modelo integrado de turbogenerador de una central termoeléctrica bajo los requisitos de la norma NCh2369 actualizada.
- Comparar los métodos de análisis establecidos en la norma y en base a los resultados, proponer/recomendar el método de análisis dinámico más adecuado para el diseño de las estructuras de soporte, verificación del equipo y sus componentes rotatorios internos de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar y aplicar el capítulo 14 de la nueva actualización de la norma NCh2369.
- Desarrollar un modelo integrado suelo-estructura-equipo-componentes interiores del equipo, considerando las propiedades relevantes en el análisis estructural, es decir, masa, rigidez y amortiguamiento.
- Estudiar la modelación de rigidez y amortiguamiento de los descansos del rotor considerados en el modelo integrado y verificar con el programa de análisis seleccionado, la incidencia que tiene en el análisis sísmico la incorporación de las propiedades dinámicas de los descansos, de acuerdo a la información del fabricante del equipo. Las propiedades dinámicas de los descansos del rotor que se utilizan corresponde a un único estado de operación, es decir, velocidad, desbalanceo y diferencia entre la expansión térmica del rotor y estator específica. Para esta condición de operación se considera la sollicitación sísmica.
- Comparar los resultados del análisis sísmico entre el modelo espectral y el método tiempo-historia, ya sea modal o de integración directa utilizando registros reales. Los resultados de interés evaluados corresponden a los puntos de control definidos para la verificación del equipo, que controlan los límites admisibles de desplazamiento del rotor del turbogenerador y que aseguran la integridad de los componentes mecánicos y la continuidad operacional de la Central.

1.3 Metodología

El proceso de investigación y desarrollo de los objetivos propuestos en esta memoria se dividen en fases, las cuales son descritas a continuación:

a) Norma NCh2369 actualizada.

Inicialmente se estudia la nueva actualización de la norma NCh2369, en particular el capítulo 14 referente a las centrales de generación eléctrica y al subcapítulo de equipos turbogeneradores, en el cual se establecen requisitos para realizar un modelo integrado. Esto permite tener en consideración la información necesaria del suelo, estructura y equipos para poder conformar el modelo.

b) Modelo integrado de turbogenerador.

En esta fase se procede a la construcción del modelo computacional del turbo generador con su mesa de fundación y suelo. Una buena parte de los antecedentes correspondientes a los equipos son obtenidos de la base de datos de PMI¹, en forma directa al modelo, ya sea planos asociados a la geometría del turbo generador y su mesa de fundación, tipos de cargas y su localización, además de estudios de suelos correspondientes a la ubicación del proyecto. Durante la construcción del modelo, se consideran los distintos factores que se miden en la investigación, variación del nivel de mallado y modificación de las propiedades dinámicas de los descansos del rotor del equipo. Esto implica la construcción de varios modelos, variando las propiedades mencionadas anteriormente.

Adicional a lo anterior, se utilizan dos programas computacionales para analizar los modelos, SAP 2000 v.19 y ANSYS apdl. El fundamento a esta decisión radica en que con ANSYS apdl, se puede analizar el modelo con las propiedades dinámicas de los descansos del rotor entregadas por el fabricante del equipo (matriz de propiedades asimétricas), condición que no permite el SAP2000. La cantidad total de modelos son seis, los cuales cuatro se analizan utilizando SAP2000 v.19 y los dos restantes en ANSYS apdl.

A continuación se expone un cuadro resumen de los modelos construidos para los análisis comparativos que se realizan en este trabajo de título. Los modelos de análisis se definen por el programa utilizado en su construcción, tipo de mallado, simetría de las propiedades dinámicas de los descansos del rotor y método de análisis dinámico que se aplica.

*Tabla 1: Cuadro resumen de los modelos construidos. M.E= Método modal espectral;
T-H= Método Tiempo-Historia*

Programa	Mallado	Simetría propiedades descansos del rotor	Método dinámico
SAP2000	M-1	SI	M.E
SAP2000	M-2	SI	M.E
SAP2000	M-3	SI	M.E; T-H
ANSYS	M-3	SI	M.E; T-H
ANSYS	M-3	NO	T-H

¹ PMI: empresa colaboradora en el trabajo de título

c) Análisis del modelo integrado de turbogenerador.

Los análisis son definidos a partir de las indicaciones y sugerencias provenientes de normas nacionales e internacionales. Las normas nacionales corresponden a la NCh2369.Of2003 [1], NCh2369 actualizada [3] y NCh433.Of1996, mod 2012 [9], en tanto la norma internacional corresponde a la ASCE/SEI 7-10 [2].

En particular, la norma internacional se escoge dado los criterios de diseño que presentaba el proyecto de la central termoeléctrica en la base de datos de PMI. En todo caso, el análisis a seguir en este trabajo de título aplica la norma NCh2369 actualizada.

En el análisis, se aplica al modelo computacional, algunas cargas estáticas por condición de carga operacional en el método de análisis dinámico, que se considera modal espectral con el espectro sísmico de diseño del capítulo 14 de la NCh2369 actualizada y análisis tiempo-historia utilizando registros reales. Cabe hacer notar que este último método tiempo-historia, sólo es permitido por el capítulo 14 para casos especiales de verificación y con la aprobación del revisor sísmico, que puede corresponder al caso de verificación de deformaciones del rotor de un turbogenerador.

La secuencia de ejecución de los análisis es la siguiente:

- Los tres modelos de análisis en SAP2000 son utilizados para el análisis comparativo de sus respuestas en los puntos definidos de control de deformaciones del rotor, por el fabricante del equipo. Con ello se puede concluir respecto a la variación del mallado en la estructura de soporte del modelo y la respuesta de los desplazamientos en los puntos de control del rotor, determinando la sensibilidad del mallado en los resultados del modelo integrado de turbogenerador.
- Se escoge uno de los tres modelos construidos para extraer su información contenida en los archivos de SAP2000 y se utiliza para construir dos modelos en el programa ANSYS apdl., un modelo considerando las propiedades dinámicas simétricas de los descansos y otro modelo con las propiedades dinámicas asimétricas de los descansos entregadas por el fabricante del equipo. Luego, los dos modelos en ANSYS son analizados, mediante el método tiempo-historia, para comparar sus respuestas y concluir respecto a la incidencia que tiene el cambio de las propiedades dinámicas de los descansos del equipo turbogenerador en las respuestas de desplazamiento obtenidas en los puntos de control del rotor.

Adicionalmente, se compara el mismo modelo en programas SAP2000 y ANSYS apdl. para concluir respecto a la incidencia de utilizar un software distinto al tradicional que se utiliza en Chile en el diseño sísmico de estructuras como lo es SAP2000.

d) Conclusión y comentarios del estudio.

Finalmente a partir de los resultados obtenidos en la etapa de análisis comparativo, se concluye respecto al comportamiento de un modelo integrado de turbogenerador bajo los criterios de análisis impuestos por la norma NCh2369 actualizada. Las conclusiones consideran la diferencia entre las respuestas de los distintos modelos para los siguientes Casos de análisis comparativo:

- Caso 1: Modelos integrados con distinto mallado en la estructura de soporte, utilizando sólo SAP2000 (Modal Espectral).
- Caso 2: Modelos integrados con propiedades dinámicas simétricas de los descansos del rotor del equipo, utilizando SAP2000 y ANSYS apdl (Modal Espectral).
- Caso 3: Modelos integrados con propiedades dinámicas simétricas de los descansos del rotor del equipo, utilizando sólo SAP2000 (Modal Espectral y Tiempo-Historia).
- Caso 4: Modelos integrados con diferentes propiedades dinámicas de los descansos del rotor del equipo, utilizando sólo ANSYS apdl (Tiempo-Historia).

Por otro lado, se comenta respecto a la eficiencia de los métodos dinámicos de análisis propuestos por la norma NCh2369 actualizada, considerando el tiempo de análisis invertido.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Contextualización

Las inversiones en generación eléctrica corresponden al segundo sector más importante en el país, después de la gran minería, que corresponde a un sector de la economía con un alto consumo de energía eléctrica base. La industria de la gran minería, como lo es la producción de cobre, requiere un suministro eléctrico en base y continuo durante todo el año y las 24 horas del día. Por lo tanto la operación de las centrales generadoras deben cumplir con normativas técnicas nacionales de calidad del suministro eléctrico, que garantice la continuidad operacional de los equipos y estructuras que conforman una central de generación eléctrica, incluso para las condiciones de sismos de servicio y sismos de diseño que se establecen en la nueva norma NCh2369.

Por lo tanto se requiere de un análisis efectivo, preciso y seguro que garantice estos requisitos, sin embargo aún no se ha definido claramente el procedimiento en Chile. Es por ello que la actualización de la norma NCh2369 tiene como principal función regular e imponer las condiciones necesarias para estos modelos de análisis sísmico, como por ejemplo la utilización de un modelo integrado para el diseño de equipos principales de centrales de generación eléctrica. También se establece que para el caso de una central de generación eléctrica sometida al sismo de servicio, el desempeño de las estructuras y equipos es de “no daño” y total continuidad operacional sin parada de planta ni degeneración eléctrica.

Generalmente, los elementos secundarios y equipos vinculados a las estructuras de soporte se modelan, ya sea por cargas/masas puntuales o distribuidas, o bien omitiéndolas del modelo de análisis. No obstante en este trabajo de título, el equipo principal seleccionado para el estudio, el turbo generador, presenta exigentes requisitos operacionales, por parte del fabricante, en sus desplazamientos, amplitud de vibración y esfuerzos admisibles. De este modo el capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada establece requisitos para el estudio del comportamiento suelo-estructura-equipos, y por ende el modelo de análisis de operación con sismo debe incluir lo anteriormente indicado, y además, detalles de los componentes del equipo principal, en particular, los del tipo rotario.

Las especificaciones que entrega el fabricante del turbogenerador para el diseño de la estructura de soporte del equipo en las condiciones locales de suelo, sismo y otros, de su cumplimiento depende que el fabricante del equipo mantenga sus garantías. Estas especificaciones se refieren, por ejemplo, a requisitos dinámicos de vibración, velocidad máxima en la losa superior de anclaje del equipo y límites de amplitudes de deformación, tanto vertical como rotacional, en los puntos donde se ubican los pedestales de apoyo del equipo. Sin embargo uno de los requisitos más críticos corresponde a los límites de desplazamiento del rotor para distintas condiciones de operación, con y sin sismo. El rotor es un componente mecánico que se encuentra soportado, flotando en un aceite a presión. Este líquido actúa como intermediario y evita que el rotor en operación choque/roce con los descansos, los cuales son elementos de apoyo dispuestos a través del eje longitudinal del rotor. Además estos descansos y el líquido a presión permiten que el rotor opere flotando, fijando en su longitud, su desplazamiento en puntos de su eje longitudinal. Estos puntos de apoyo de los descansos del rotor actúan como elementos con propiedades de rigidez y amortiguamiento que sólo se pueden analizar mediante un modelo integrado que incorpora las propiedades del descanso con aceite a presión, cuerpo del equipo, sistema de anclaje, estructura de soporte y la interacción suelo-estructura.

Por otra parte, dada la condición de alta sismicidad del país, la exigencia de calidad del suministro eléctrico de la normativa técnica, el capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada, establece un sismo de diseño y un sismo de servicio. El sismo de servicio corresponde a un nivel de sollicitación sísmica para el cual el equipo tiene deformaciones máximas tales que no debe parar su operación, y los componentes mecánicos y estructuras no tienen daños que requieran reparación. El sismo de diseño corresponde a un nivel de sollicitación sísmica para el cual el equipo o estructura ha sido diseñado, en el caso del equipo, no puede tener daño que requiera reparación, es decir, debe mantener un comportamiento elástico, y en el caso de estructuras, se permiten un grado de daño pero que debe poder repararse en 2 a 4 semanas, de manera de dar continuidad operacional al equipo y cumplir con la normativa. Es por ello que la norma sísmica chilena exige un análisis dinámico mediante el método de superposición modal espectral, utilizando un espectro de aceleración definido por norma, que garantice la seguridad de la estructura y los equipos. Además establece para casos especiales de verificación, el método de análisis tiempo-historia lineal o no lineal, utilizando registros sísmicos representativos de la zona.

Para el método de análisis de superposición modal espectral de la norma, el problema que podría surgir en un modelo integrado con el rotor de un turbo generador es que las respuestas del modelo sean conservadoras y sobrepasen los límites establecidos por el fabricante para el rotor de su equipo. Esto implicaría que al aplicar este método de análisis dinámico a un modelo integrado que incluye el equipo y sus componentes, las respuestas cinemáticas de los componentes del equipo (rotor) también podrían ser conservadoras, es decir, se entregarían deformaciones mayores a las “reales”, que podría provocar una dificultad para cumplir con los límites admisibles entregados por el fabricante del equipo.

Por otro lado, el método tiempo-historia corresponde a un análisis con mayor precisión en los resultados de deformación, que entrega una respuesta discretizada a través del tiempo y más cercana a la “real”, en comparación al método modal espectral. Sin embargo esto no implica que el método tiempo-historia deba ser ocupado siempre, el capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada establece limitaciones a su uso, además que su aplicación depende de factores como los costos económicos y de la importancia del equipo y su estructura. En este trabajo de título, sólo se realiza una constatación de los resultados entre los dos métodos de análisis sísmico operacional para el caso en estudio.

Debido a lo anterior, la investigación del modelo integrado de turbogenerador incluye la aplicación de ambos métodos, modal espectral y tiempo-historia, con el fin de comparar sus respuestas y concluir respecto a la diferencia de respuesta que se espera obtener.

1.4.2 Método de Superposición Modal Espectral

La ecuación de equilibrio dinámico de una estructura, extraída en la teoría del libro de CHOPRA [4], es:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{r\}\{\ddot{u}_g\}$$

Se modifica la expresión anterior para poder desacoplar las ecuaciones a partir de las frecuencias y formas modales:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N \phi_i y_i(t) \quad \text{con} \quad \left[[K] - \omega_i^2 [M] \right] \{\phi_i\} = \{0\}$$

Al reemplazar lo anterior y expresando la ecuación para cada forma modal $\{\phi_i\}$:

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} \ddot{y}_i(t) + \{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\} \dot{y}_i(t) + \{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\} y_i(t) = -\{\phi_i\}^T [M] \{r\} \ddot{u}_g(t)$$

Luego, los productos de las matrices se reemplazan por las siguientes expresiones para cada $i=1 \dots N$:

$$M_i = \{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}$$

$$C_i = \{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}$$

$$K_i = \{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\}$$

$$L_i = \{\phi_i\}^T [M] \{r\}$$

Obteniendo:

$$M_i \ddot{y}_i(t) + C_i \dot{y}_i(t) + K_i y_i(t) = -L_i \ddot{u}_g(t)$$

Se asume que la matriz de amortiguamiento modal es definida a partir de las matrices de masa y rigidez, presentando sólo elementos en su diagonal, expresados por:

$$C_i = 2M_i \omega_i \beta_i$$

Finalmente utilizando un espectro de aceleración para obtener $S_a(T)$ en función del período, se obtienen las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración máximas para cada grado de libertad de la estructura:

$$x_{i_{MAX}} = \{\Phi_i\} \frac{L_i S_a(T_i)}{M_i \omega_i^2}$$

$$\dot{x}_{i_{MAX}} = \{\Phi_i\} \frac{L_i S_a(T_i)}{M_i \omega_i}$$

$$\ddot{x}_{i_{MAX}} = \{\Phi_i\} \frac{L_i S_a(T_i)}{M_i}$$

$[M]$ = Matriz de masa

$[K]$ = Matriz de rigidez

$[C]$ = Matriz de amortiguamiento

$\{\ddot{x}(t)\}$ = Vector de aceleraciones

$\{\dot{x}(t)\}$ = Vector de velocidades

$\{x(t)\}$ = Vector de desplazamientos

$\{r\}$ = Vector de influencia

$\{\ddot{u}_g\}$ = Aceleración de la base

$\{\Phi_i\}$ = Vector del modo i

\ddot{y}_i = Coordenada modal de aceleración del modo i

\dot{y}_i = Coordenada modal de velocidad del modo i

y_i = Coordenada modal de desplazamiento del modo i

ω_i = Frecuencia del modo i

T_i = Período del modo i

L_i = Factor de participación modal del modo i

β_i = Razón de amortiguamiento del modo i

$S_a(T_i)$ = Aceleración en función del período del modo i

Los esfuerzos y deformaciones sísmicas se deben calcular superponiendo los valores máximos modales por el método de la *Superposición Cuadrática Completa* detallado en la norma chilena NCh2369. Of2003 [1], expresada a continuación:

$$S = \sqrt{\sum_i \sum_j C_{ij} S_i S_j}$$

$$C_{ij} = \frac{8\beta^2 r^{1.5}}{(1+r)(1-r)^2 + 4\beta^2 r(1+r)}$$

$$r = \frac{T_i}{T_j}$$

S = *Combinación modal*

S_i, S_j = *Valores máximos de las contribuciones de los modos i y j*

C_{ij} = *Coeficiente de acoplamiento entre los modos i y j*

β = *Razón de amortiguamiento*

T_i, T_j = *Período de los modos i y j*

1.4.3 Método Tiempo-Historia

Considerando la ecuación de equilibrio dinámico de una estructura presentada en el método anterior, se realiza el mismo procedimiento, obteniendo para cada modo $i=1 \dots N$:

$$M_i \ddot{y}_i(t) + C_i \dot{y}_i(t) + K_i y_i(t) = -L_i \ddot{u}_g(t)$$

Para resolver esta ecuación, se debe definir la matriz de amortiguamiento.

El primer caso es asumiendo que la matriz está definida por una combinación de las matrices de masa y rigidez, tal cual se asumió en el método anterior. Con ello se tiene la siguiente expresión:

$$\ddot{y}_i(t) + 2\omega_i \beta_i \dot{y}_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = \frac{-L_i \ddot{u}_g(t)}{M_i}$$

Luego se procede a la resolución de esta ecuación mediante integración directa, utilizando el método de Newmark de aceleración promedio para sistemas lineales, obteniendo $y_i(t), \dot{y}_i(t), \ddot{y}_i(t)$.

La respuesta final del sistema en función del tiempo:

$$\{x(t)\} = \sum y_i(t) \{\phi_i\}$$

$$\{\dot{x}(t)\} = \sum \dot{y}_i(t) \{\phi_i\}$$

$$\{\ddot{x}(t)\} = \sum \ddot{y}_i(t) \{\phi_i\}$$

El segundo caso corresponde a utilizar una matriz de amortiguamiento real, proveniente de la información experimental. La dificultad que surge en el análisis consiste en que la ecuación de equilibrio dinámico ya no se puede desacoplar, ya que la matriz presenta elementos fuera de su diagonal, por ende se debe resolver con la matriz entera por integración directa y esto implica mayor gasto computacional y tiempo invertido. Este caso se estudia cuando se analice la respuesta del modelo con las propiedades dinámicas asimétricas del equipo.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{r\}\{\ddot{u}_g\}$$

El método de Newmark de aceleración promedio permite la resolución de la ecuación diferencial que controla la respuesta de la estructura. El procedimiento consiste en discretizar, en pasos pequeños, el tiempo total que se requiere analizar. De esta forma, se resuelve la ecuación para un instante en particular y con este resultado se resuelve el siguiente paso [4]. El algoritmo que se utiliza se describe a continuación:

1.0 El paso de integración Δt debe cumplir que $\frac{\Delta t}{T_n} < 0.551$, donde T_n es el período fundamental de la estructura. Más aún, la teoría sugiere un paso de integración $\Delta t = 0.01T_n$ y $\Delta t = 0.02$ para describir numéricamente las aceleraciones basales altamente irregulares producto de un terremoto. Sin embargo, cada registro sísmico de aceleración utilizado en esta memoria considera pasos de tiempo “Dt” entre 0.005 [s] y 0.01 [s] (**Figura 1**), los cuales se utilizan además como paso de integración ya que cumplen con la sugerencia descrita.

2.0 Cálculos iniciales

$$2.1 \quad (q_n)_0 = \frac{\phi_n^T m u_0}{\phi_n^T m \phi_n} \quad ; \quad (\dot{q}_n)_0 = \frac{\phi_n^T m \dot{u}_0}{\phi_n^T m \phi_n}$$

$$q_0^T = \langle (q_1)_0, \dots, (q_J)_0 \rangle \quad ; \quad \dot{q}_0^T = \langle (\dot{q}_1)_0, \dots, (\dot{q}_J)_0 \rangle$$

$$2.2 \quad P_0 = \Phi^T p_0$$

$$2.3 \quad \text{Resolver: } M\ddot{q}_0 = P_0 - C\dot{q}_0 - Kq_0 \Rightarrow \ddot{q}_0$$

2.4 *Seleccionar Δt*

$$2.5 \quad \hat{K} = K + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M$$

$$2.6 \quad a = \frac{1}{\beta\Delta t} M + \frac{\gamma}{\beta} C \quad ; \quad b = \frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C$$

3.0 Cálculos para cada paso de tiempo i

$$3.1 \quad P_i = \Phi^T p_i$$

$$3.2 \quad \Delta\hat{P} = \Delta P_i + a\dot{q}_i + b\ddot{q}_i$$

$$3.3 \quad \text{Resolver: } \hat{K}\Delta q_i = \Delta\hat{P}_i \Rightarrow \Delta q_i$$

$$3.4 \quad \Delta\dot{q}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \Delta q_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{q}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{q}_i$$

$$3.5 \quad \Delta\ddot{q}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \Delta q_i - \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{q}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{q}_i$$

$$3.6 \quad q_{i+1} = q_i + \Delta q_i \quad ; \quad \dot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + \Delta\dot{q}_i \quad ; \quad \ddot{q}_{i+1} = \ddot{q}_i + \Delta\ddot{q}_i$$

$$3.7 \quad u_{i+1} = \Phi q_{i+1}$$

4.0 Se repite el mismo procedimiento para los próximos pasos de tiempo, es decir, se reemplaza los valores obtenidos en el paso i al paso i+1. El punto 1.0 y 2.0 se mantiene constante, por ende sólo se debe reemplazar en el punto 3.0.

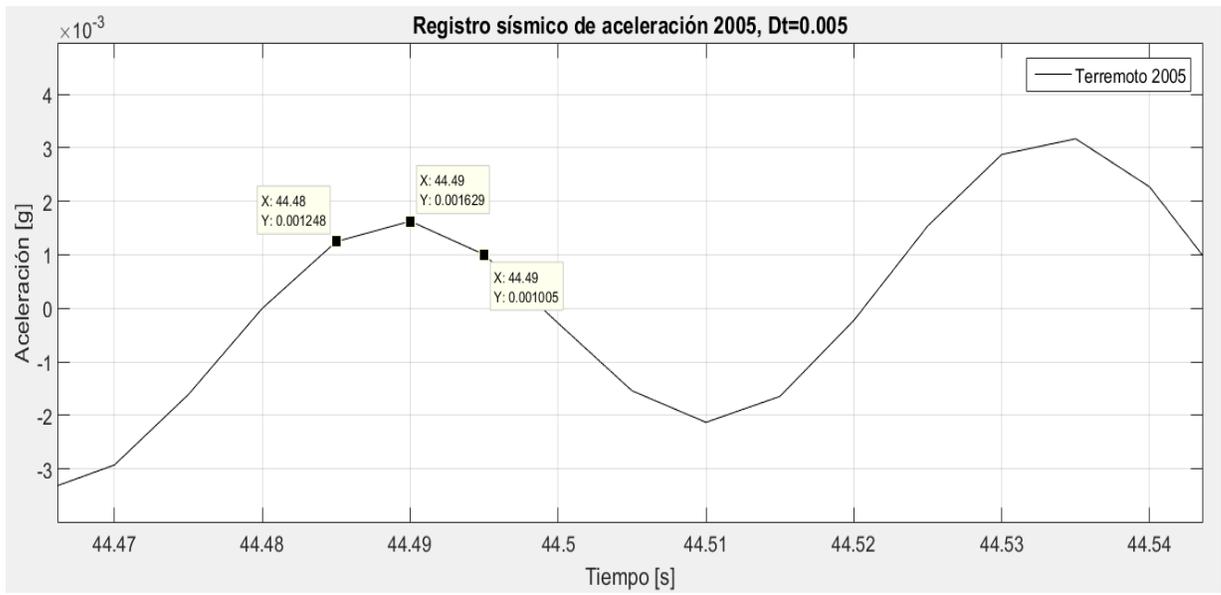


Figura 1: Paso de tiempo Dt del registro sísmico de aceleración 2005 utilizado en el método de análisis tiempo-historia.

2. Capítulo 2: Revisión de normas y estado actual

Este capítulo abarca todo lo mencionado en las normas involucradas en esta investigación, ya sean nacionales o internacionales, respecto al modelamiento de un equipo turbo generador. Se detalla el contenido utilizando el mismo orden y numeración de la fuente, presentando la información para cada norma. No se mencionan detalles acerca del procedimiento en el análisis sísmico, ya sea fórmulas, clasificación y factores utilizados, ya que no representa algo nuevo en que enfatizar.

2.1 Norma NCh2369. Of2003

A continuación se extrae lo mencionado por la norma chilena *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales* [1]. Es necesario anticipar que esta norma, la cual está vigente hasta la fecha, no considera en su alcance a proyectos de centrales de energía. Sin embargo se menciona su contenido ya que la norma chilena NCh2369, actualizada en revisión, utiliza la información de esta versión.

1 Alcance y campo de aplicación

1.1 Esta norma establece los requisitos para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, ya sean livianas o pesadas. Se aplica, tanto a las estructuras propiamente tales, como a los sistemas de ductos y cañerías y a los equipos de proceso, mecánicos y eléctricos y a sus anclajes. También se aplica a las estructuras de bodegas o recintos de vocación industrial, y a las construcciones estructuradas con columnas en voladizo.

1.2 Esta norma no se aplica a otros tipos de estructuras tales como centrales nucleares, centrales de energía eléctrica y líneas de transmisión, presas, tranques de relaves, puentes, túneles, muelles gravitacionales, muros de contención, líneas de ductos enterradas, etc.

5 Análisis sísmico

5.3 Análisis elástico estático

5.3.1 Modelo matemático de la estructura

5.3.1.5 En estructuras que soportan equipos que tengan influencia en su respuesta, el modelo matemático debe considerar el conjunto equipo-estructura

7 Elementos secundarios y equipos montados sobre estructuras

7.1 Alcance

Se define como elementos secundarios a los tabiques y otros apéndices adheridos a la estructura resistente pero que no forman parte de ella. Los equipos anclados en varios niveles de la estructura deben satisfacer lo dispuesto en 11.3.2.

11 Estructuras específicas

11.11 Equipos eléctricos

11.11.1 Las disposiciones de la presente norma son aplicables a los aspectos estructurales de los equipos eléctricos ubicados en el interior de las plantas industriales. No se aplican a los equipos de generación y transmisión ni a las subestaciones principales, los que se deben regir por especificaciones especiales

Anexo C

C.5 Análisis sísmico

C.5.3. Análisis elástico estático

C.5.3.1.4 Cuando los equipos soportados en una estructura poseen características de rigidez o de inercia que pueden determinar local o globalmente la respuesta de la estructura, es preciso incluir en el modelo elementos representativos del equipo, vinculados a la estructura del modo como el equipo lo estará, y dotados de características de rigidez y masa correspondientes a las del equipo real. Es el caso, por ejemplo, de los ductos de gran diámetro que se fijan a varios niveles de la estructura, o de recipientes de grandes dimensiones que se apoyan en varios marcos y/o niveles de la estructura. Del mismo modo, cuando se desea capturar la respuesta de un determinado equipo soportado por la estructura, aunque su inercia traslacional y rotacional sean pequeñas frente a las del nivel en que se ubica, se debe incluir en el modelo elementos y masas representativos del equipo, vinculados a la estructura del mismo modo lo estará el equipo.

C.11 Estructuras específicas

C.11.11 Equipos eléctricos

C.11.11.1 Los equipos eléctricos son esenciales en una industria, debido a la necesidad de contar con energía y comunicaciones después del terremoto. Para el diseño sísmico existen especificaciones especiales o bien normas internacionales, de uso aceptado y comprobado, que exceden el alcance de esta norma.

C.11.11.2 La norma de ENDESA define como equipos robustos a aquellos en los cuales, por su función, son diseñados para sollicitaciones bastante mayores que las sísmicas y que no tienen componentes frágiles, y como equipos rígidos a los que tienen una frecuencia fundamental de 30 Hz o más. Ejemplos típicos son los generadores, motores, válvulas, bombas y similares.

A partir de la información anterior, extraída de la norma NCh2369. Of2003, se establecen los requisitos y definiciones necesarias para considerar el equipo como parte del modelo estructural. Sin embargo el alcance de la norma no considera proyectos con turbogeneradores, no obstante en la norma NCh2369 actualizada si lo considera, información presentada en el punto **2.3.1**.

2.2 ASCE 7-10

A continuación se extrae lo mencionado por la norma internacional *American Society of Civil Engineers Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* [2]. Se recuerda que esta norma internacional estaba incluida en los criterios de diseño que presentaba el proyecto de la central termoeléctrica en base de datos de PMI, por lo que se considera un aporte en cuanto a la información que sugiere esta norma. No obstante, se utiliza la norma NCh2369 actualizada.

Chapter 11: SEISMIC DESIGN CRITERIA

11.2 DEFINITIONS

NONBUILDING STRUCTURE SIMILAR TO A BUILDING: A nonbuilding structure that is designed and constructed in a manner similar to buildings, will respond to strong ground motion in a fashion similar to buildings, and has a basic lateral and vertical seismic force-resisting system conforming to one of the types indicated in Tables 12.2-1 or 15.4-1.

Chapter 15: SEISMIC DESIGN REQUIREMENTS FOR NONBUILDING STRUCTURES

15.1 GENERAL

15.1.1 Nonbuilding Structures

Nonbuilding structures include all self-supporting structures that carry gravity loads and that may be required to resist the effects of earthquake.

15.5 NONBUILDING STRUCTURES SIMILAR TO BUILDINGS

15.5.4 Electrical Power Generating Facilities

15.5.5.1 General

Electrical power generating facilities are power plants that generate electricity by steam turbines, combustion turbines, diesel generators, or similar turbo machinery.

La información mencionada define el tipo de elemento secundario según sus características, tanto en su función como en su composición estructural, y guía al lector a seguir un procedimiento de análisis según la clasificación del elemento. Sin embargo, la norma no es clara respecto al modelamiento de equipos turbogeneradores, ya que deja la decisión en manos del ingeniero de proyecto, de incluir o no el equipo en el modelo. Esto es considerablemente riesgoso considerando las características sísmicas del país, ya que el ingeniero de proyecto podría decidir en base a características similares de proyectos anteriores, sin importar las características propias del suelo nacional. Es por ello que se requiere de un profesional nativo que sepa las dificultades en el diseño estructural del país. Además la norma sólo da consejos respecto a la fuerza de diseño que debe soportar el equipo, no mencionando el tipo de anclaje que debe tener, la deformación admisible, entre otras características.

2.3 Estado actual en Chile

Actualmente en Chile no existe un procedimiento para modelar estructuras con equipos turbo generadores, más aún, el alcance de la norma chilena NCh2369 vigente, que regula la totalidad de los diseños estructurales en el país, no considera proyectos de centrales energéticas. Esto implica la necesidad de utilizar otras normas internacionales, las cuales han sido aplicadas en proyectos similares diseñados en otros países. Sin embargo estas normas internacionales no solucionan el problema fácilmente, dejando en algunos casos la decisión en manos del ingeniero a cargo del proyecto.

Los proyectos de centrales energéticas son importantes para el país, sobretodo en el área minera ya que se utilizan bastante. Por lo tanto necesitan un procedimiento y regulación estructural nacional que garantice su seguridad y continuidad operacional. Los métodos alternativos que se han aplicados en situaciones similares han sido: la omisión del equipo, cuando este no es importante; la transformación del equipo en fuerzas puntuales o distribuidas; la asignación de masas puntuales o distribuidas según el criterio del ingeniero a cargo. En ninguno de estos métodos se considera las propiedades dinámicas del equipo, rigidez y amortiguamiento.

En base a todo lo anterior, un grupo de ingenieros expertos en el área sísmica estructural estuvieron a cargo de actualizar la norma NCh2369 para incluir en su alcance diseños estructurales complejos como lo son proyectos de centrales energéticas. Esta actualización se encuentra en fase de revisión desde el año 2017.

La información que se menciona a continuación, extraída del documento actualizado en revisión [3], se enfoca en los requisitos que se deben cumplir para modelar equipos turbogeneradores junto con su mesa de fundación. La información se detalla con el mismo formato y enumerado de la fuente.

2.3.1 Extractos de la norma NCh2369 actualizada

14.11.1 Turbo Generador y su Fundación

El requisito principal corresponde al desarrollo de un modelo integrado que incluya equipo, fundación, e interacción suelo estructura. El nivel de sofisticación de este modelo matemático deberá ser suficiente para verificar satisfactoriamente las condiciones mínimas de operación normal y de emergencia, incluyendo continuidad de operación para sismo de servicio y no-daño para sismo de diseño.

14.11.1.1 Se considera los casos de turbogeneradores de frecuente uso en proyectos de centrales termoeléctricas, de acuerdo a la tecnología del proceso de generación:

- a) Turbogenerador a vapor (STG), presente en centrales convencionales a carbón (CTC), de ciclo combinado (CTCC), y termo solares con concentrador central o distribuidos.
- b) Turbogenerador a combustión (CTG), presente en centrales de ciclo abierto (CTCA) y también de ciclo combinado (CTCC).

14.11.1.2 Modelación Computacional

14.11.1.2.1 Para el análisis y diseño sísmico de la fundación, y para la verificación de las condiciones de operación normal y condiciones de operación eventual del equipo, se debe desarrollar un Modelo Integrado de Análisis del Turbo Generador (MIATG), que considere los equipos con sus componentes mecánicos y eléctricos interiores y exteriores más relevantes, el sistema de anclaje y la estructura de fundación incluyendo la interacción suelo-estructura.

El modelo de análisis MIATG debe permitir realizar las siguientes verificaciones:

-Análisis de Interacción entre el equipo, la fundación, y el suelo para chequeo de posible resonancia en la frecuencia de operación.

-Cumplimiento de los criterios de diseño establecidos por el fabricante respecto a la amplitud máxima de vibración de la fundación del equipo (soportes).

-Cumplimiento de los criterios de diseño del fabricante respecto a deformaciones admisibles del rotor para sismo de nivel de servicio y sismo de nivel de diseño (holguras).

14.11.1.2.3 El MIATG se debe representar a lo menos la carcasa del equipo, el rotor, los descansos de soporte del rotor y los soportes sísmicos interiores del generador. En el caso de las propiedades dinámicas de los descansos, se debe considerar variaciones de acuerdo a las condiciones de operación del equipo, las que deben contar con la aprobación del Revisor Sísmico.

14.11.1.2.7 Para considerar la interacción suelo-estructura, las propiedades del modelo deben considerar dos alternativas: el suelo con propiedades inerciales y el suelo sin propiedades inerciales.

14.11.1.3 Método de Análisis

14.11.1.3.1 El MIATG debe ser analizado usando el método de análisis por Superposición Modal Espectral.

14.11.1.3.3 No se acepta que el cumplimiento de los requisitos establecidos en este capítulo sea mostrado a partir de resultados de un análisis estático con fuerzas equivalentes (AEE).

14.11.1.3.4 En el análisis por SME se debe considerar un número de modos de vibrar tal que queden incluidos aquellos modos que representan las deformaciones relativas entre el rotor y el resto del equipo, siempre cumpliendo con los requisitos de 14.7.2.

14.11.1.4 Requisitos de Análisis y Diseño

14.11.1.4.1 El diseño del sistema (equipo, estructura de soporte y su fundación) debe ser verificado para:

- Requisitos del fabricante
- Continuidad de Operación con Sismo de Nivel de Servicio
- Parada Segura (sin daño) con Sismo de Nivel de Diseño

14.11.1.4.2 La verificación de límites de deformación debe ser realizada a lo largo de todo el rotor en las posiciones que sea relevante, y en las posiciones de los descansos.

El fabricante del equipo debe entregar las deformaciones de operación normal del equipo (incluyendo deformaciones por temperatura) y para la condición de equipo en reposo.

El fabricante debe, además, especificar cuáles son los márgenes restantes de deformación por sismo permitidas por el equipo, en el rotor y en los descansos en operación, para las condiciones de 14.11.1.4.1.

14.11.1.5 Combinaciones de Carga para Verificación Sísmica

14.11.1.5.1 Las combinaciones de carga a ser usadas en las verificaciones requeridas en esta sección son consistentes con los requerimientos de 14.8. Sólo se explicita aquí las combinaciones con solicitación sísmica. Será responsabilidad del diseñador considerar todas las combinaciones factibles, de diferentes tipos de cargas, que puedan controlar el diseño.

14.11.1.5.2 Para sismo de nivel de Diseño:

- a) $D + aSC + CO + SO + E$
- b) $D + aSC + SA1 + E$
- c) $D + aSC + SA2 + E$

14.11.1.5.3 Para sismo de nivel de Servicio:

- a) $D + aSC + CO + SO1 + E$

D: Peso Propio

aSC: Sobrecargas de Uso

CO: Cargas de Operación Normal

SO: Cargas de Operación Normal Desbalanceada

SA1: Cargas de Corto Circuito (de la línea)

SA2: Cargas de Parada (trip)

E: Efectos sísmicos

3. Capítulo 3: Desarrollo de un modelo

Este capítulo abarca el desarrollo de un modelo integrado de turbogenerador a partir de la información de un proyecto de central termoeléctrica ejecutado y los requisitos impuestos por la norma NCh2369 actualizada, detallados en el punto **2.3.1**.

Inicialmente el modelo se desarrolla en el programa computacional SAP2000.v19, dado que es el programa tradicional que se ocupa en la ingeniería civil en Chile, además de que este programa de análisis se enseña a los estudiantes de la facultad de ingeniería de la Universidad de Chile. Posteriormente se exporta la información y se lleva al programa computacional ANSYS apdl., el cual permite el ingreso de propiedades con matrices asimétricas de los elementos, característica que no tiene SAP2000.

La división del capítulo consiste en el desarrollo geométrico, cargas asignadas, interacción suelo-estructura y la información asignada al análisis dinámico que se aplica al modelo SAP2000. Adicionalmente se menciona el modelo construido en ANSYS apdl., idéntico al modelo creado en SAP2000, detallando las principales diferencias. Finalmente se presenta la información, entregada por el fabricante, del equipo respecto a los límites admisibles de desplazamientos en los puntos de control utilizados en este estudio, con el fin de tener una noción respecto a los límites de desplazamientos reales que permiten asegurar la estabilidad y garantía del rotor en un equipo turbo generador utilizado en esta memoria.

3.1 Modelo SAP2000

3.1.1 Geometría

La geometría del modelo se desarrolla en base a planos e informes provenientes de la base de datos de PMI, respecto a un proyecto ejecutado en el cual se utiliza un equipo turbogenerador con su mesa de fundación. La información contempla dimensiones, puntos de anclaje, propiedades mecánicas de los materiales y todo lo necesario para incorporar el equipo turbo generador al modelo de análisis.

3.1.1.1 Mesa de fundación

La mesa de fundación consiste en una estructura de hormigón compuesta por una losa superior unida a una losa inferior por medio de 10 columnas. Sus dimensiones son 37.65 m largo x 14.5 m ancho x 21.3 m alto. Los espesores de las losas superior e inferior son 3.5 m y 3.8 m respectivamente.

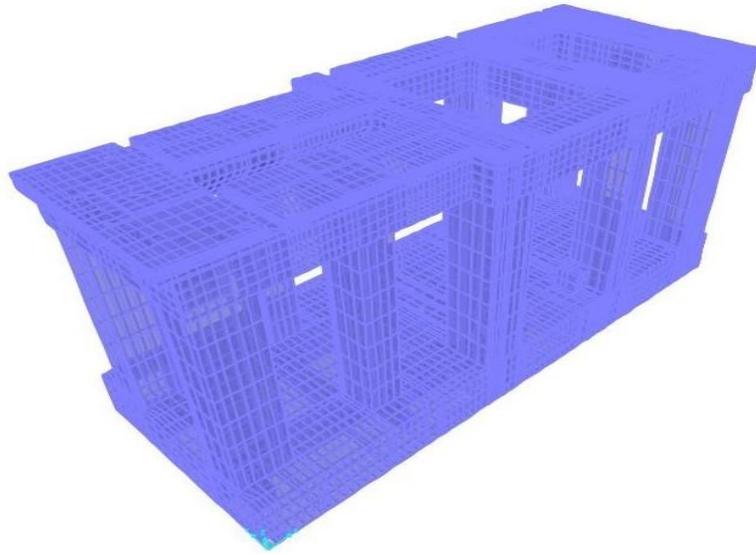


Figura 2: Vista isométrica de la mesa de fundación.

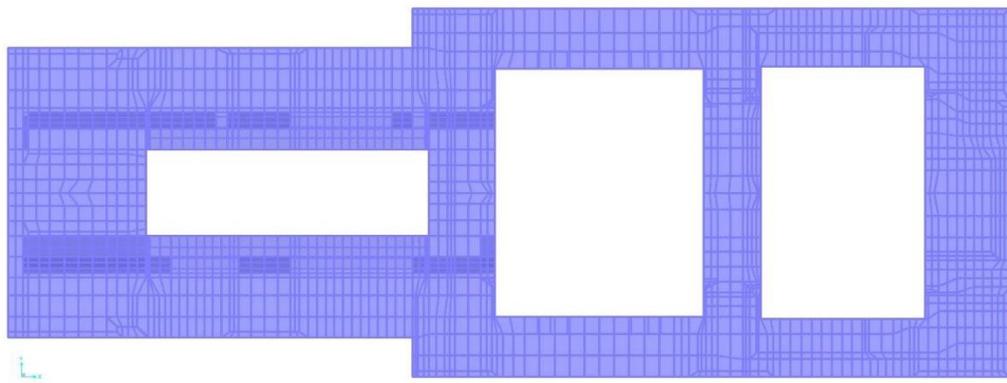


Figura 3: Vista en planta mesa de fundación.

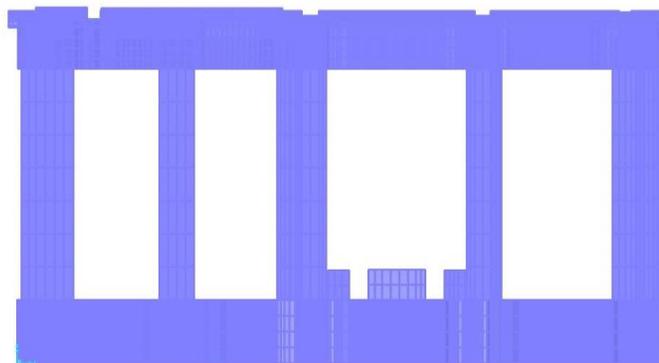


Figura 4: Vista en elevación mesa de fundación.

3.1.1.2 Turbogenerador

El turbogenerador corresponde al equipo principal de una central termoeléctrica, cuya función es la generación de energía mediante la transformación de la energía mecánica a eléctrica. Este equipo está soportado sobre la losa superior de la mesa de fundación. La modelación del equipo en su totalidad es aportada por el fabricante del equipo con la restricción de no realizar ningún cambio.

El modelo de análisis del equipo consiste en tres partes:

- Carcasa, considerando recubrimiento del generador, HP/IP casing, estator y otros componentes.
- Rotor.
- Apoyos del equipo.

3.1.1.2.1 Carcasa

La función de la carcasa es entregar estabilidad y protección a los componentes interiores del equipo: rotor, estator y aceite a presión. Además se considera la zona del HP/IP casing, encargado de entregar la potencia al equipo, y otros componentes interiores como soportes laterales, aspas y turbina. Los materiales de los componentes son de diferentes tipos de acero.

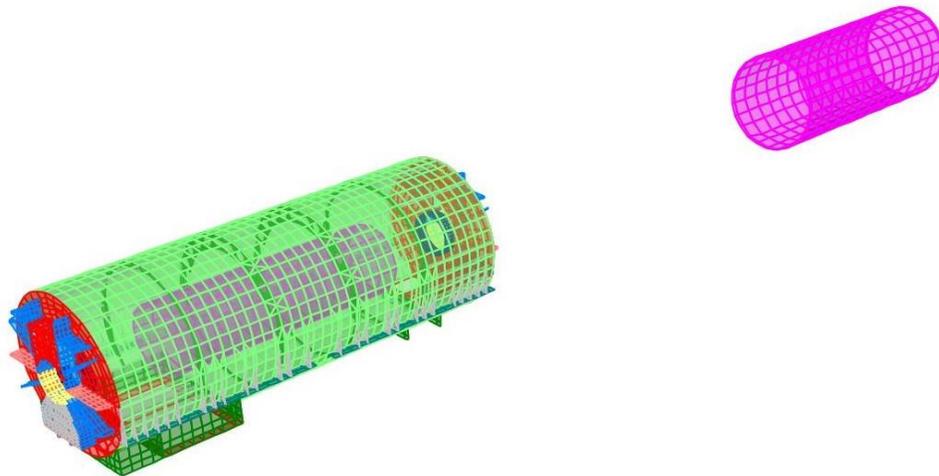


Figura 5: Vista isométrica Generador y HP/IP casing.



Figura 6: Vista en elevación Generador y HP/IP casing.

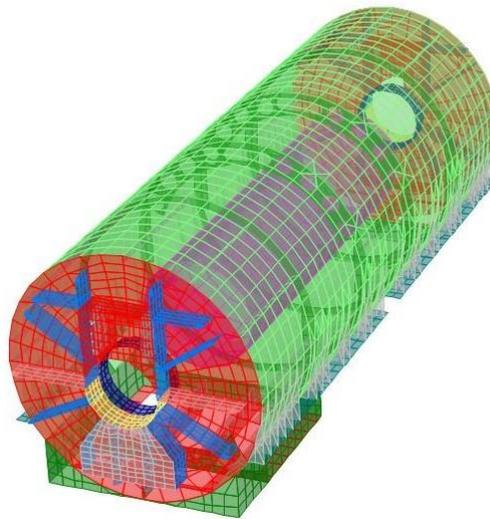


Figura 7: Componentes del Generador.

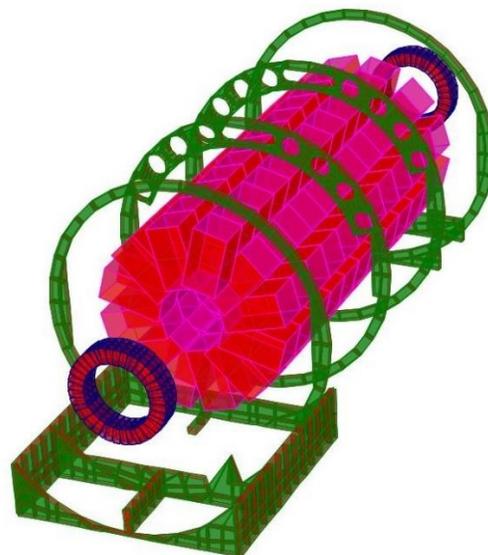


Figura 8: Componentes interiores y Estator.

3.1.1.2.2 Rotor

La función del rotor es producir la energía mecánica al girar las turbinas mediante la rotación de su eje longitudinal. Esta pieza mide 33.74 m de largo y está conformado por la unión de varias secciones, con diferentes largos, diámetros y tipos de aceros.

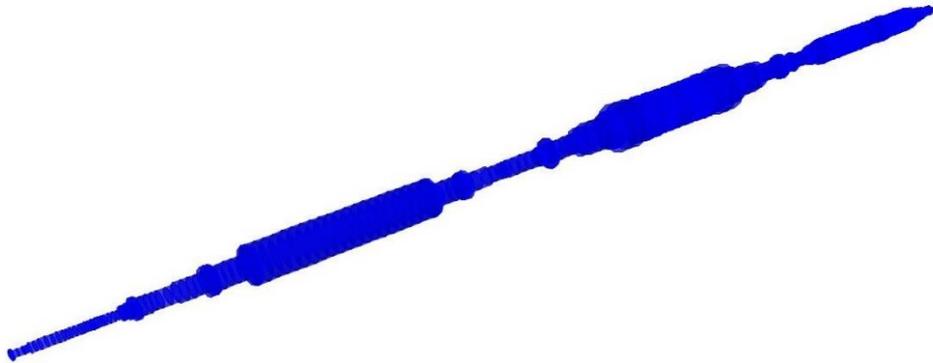


Figura 9: Vista isométrica Rotor

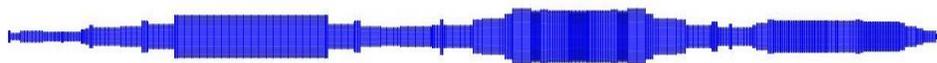


Figura 10: Vista en elevación Rotor

3.1.1.2.3 Apoyos

Los apoyos del equipo permiten su anclaje a la mesa de fundación y proporciona estabilidad cuando el equipo está en operación. Se consideran dos tipos de apoyo: descansos en pedestales y descansos hidrodinámicos, distribuidos en el eje longitudinal del equipo, presentado en la siguiente **Figura 13**. El primer tipo de apoyo corresponde a fijaciones de acero entre la carcasa del equipo y la losa superior, elementos en verde presentado a continuación en la **Figura 14**. Estos apoyos se modelan mediante elementos muy rígidos y sin masa, los cuales son dispuestos sobre la losa o bien a una altura definida y su comportamiento cinemático está controlado mediante “Constrains” entre un punto extremo del apoyo y un punto de la losa superior, tal y como se observa en las **Figuras 11 y 12**.

El segundo tipo de apoyo consiste en la resistencia al movimiento que provoca el aceite a presión inmerso dentro la carcasa, específicamente entre los componentes interiores del equipo y el rotor. Estos apoyos están ubicados en el extremo superior de los elementos de descanso en pedestal, tal y como se observan en la **Figura 15** en verde. Sus propiedades son mencionadas en el punto **3.1.1.2.4**.

Es importante mencionar que el rotor está unido directamente a un descanso en pedestal sólo en un punto, restringiendo su movimiento en todas las direcciones. En los demás puntos de apoyo, el rotor está conectado a los descansos en pedestal a través de los descansos hidrodinámicos (elementos links en verde), los cuales no restringen el movimiento axial del rotor. Esto permite modelar la flotación que experimenta el rotor en el aceite a presión.

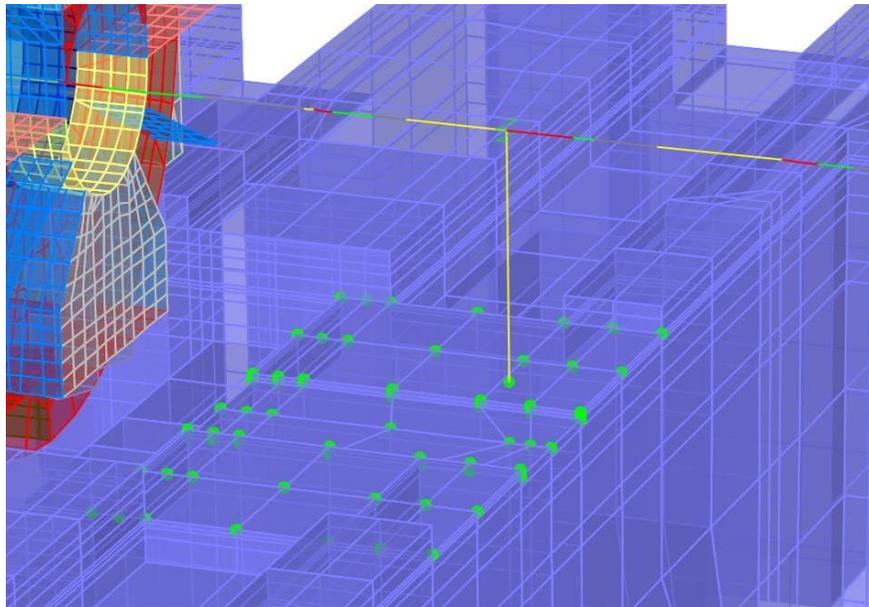


Figura 11: Constrains entre un descanso en pedestal (línea amarilla) y la losa superior.

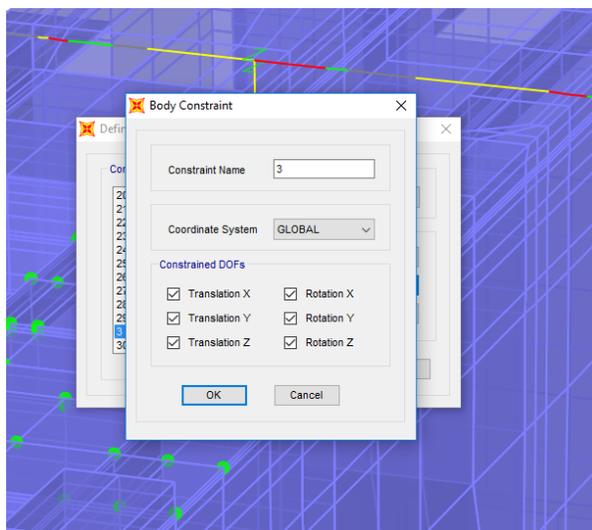


Figura 12: Modelación del comportamiento cinemático de un descanso en pedestal mediante Constrains.

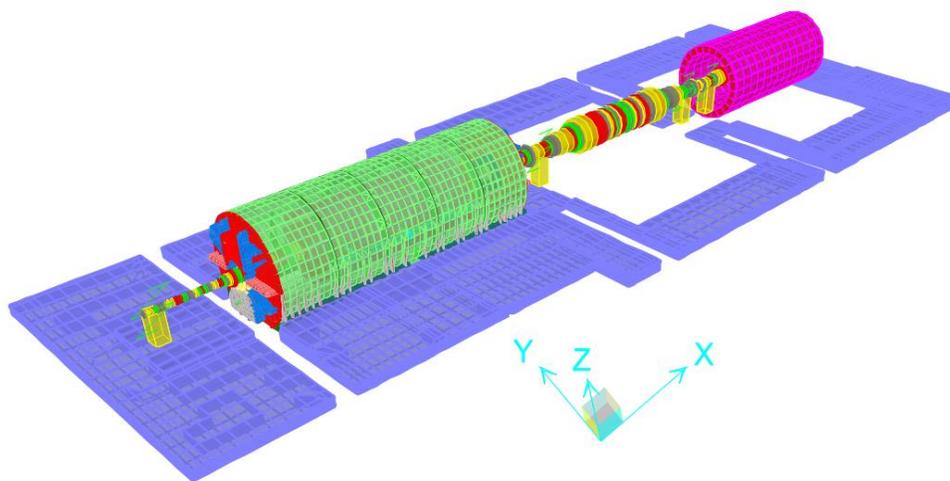


Figura 13: Vista isométrica de los apoyos del turbogenerador. Los elementos rectangulares en amarillo corresponden a los descansos en pedestal. En tanto los elementos resortes en verde, ubicados sobre cada descanso en pedestal, corresponden a los descansos hidrodinámicos.

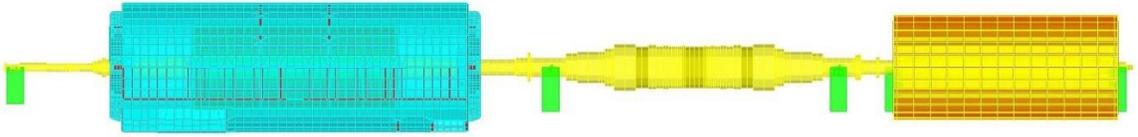


Figura 14: Vista en elevación de los descansos en pedestales (elementos rectangulares en verde).

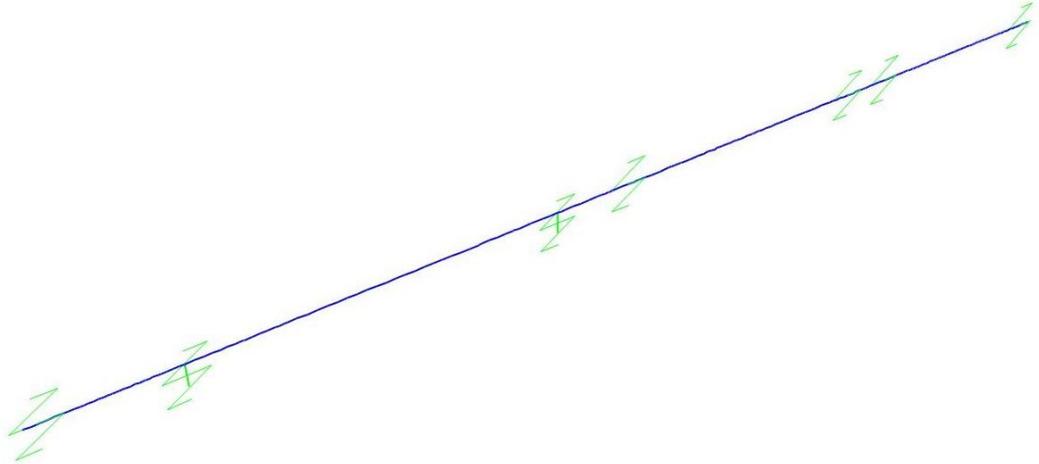


Figura 15: Vista isométrica de los descansos hidrodinámicos (elementos en verde).

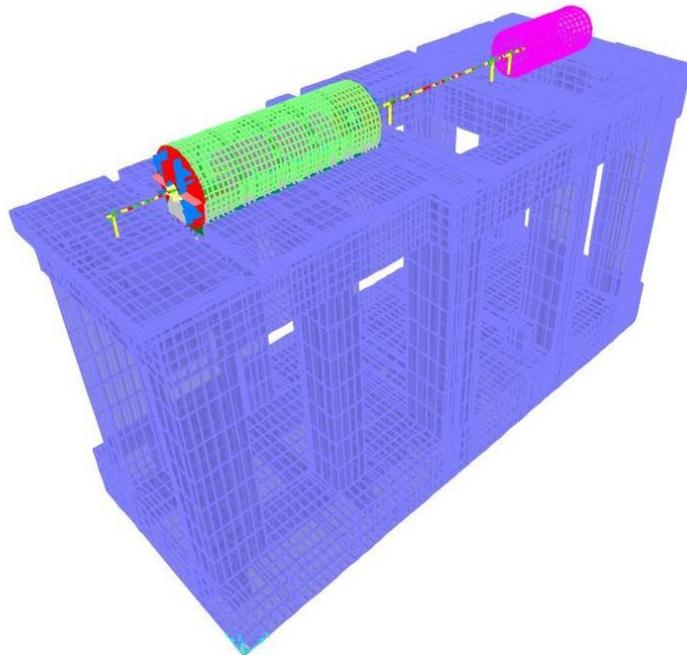


Figura 16: Geometría completa del modelo de análisis construido en SAP2000.

3.1.1.2.4 Elementos links

El líquido a presión, que se utiliza en la flotación del rotor, aporta al modelo propiedades de amortiguamiento y rigidez cuando el equipo está operativo. La información de las propiedades son entregadas por el fabricante del equipo y es necesario su aplicación al modelo de análisis. Los elementos de diseño aplicados al modelo computacional corresponden a elementos links, sin largo ni masa, cuya función es únicamente representar las propiedades dinámicas de los descansos del rotor del equipo, es decir rigidez y amortiguación, presentadas en las siguientes **Figuras 19 a la 26**. Los valores de las propiedades dinámicas dependen de la velocidad del rotor, sin embargo para efectos de este trabajo de título, se utiliza sólo una velocidad. La disposición de los elementos links consiste en la colocación de cada uno sobre los descansos en pedestal (apoyos) del equipo y en las zonas laterales longitudinales del estator.

A continuación se exponen los elementos links y sus propiedades, considerando que el orden de 1 a 7 es de Norte a Sur (respecto a la siguiente **Figura 17**) a través del eje longitudinal del equipo.

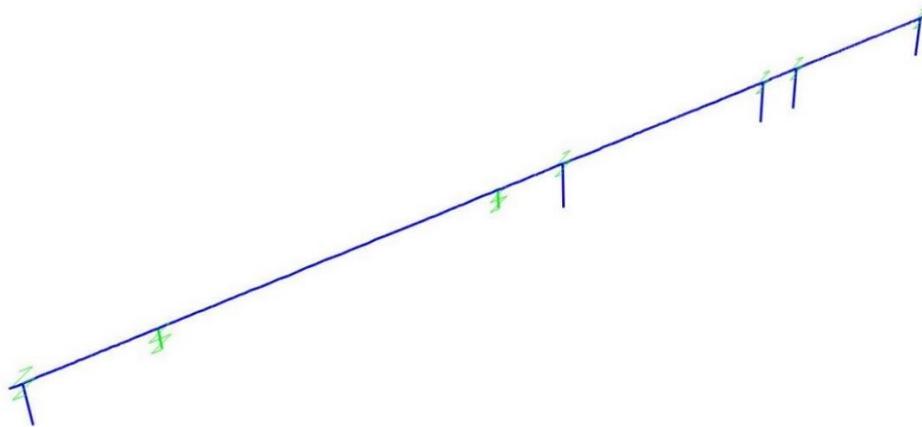


Figura 17: Disposición de los links a lo largo del rotor

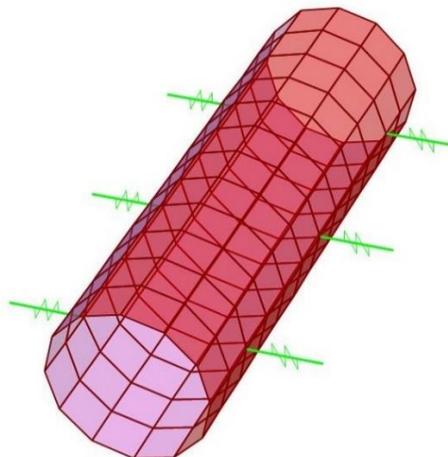


Figura 18: Disposición de los links alrededor del estator

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

Tonf, m, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
195785.5		98300.64			

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.		0.			

OK Cancel

Figura 19: Propiedades dinámicas del link1, en unidades [tonf] y [m].

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

Tonf, m, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
140720.84	1896672.1	74235.34		72195.91	

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.	0.	0.		0.	

OK Cancel

Figura 20: Propiedades dinámicas del link2, en unidades [tonf] y [m].

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3 0.

Units

Tonf, m, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
347723.2		347723.2			

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.		0.			

OK Cancel

Figura 21: Propiedades dinámicas del link3, en unidades [tonf] y [m].

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3 0.

Units

Tonf, m, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
363019.		363019.			

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.		0.			

OK Cancel

Figura 22: Propiedades dinámicas del link4, en unidades [tonf] y [m].

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3 0.

Units

Tonf, m, C

Upper Stiffness Matrix (Symmetrical) Used For All Analysis Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

	U1	U2	U3	R1	R2	R3
U1	585215.1		243202.31			
U2						
U3			59388.27			
R1				Fixed		
R2					Fixed	
R3						Fixed

Upper Damping Matrix (Symmetrical) Used For All Analysis Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

	U1	U2	U3	R1	R2	R3
U1	1313.394		80.69			
U2						
U3			88.552			
R1				Fixed		
R2					Fixed	
R3						Fixed

OK Cancel

Figura 23: Propiedades dinámicas link5, en unidades [tonf] y [m].

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3 0.

Units

Tonf, m, C

Upper Stiffness Matrix (Symmetrical) Used For All Analysis Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

	U1	U2	U3	R1	R2	R3
U1	552992.1		229844.03			
U2						
U3			56125.18			
R1				Fixed		
R2					Fixed	
R3						Fixed

Upper Damping Matrix (Symmetrical) Used For All Analysis Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

	U1	U2	U3	R1	R2	R3
U1	1313.394		80.69			
U2						
U3			88.552			
R1				Fixed		
R2					Fixed	
R3						Fixed

OK Cancel

Figura 24: Propiedades dinámicas link6, en unidades [tonf] y [m].

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2:

U3:

Units:

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input type="text" value="64578.63"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="64578.63"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input type="text" value="167.845"/>	<input type="text"/>	<input type="text" value="167.845"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

OK Cancel

Figura 25: Propiedades dinámicas del link7, en unidades [tonf] y [m].

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2:

U3:

Units:

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input type="text" value="21414.04"/>	<input type="text" value="58939.6"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
<input type="text" value="0."/>	<input type="text" value="0."/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>	<input type="text" value="Fixed"/>

OK Cancel

Figura 26: Propiedades dinámicas del links estator, en unidades [tonf] y [m].

3.1.2 Interacción suelo-estructura

La interacción suelo-estructura se modela en base a la recomendación teórica proveniente de un proyecto ejecutado perteneciente a la base de datos de la empresa PMI, detallada en el Anexo B [8]. Básicamente se utilizan las propiedades del suelo como módulo de corte en traslación y balanceo, peso específico y coeficiente de Poisson, para definir resortes alrededor de la losa inferior tal y como se observa en la siguiente **Figura 27**.

En la base de la losa inferior, se define una división de las zonas, considerando interior, lateral longitudinal, lateral transversal y esquinas, presentada en la siguiente **Figura 28**. Luego a cada zona se le asigna un valor de rigidez, cuyos valores se presentan en la siguiente **Tabla 3**. Con respecto a las bandas laterales de la losa inferior, se asigna una rigidez para el fondo distinta a la del espesor, valores presentados en la siguiente **Tabla 2**. Los valores de rigidez presentados en las **Tablas 1 y 2** corresponden a la rigidez total por zona, y en el modelo computacional, esta rigidez se reparte uniformemente dividiendo su valor por el número total de nodos por sector que contiene el mallado del modelo.

Las zonas laterales y basales consideradas en la repartición de los resortes se escogen a partir de las diferentes manifestaciones sísmicas que podría estar sujeta la estructura, ya sea movimientos principalmente horizontales, movimientos principalmente verticales o una combinación de ambos. Las variables según el tipo de suelo no son consideradas en estudio dado que la importancia de este trabajo se enfoca en la interacción estructura-equipos, con las propiedades dinámicas de los descansos del rotor simétricas o asimétricas. Por lo tanto se utilizan los mismos valores de rigidez, obtenidos a partir de sólo una combinación de propiedades del suelo, para todos los modelos de análisis construidos.

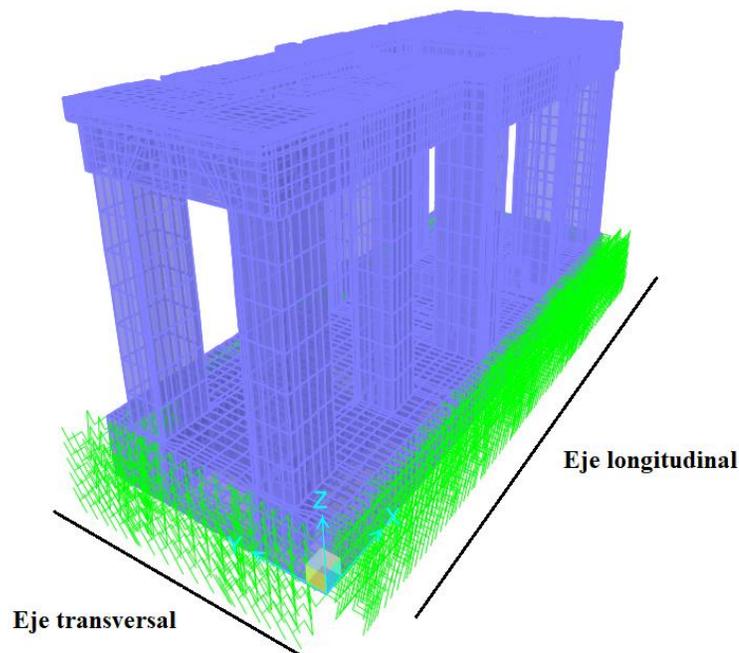


Figura 27: Vista isométrica de los resortes asignados al modelo construido en SAP2000.

Tabla 2: Rigidez lateral total de la losa inferior de los modelos construidos.

Zona	Fondo $\left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}}\right]$	Espesor $\left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}}\right]$
Longitudinal	5126778	2174025
Transversal	5540466	2349450

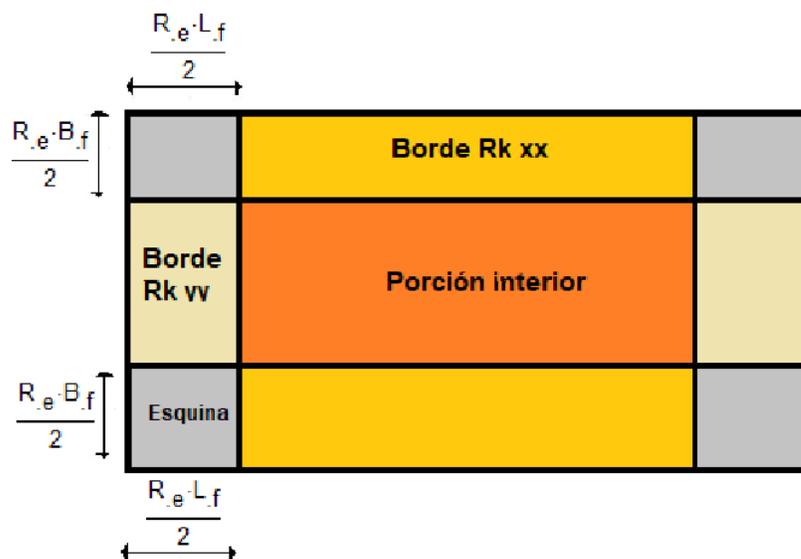


Figura 28: División basal de la losa inferior de los modelos construidos para la asignación de rigidez por sector. $R_e=0.3$; $L_f=37.65$ m; $B_f=14.5$ m.

Tabla 3: Rigidez por sector en la base de los modelos construidos.

Sector Base	$K \left[\frac{\text{tonf}}{\text{m}}\right]$
Esquina	1755418
Lateral longitudinal	4240442
Lateral transversal	3934745
Interior	1560383

3.1.3 Cargas asignadas

Las cargas asignadas al modelo, excluyendo las cargas muertas por peso del material y las cargas sísmicas, son las recomendadas y definidas por un proyecto ejecutado de turbo generador. Estas cargas son definidas ya sea como carga muerta adicional o bien carga en operación (carga viva en este trabajo). Adicionalmente algunas cargas, provenientes del equipo turbo generador, son transformadas a masa y/o fuerza ya que corresponden a simplificaciones del equipo. A continuación se exponen las cargas más importantes:

- Relleno de suelo

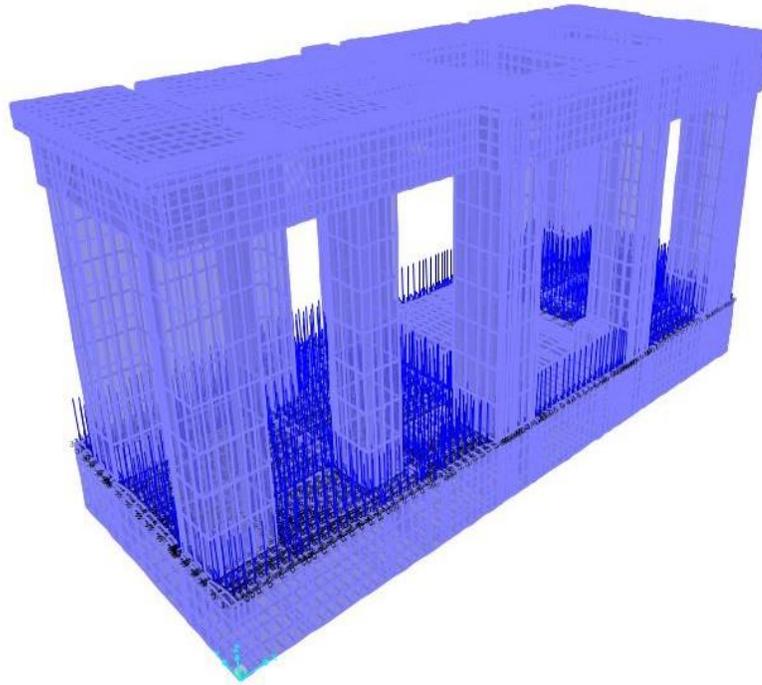


Figura 29: Carga de Relleno de suelo, expresada como masa en el modelo de análisis.

- Cargas operacionales del rotor en [tonf]

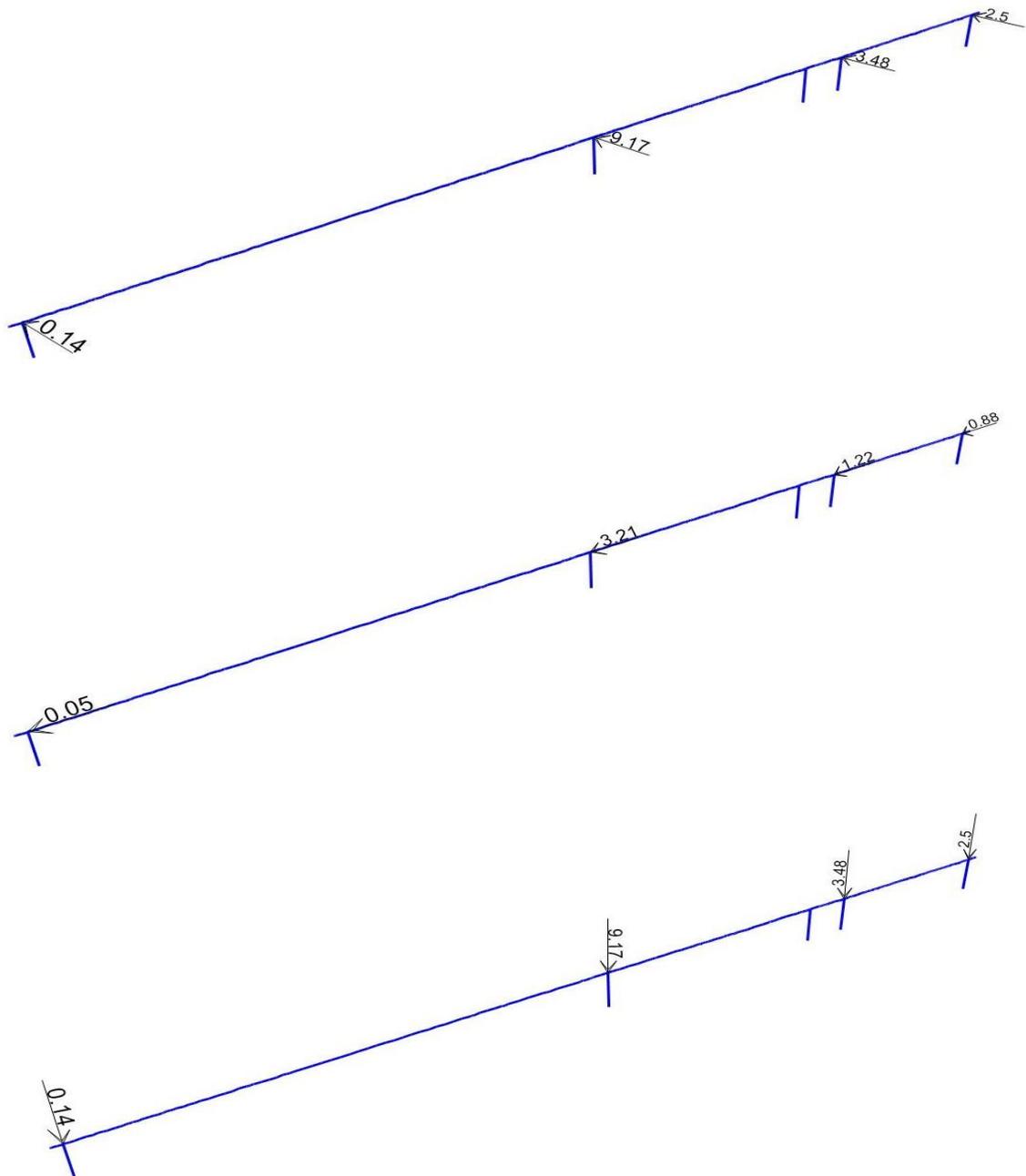


Figura 30: Cargas operacionales del rotor del equipo turbo generador en unidades de [tonf].

- Condensador

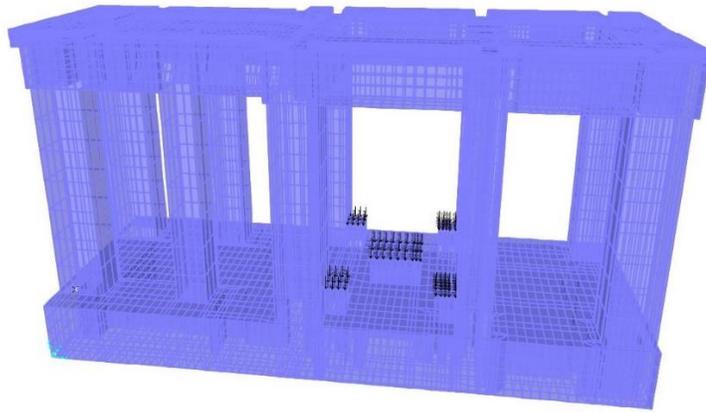


Figura 31: Carga del condensador del equipo turbo generador.

- Valveblock

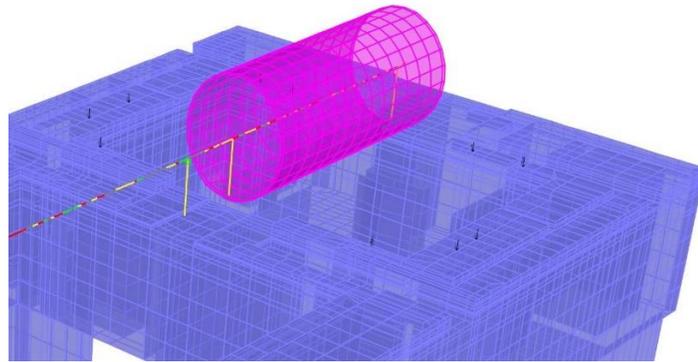


Figura 32: Carga de Valveblock del equipo turbo generador.

- Piping

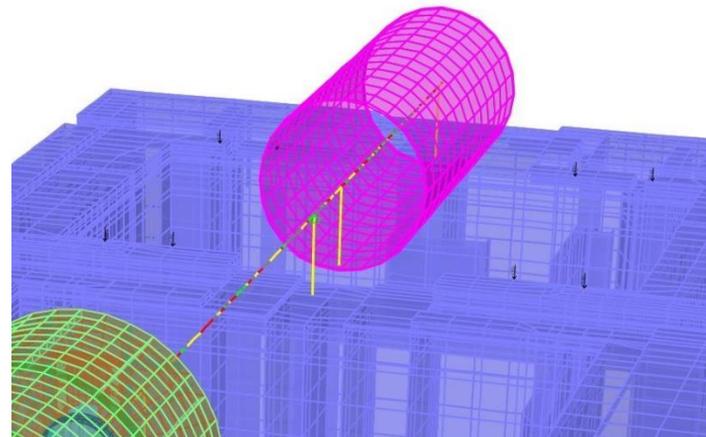


Figura 33: Carga de piping del equipo turbo generador.

3.1.4 Análisis dinámico

Los análisis dinámicos aplicados en el modelo se extraen de la aplicación del capítulo 14 de la norma sísmica NCh2369 actualizada, junto con la versión oficial y sugerencias de la norma internacional ASCE-7-10. Esta última es complementaria y aceptada por la normativa chilena.

Se realizan dos tipos de análisis sísmico: el primero corresponde a un análisis dinámico modal espectral según el espectro de aceleración definido por la norma NCh2369 actualizada. En tanto el segundo corresponde a un análisis dinámico tiempo-historia.

A continuación se detalla la información utilizada en cada análisis dinámico, ya sean factores sísmicos, utilizados en la definición del espectro de aceleración de diseño, y registros sísmicos de aceleración reales de la zona.

3.1.4.1 Modal espectral

El análisis dinámico modal espectral aplicado al modelo se define a partir de la norma sísmica chilena NCh2369 actualizada. Se detalla el espectro de diseño de aceleración utilizado además de los factores sísmicos asociados a la estructura del modelo.

Espectro de diseño de aceleración:

$$S_a = I_E \cdot S_a(T, \xi)$$
$$S_a(T, R, \xi) = \begin{cases} a_o \left(1 - \frac{T}{T_1}\right) + \frac{A}{R} \left(\frac{T}{T_1}\right), & T < T_1 \\ \frac{A}{R}, & T_1 \leq T < T_2 \\ \frac{A}{R} \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3}, & T_2 \leq T < T_3 \\ \frac{A_1}{R} \left(\frac{T_3}{T}\right)^2, & T_3 \leq T \end{cases}$$

Tabla 4: Factores utilizados en el espectro de diseño de aceleración perteneciente a la norma chilena NCh2369 actualizada.

Factor	Valor
a_o [g]	0.5
I_E	1.0
R	1
T_1	0.125
T_2	0.499
T_3	2
A	1.06
A_1	0.42

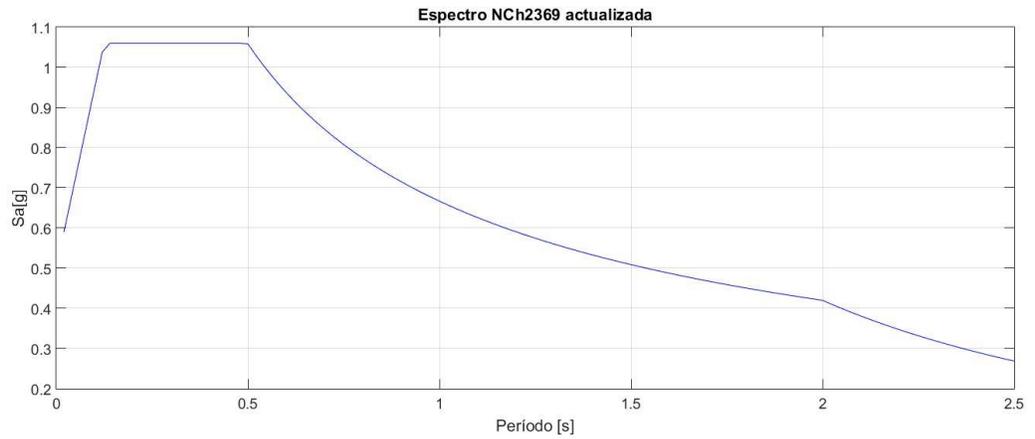


Figura 34: Espectro de diseño de aceleración norma NCh2369 actualizada.

3.1.4.2 Tiempo-Historia

El análisis dinámico tiempo-historia aplicado al modelo considera las condiciones impuestas por las normas sísmicas, es decir, tres registros sísmicos de aceleración reales como mínimo, tiempo de duración sobre los 120 [s], evento cercano a la zona de construcción y combinación de los espectros de cada registro por sobre el espectro de diseño en el rango de interés. Para cumplir este último requisito, se determinan los espectros de cada registro sísmico de aceleración utilizando el método de aceleración promedio [4], código descrito en el Anexo A-a, y se utiliza la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores individuales para la combinación de los espectros, código descrito en el Anexo A-b.

A continuación se detalla la información utilizada para este método:

Zona del diseño= Mejillones, II región de Antofagasta, Chile.

i) Terremoto de Tarapacá, 13 de Junio de 2005 [5]

Mw=7.9

Peak de aceleración= 0.358 [g] (Ponderado)

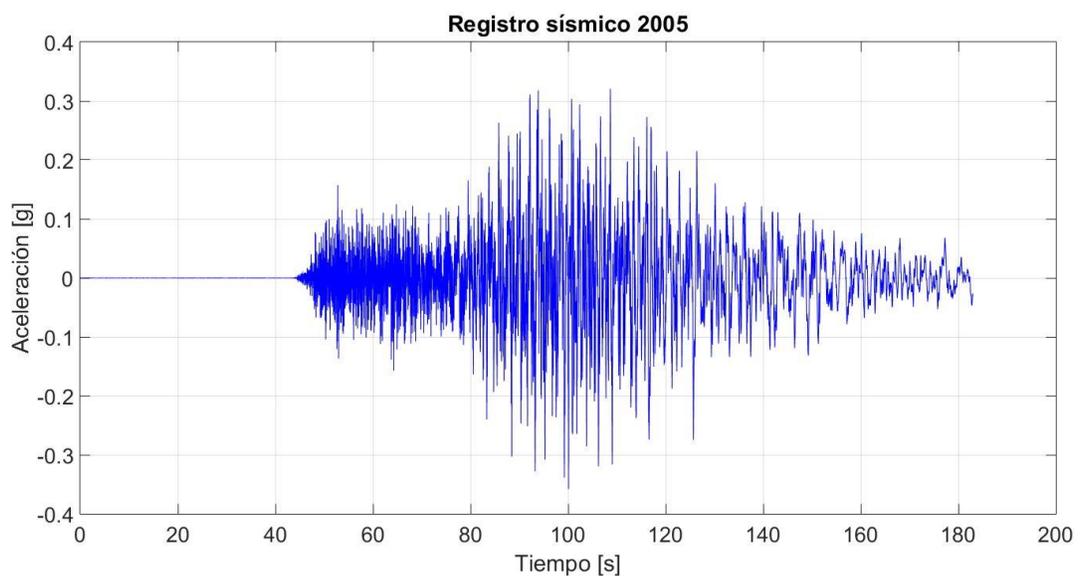


Figura 35: Registro sísmico de aceleración real, Mejillones 2005.

ii) Terremoto de Tocopilla, 14 de Noviembre de 2007 [6]

$M_w=7.7$

Peak de aceleración= 0.503 [g] (Ponderado)

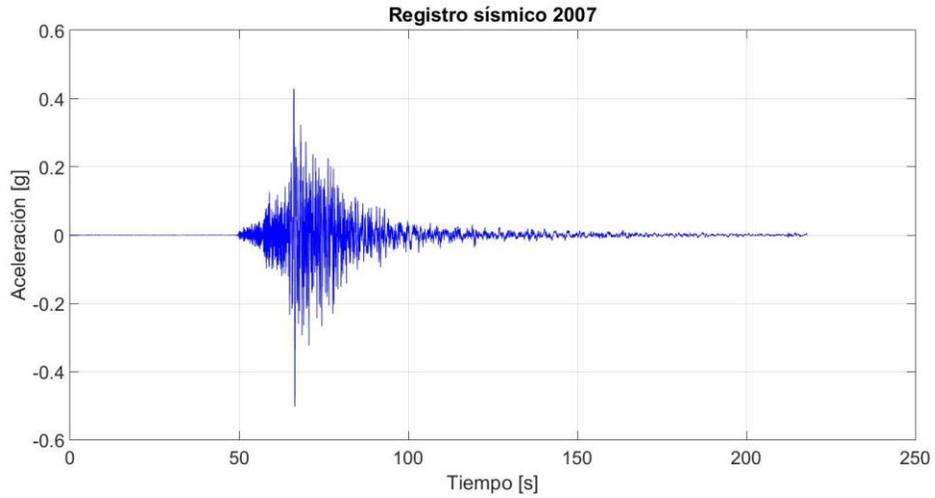


Figura 36: Registro sísmico de aceleración real, Tocopilla 2007.

iii) Terremoto de Iquique, 1 de Abril de 2014 [7]

$M_w=8.2$

Peak de aceleración= 0.271 [g] (Ponderado)

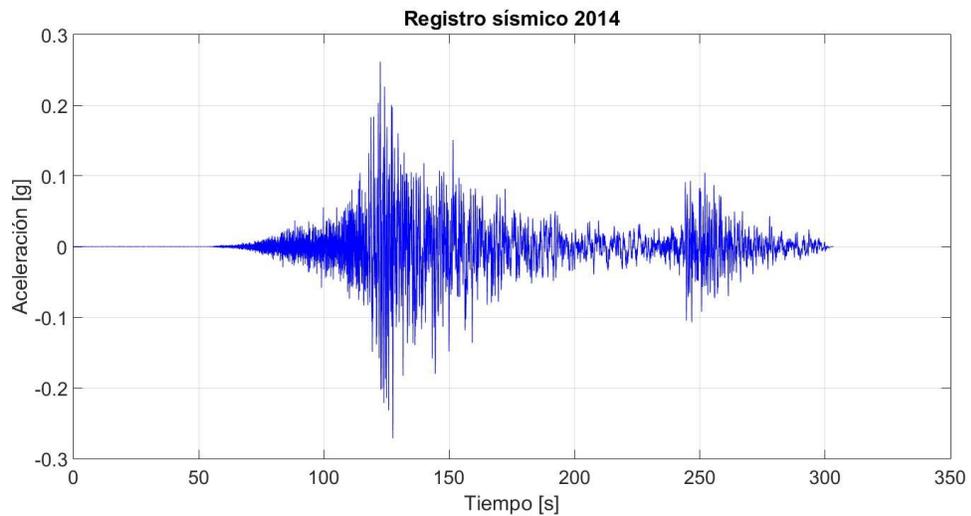


Figura 37: Registro sísmico de aceleración real, Iquique 2014.

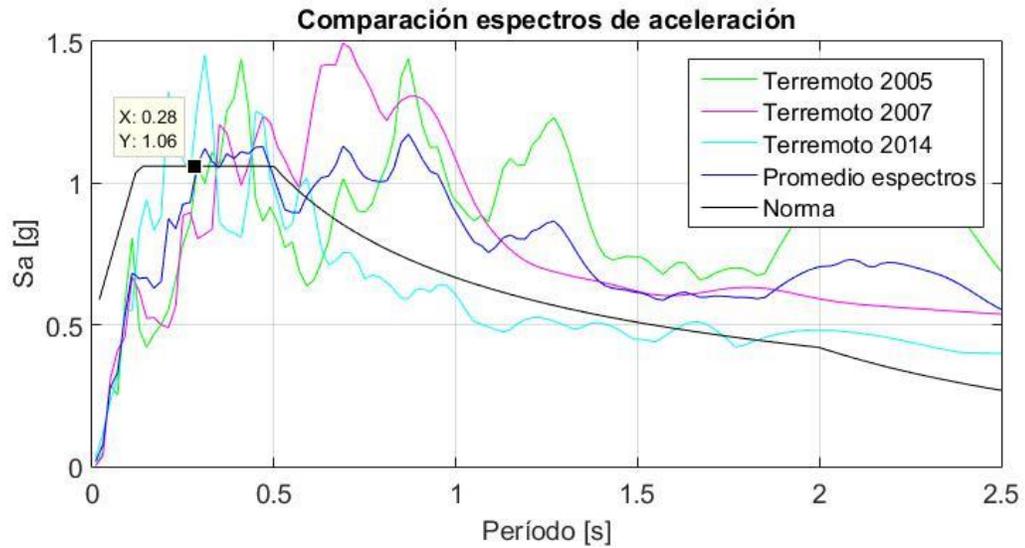


Figura 38: Comparación de espectros de aceleración utilizados en este estudio.

Tal y como se observa en la **Figura 38**, los espectros de los registros sísmicos de aceleración: terremoto 2005, terremoto 2007 y terremoto 2014, presentan valores de aceleración sísmica mayores a los entregados por la norma (línea negra). Sin embargo estos espectros de aceleración, calculados desde los registros sísmicos de aceleración, no consideran el factor de ductilidad “R” presente en las normas estructurales nacionales, la cual permite una disminución en las solicitaciones a causa de la disipación de energía en el cambio de la rigidez estructural.

La norma sísmica está diseñada, en base a experiencias previas, para proteger a las estructuras de eventuales eventos sísmicos de gran magnitud. No obstante, su aplicación no significa una protección 100% segura, ya que siempre podría aparecer otro evento sísmico de mayor magnitud e intensidad. Esto se refleja en algunos rangos de períodos de la **Figura 38**, en la cual las aceleraciones sísmicas de los espectros relacionados a los registros sísmicos de aceleración, son mayores a los entregados por la norma NCh2369 actualizada.

3.2 Modelo ANSYS

El modelo de análisis en ANSYS apdl. se construye a partir de la información exportada desde el modelo de análisis construido en SAP2000. La información se guarda en tablas Excel y luego se transcribe en un documento con formato txt. Se recuerda que el objetivo principal de modelar en ANSYS apdl. es evaluar la respuesta de los desplazamientos en los puntos de control del rotor con las propiedades dinámicas asimétricas entregadas por el fabricante del equipo. Por lo tanto en ANSYS apdl. se aplica el método de análisis tiempo-historia con las propiedades dinámicas simétricas y asimétricas.

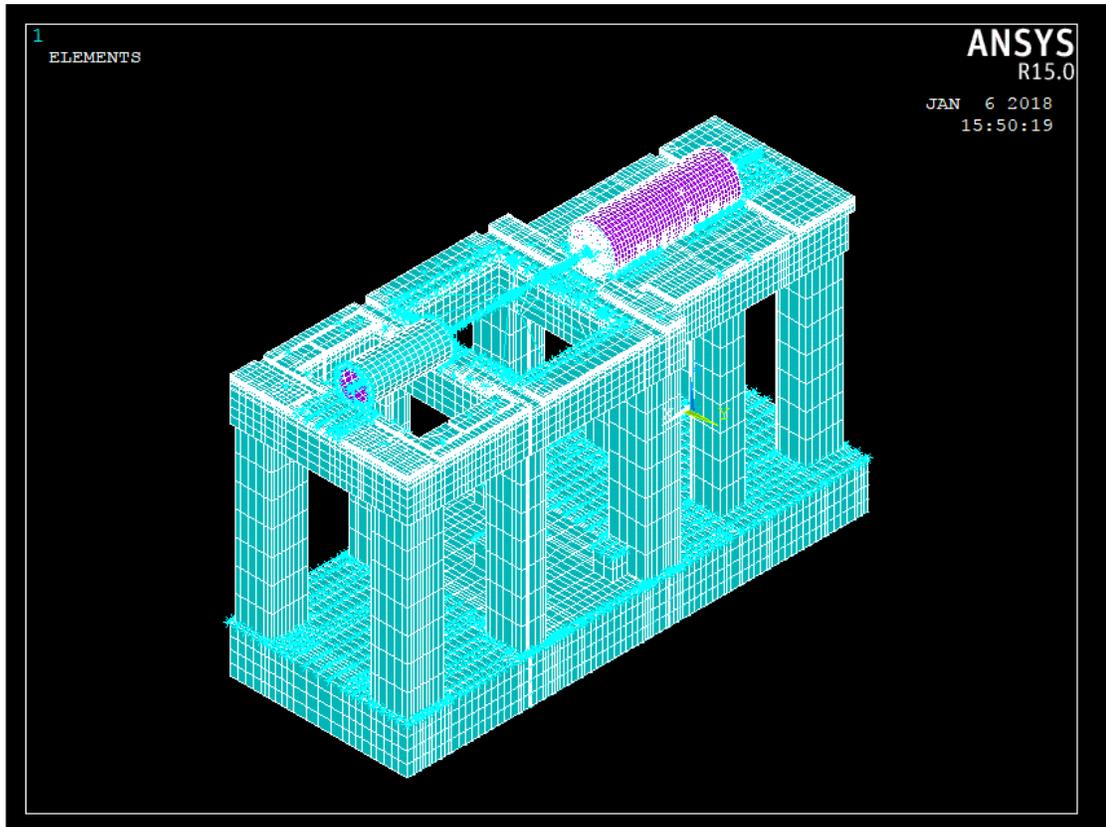


Figura 39: Modelo integrado construido en ANSYS apdl.

3.2.1 Propiedades dinámicas de los descansos del rotor

En el punto 3.1.1.2.4 se exponen las propiedades dinámicas de los descansos del rotor a través de los elementos links utilizados en modelo integrado construido en SAP2000. Estas propiedades no son las entregadas por el fabricante del equipo dado que se modifican los valores fuera de la diagonal en las matrices de rigidez y amortiguamiento, con el fin de utilizar matrices simétricas y poder desacoplar las ecuaciones dinámicas de movimiento.

En ANSYS apdl., es posible utilizar las propiedades dinámicas asimétricas entregadas por el fabricante del equipo. A continuación se detallan sus valores originales.

Tabla 5: Comparación de las propiedades dinámicas de rigidez, simétricas en SAP2000 y asimétricas en ANSYS, de los elementos links utilizados en ambos programas.

Elemento	SAP2000		ANSYS apdl	
	$U1U3[\frac{tonf}{m}]$	$U3U1[\frac{tonf}{m}]$	$U1U3[\frac{tonf}{m}]$	$U3U1[\frac{tonf}{m}]$
Link5	243202.3	243202.3	243202.3	38188.4
Link6	229844	229844	229844	36087.8

Tabla 6: Comparación de las propiedades dinámicas de amortiguamiento, simétricas en SAP2000 y asimétricas en ANSYS, de los elementos links utilizados en ambos programas.

Elemento	SAP2000		ANSYS apdl	
	$U1U3[\frac{tonf s^2}{m}]$	$U3U1[\frac{tonf s^2}{m}]$	$U1U3[\frac{tonf s^2}{m}]$	$U3U1[\frac{tonf s^2}{m}]$
Link5	243202.3	243202.3	243202.3	38188.4
Link6	229844	229844	229844	36087.8

3.3 Información del equipo

El equipo turbo generador está sujeto a límites admisibles en el desplazamiento del rotor, mostrados en la siguiente **Figura 40**, entregados por el fabricante del equipo.

Los límites admisibles en los desplazamientos del rotor son definidos en puntos específicos a lo largo del eje longitudinal del rotor del equipo. Los puntos de control son importantes ya que permiten verificar que se cumpla la holgura que debe existir entre la carcasa del equipo y los componentes rotarios interiores. Se debe mantener siempre los valores de los desplazamientos de los puntos de control del rotor por debajo de los límites admisibles para mantener la integridad y seguridad operacional del equipo turbo generador.

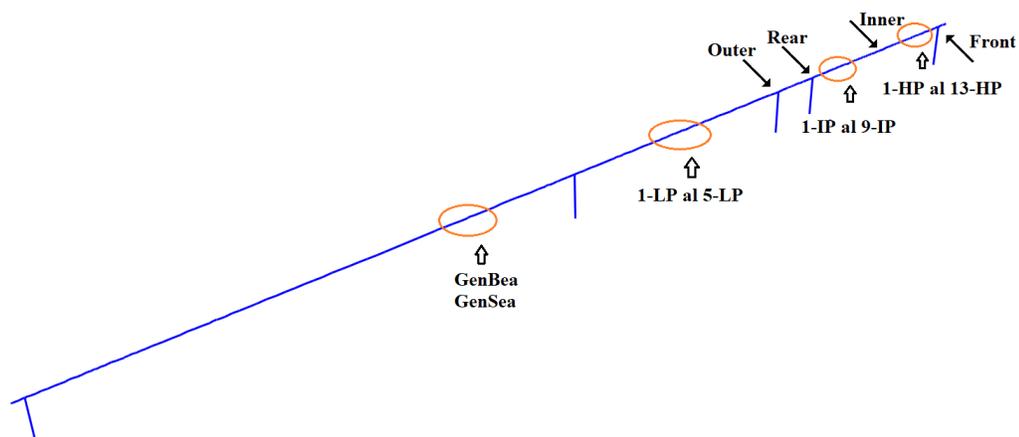


Figura 40: Ubicación de los puntos de control sobre el eje del rotor definidos en el modelo de análisis.

Tabla 7: Límites admisibles de desplazamiento asignados por el fabricante del equipo a cada punto de control.

<i>Nombre asignado</i>	<i>Límite admisible [mm]</i>
1-HP	1
2-HP	0.95
3-HP	0.95
4-HP	0.95
5-HP	0.95
6-HP	0.95
7-HP	0.95
8-HP	0.8
9-HP	0.8
10-HP	0.8
11-HP	0.7
12-HP	0.7
13-HP	0.7
1-IP	2.75
2-IP	2.65
3-IP	2.65
4-IP	2.65
5-IP	2.7
6-IP	2.7
7-IP	2.7
8-IP	2.7
9-IP	2.7
1-LP	3.6
2-LP	3.6
3-LP	3.6
4-LP	3.6
5-LP	3.6
GenBea	0.53
GenSea	0.47
Inner	2.75
Rear	2.55
Front	2.4
Outer	2.9

4. Capítulo 4: Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados de desplazamiento en los puntos de control del rotor de todos los casos propuestos en este trabajo de título. Los resultados son obtenidos desde los programas computacionales SAP2000 v.19 y ANSYS apdl. Cada subdivisión del capítulo corresponde a un tipo de comparación. Además se presentan los modos utilizados.

4.1 Modos considerados

Los modos utilizados en ambos programas cumplen con el criterio impuesto por la norma NCh2369 actualizada [3] respecto al 95% de la participación de masa. Adicionalmente se exponen los períodos por cada modo y el período fundamental de la estructura. Los valores de los periodos están por bajo los 0.3 [s]. La diferencia de los periodos entre ambos programas (SAP2000 y ANSYS apdl.) no es muy significativa.

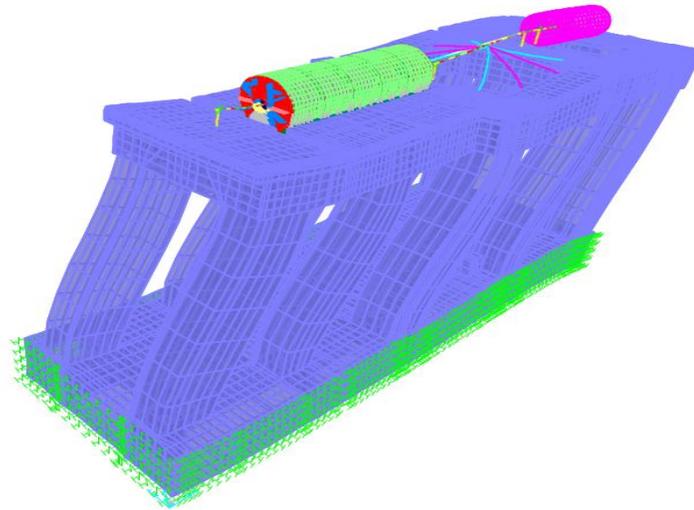


Figura 41: Período fundamental del modelo de análisis construido en SAP2000.

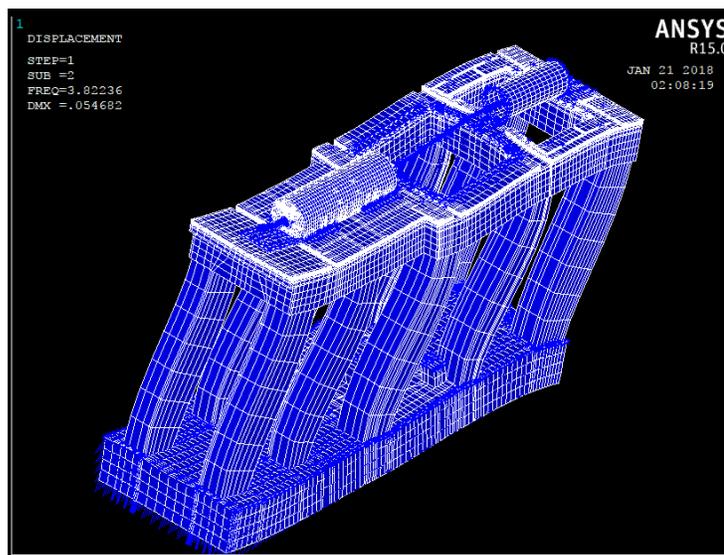


Figura 42: Período fundamental del modelo de análisis construido en ANSYS apdl.

Tabla 8: Períodos considerados en el modelo SAP2000.

StepType	StepNum	Period [s]	SumUX	SumUY	SumUZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Mode	1	0.282	0.515	0.000	0.000	0.000	0.191	0.000
Mode	2	0.258	0.515	0.277	0.000	0.264	0.191	0.166
Mode	3	0.215	0.515	0.277	0.032	0.264	0.192	0.166
Mode	4	0.174	0.515	0.320	0.032	0.277	0.192	0.193
Mode	5	0.162	0.515	0.500	0.032	0.424	0.192	0.562
Mode	6	0.103	0.516	0.500	0.032	0.424	0.193	0.562
Mode	7	0.099	0.516	0.500	0.131	0.424	0.221	0.562
Mode	8	0.096	0.516	0.521	0.131	0.429	0.221	0.564
Mode	9	0.090	0.600	0.521	0.131	0.429	0.255	0.564
Mode	10	0.084	0.979	0.521	0.133	0.429	0.347	0.564
Mode	11	0.075	0.980	0.773	0.231	0.563	0.356	0.598
Mode	12	0.074	0.983	0.900	0.435	0.630	0.372	0.601
Mode	13	0.072	0.984	0.900	0.547	0.630	0.375	0.814
Mode	14	0.070	0.984	0.910	0.578	0.632	0.375	0.982
Mode	15	0.069	0.984	0.912	0.858	0.632	0.410	0.982
Mode	16	0.066	0.992	0.912	0.882	0.633	0.884	0.982
Mode	17	0.060	0.992	0.912	0.954	0.633	0.952	0.982
Mode	18	0.058	0.992	0.985	0.954	0.954	0.952	0.987
Mode	19	0.052	0.992	0.988	0.955	0.955	0.953	0.988
Mode	20	0.051	0.992	0.988	0.967	0.955	0.959	0.988
Mode	21	0.051	0.992	0.988	0.967	0.955	0.959	0.988
Mode	22	0.049	0.992	0.988	0.967	0.955	0.959	0.988
Mode	23	0.048	0.992	0.988	0.968	0.955	0.959	0.988
Mode	24	0.047	0.992	0.989	0.968	0.960	0.959	0.989
Mode	25	0.045	0.992	0.990	0.973	0.961	0.960	0.989
Mode	26	0.044	0.992	0.991	0.973	0.962	0.962	0.990
Mode	27	0.044	0.992	0.991	0.975	0.963	0.962	0.990
Mode	28	0.043	0.992	0.991	0.976	0.964	0.963	0.991
Mode	29	0.043	0.992	0.991	0.976	0.970	0.963	0.991
Mode	30	0.042	0.992	0.991	0.976	0.972	0.963	0.991

Tabla 9: Períodos considerados en el modelo ANSYS apdl

Tipo	Orden	Período [s]
Mode	1	0.262
Mode	2	0.250
Mode	3	0.215
Mode	4	0.172
Mode	5	0.148
Mode	6	0.102
Mode	7	0.098
Mode	8	0.095
Mode	9	0.094
Mode	10	0.094
Mode	11	0.091
Mode	12	0.089
Mode	13	0.080
Mode	14	0.070
Mode	15	0.068
Mode	16	0.068
Mode	17	0.062
Mode	18	0.058
Mode	19	0.056
Mode	20	0.053
Mode	21	0.053
Mode	22	0.050
Mode	23	0.050
Mode	24	0.049
Mode	25	0.049
Mode	26	0.046
Mode	27	0.046
Mode	28	0.046
Mode	29	0.043
Mode	30	0.043

Tabla 10: Período fundamental y masa modal efectiva de los modelos analizados en SAP2000 y ANSYS apdl.

Programa	Período Fundamental [s]	Masa modal efectiva
SAP2000	0.282	0.515
ANSYS apdl.	0.262	0.507

4.1.1 Tiempo de análisis de los modelos utilizados

Los tiempos de análisis de los modelos 1,2 y 3, correspondientes a los casos presentados en el punto **1.3 d)** son registrados en la siguiente **Tabla 11**:

Tabla 11: Tiempo de análisis de los modelos estudiados en este trabajo de título.

Modelo	Propiedades simétricas	Método dinámico	Programa	Tiempo de análisis [hr]*
1	SI	Modal Espectral	SAP2000	1.2
2	SI	Modal Espectral	SAP2000	1.7
3	SI	Modal Espectral	SAP2000	2.6
3	SI	Modal Espectral	ANSYS apdl.	2.2
3	SI	Tiempo-Historia	ANSYS apdl.	4.3
3	NO	Tiempo-Historia	ANSYS apdl.	4.7

*El computador que se utiliza en este trabajo de título presenta las siguientes características:
Procesador: Intel Core i7 2nd Gen
Ram: 8 GB

4.2 Caso 1: Comparación de mallados en SAP2000

Se presentan tres modelos construidos en SAP2000, los cuales difieren únicamente en la cantidad de mallado. De los 3 modelos, se fija la cantidad de elementos del primer modelo y los otros dos, segundo y tercer modelo, se construyen con un 25% y 50% más de elementos respectivamente (**Tabla 12**). Es importante aclarar que el aumento de mallado se aplica únicamente en la mesa de fundación dado que la modelación del equipo en su totalidad es aportado por el fabricante del equipo con la restricción de no realizar ningún cambio.

Considerando los resultados de análisis obtenidos en cada modelo, se presentan los resultados de los desplazamientos en los puntos de control del rotor en la siguiente **Tabla 13**, mencionando la mayor diferencia porcentual con respecto al modelo 1. A partir de los resultados se puede visualizar un aumento en los desplazamientos en los puntos de control del rotor en el modelo 3, sin embargo no difieren significativamente entre el modelo 2 y 3. También se visualiza un aumento en el modelo 2 y 3 con respecto al modelo 1.

Tabla 12: Cantidad de elementos en el mallado de la mesa de fundación por cada modelo.

Modelo	Cantidad elementos
1	33544
2	41930
3	50316

Tabla 13: Comparación de los resultados de desplazamiento entre los modelos construidos en SAP2000, con respecto al mallado del modelo 1.

Punto de Control	Desplazamiento [mm]			Diferencia Porcentual
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	
1-HP	1,11	1,12	1,13	2,47
2-HP	1,07	1,07	1,08	1,23
3-HP	1,03	1,04	1,05	2,25
4-HP	0,99	1,03	1,04	5,27
5-HP	1,47	1,52	1,54	4,17
6-HP	0,48	0,50	0,50	4,84
7-HP	1,72	1,76	1,80	4,44
8-HP	1,43	1,44	1,45	1,24
9-HP	0,50	0,50	0,51	1,66
10-HP	1,19	1,21	1,26	5,56
11-HP	1,39	1,46	1,48	5,70
12-HP	0,55	0,55	0,56	1,11
13-HP	1,79	1,86	1,92	6,77
1-IP	1,35	1,40	1,42	4,60
2-IP	0,63	0,66	0,66	5,56
3-IP	2,89	3,01	3,07	5,86
4-IP	1,31	1,36	1,37	4,61
5-IP	0,74	0,76	0,76	3,43
6-IP	4,23	4,40	4,47	5,37
7-IP	1,27	1,27	1,28	1,43
8-IP	0,86	0,88	0,89	3,06
9-IP	1,22	1,23	1,24	1,73
1-LP	1,00	1,02	1,03	3,17
2-LP	1,18	1,24	1,25	5,20
3-LP	1,14	1,18	1,19	4,09
4-LP	1,16	1,21	1,22	4,57
5-LP	1,55	1,61	1,63	4,59
GenBea	1,74	1,75	1,77	1,55
GenSea	1,95	2,04	2,06	5,69
Inner	0,59	0,62	0,63	5,47
Rear	1,20	1,25	1,27	5,54
Front	1,57	1,59	1,61	2,27
Outer	2,96	3,07	3,10	4,42

4.3 Caso 2: Comparación entre programas SAP2000 y ANSYS apdl

Considerando el modelo con mayor desplazamiento en el Caso 1, diseñado en SAP2000, se exporta su información y se procede a construir un modelo lo más idéntico posible en ANSYS apdl., ya que el proceso de construcción es diferente entre programas. El objetivo es comparar los resultados obtenidos en cada programa para determinar su porcentaje de diferencia.

Considerando los resultados de los períodos de las formas modales presentadas de ambos programas al inicio de este capítulo, se puede visualizar una diferencia en el período y en la masa modal efectiva, resumiendo a los primeros 3 períodos en la siguiente **Tabla 14**.

Tabla 14: Períodos y masas modales efectivas para los 3 primeros modos del modelo analizado, en los programas SAP2000 y ANSYS apdl.

SAP2000		ANSYS apdl.	
Período [s]	Masa modal	Período [s]	Masa modal
0.282	0.515	0.262	0.507
0.258	0.515	0.250	0.505
0.215	0.515	0.215	0.506

En los resultados de la siguiente **Tabla 15**, se refleja un aumento en el desplazamiento en los puntos de control (ver **Figura 40**) desde 0.6% a 3% en los resultados de desplazamiento que entrega ANSYS apdl. con respecto a SAP2000. Se puede concluir a partir de comparar los resultados entre estos dos programas de análisis, que la diferencia en los resultados de los desplazamientos en los puntos de control del rotor, no es muy significativa.

Tabla 15: Comparación de los resultados de desplazamiento entre el programa de análisis ANSYS con respecto al programa SAP2000 (Caso 2).

Punto de Control	Desplazamiento [mm]		
	SAP2000	ANSYS apdl.	Diferencia Porcentual
1-HP	1,133	1,150	1,5
2-HP	1,079	1,094	1,39
3-HP	1,052	1,079	2,57
4-HP	1,044	1,053	0,86
5-HP	1,537	1,584	3,06
6-HP	0,501	0,513	2,40
7-HP	1,803	1,843	2,22
8-HP	1,450	1,490	2,76
9-HP	0,507	0,512	0,97
10-HP	1,261	1,289	2,22
11-HP	1,476	1,497	1,42
12-HP	0,560	0,569	1,61
13-HP	1,916	1,970	2,81
1-IP	1,417	1,456	2,75
2-IP	0,665	0,669	0,60
3-IP	3,072	3,160	2,86
4-IP	1,373	1,414	2,99
5-IP	0,763	0,776	1,70
6-IP	4,469	4,606	3,07
7-IP	1,284	1,301	1,32
8-IP	0,885	0,905	2,26
9-IP	1,244	1,280	2,89
1-LP	1,031	1,057	2,52
2-LP	1,249	1,280	2,48
3-LP	1,190	1,206	1,34
4-LP	1,220	1,244	1,97
5-LP	1,628	1,649	1,29
GenBea	1,767	1,791	1,36
GenSea	2,062	2,118	2,72
Inner	0,625	0,632	1,12
Rear	1,265	1,290	1,98
Front	1,608	1,620	0,75
Outer	3,100	3,155	1,77

4.4 Caso 3: Comparación entre métodos modal espectral y tiempo-historia

Considerando el modelo de análisis en el programa SAP2000, se analiza sísmicamente bajo el método dinámico tiempo-historia (MAT-H) y método dinámico modal espectral (MAM-E). Para el caso de análisis lineal tiempo historia, se determina la respuesta para 3 registros sísmicos de aceleración debidamente modificados para cumplir con los requisitos de la norma NCh2369 [1]. El tiempo total de análisis para cada sismo corresponde a la duración completa del registro sísmico de aceleración disponible, todos sobre los 120 segundos.

A continuación se expone los resultados del programa SAP2000. En base a los resultados se verifica que con el registro sísmico de aceleración Tocopilla 14Nov-2007, se obtienen respuestas mayores con respecto a los otros dos registros sísmicos de aceleración Iquique 01Abril-2014 y Tarapacá 13Jun-2005. Sin embargo, todas las respuestas son menores a las obtenidas con el método dinámico modal espectral.

Tal y como se explica anteriormente en la comparación de los espectros, la causa en la diferencia de respuesta se debería a que en primer lugar, la respuesta del método de análisis tiempo-historia es discretizada y más precisa que el método de análisis modal espectral. Este último considera una respuesta conservadora al utilizar el máximo valor de desplazamiento por cada modo y combinarlo para obtener un valor final para cada punto, en cambio en el método tiempo-historia, se va sumando la respuesta de cada modo para cada paso de tiempo.

Tabla 16: Resultados de desplazamiento utilizando métodos modal espectral y tiempo-historia utilizando el programa SAP2000. La diferencia porcentual entre los métodos dinámicos modal espectral y tiempo-historia es con respecto al mayor resultado del método tiempo-historia.

Punto de Control	Desplazamiento [mm]				Diferencia Porcentual
	Modal Espectral	Tiempo-Historia			
		2005	2007	2014	
1-HP	1,133	1,086	1,101	1,057	2,9
2-HP	1,079	1,078	1,066	1,078	1,2
3-HP	1,052	1,014	1,041	0,982	1,1
4-HP	1,044	1,038	1,026	1,010	1,8
5-HP	1,537	1,455	1,531	1,532	0,4
6-HP	0,501	0,484	0,483	0,457	3,7
7-HP	1,803	1,634	1,767	1,695	2,0
8-HP	1,450	1,399	1,439	1,374	0,8
9-HP	0,507	0,480	0,490	0,484	3,5
10-HP	1,261	1,059	1,229	1,056	2,6
11-HP	1,476	1,405	1,469	1,437	0,5
12-HP	0,560	0,547	0,540	0,507	3,7
13-HP	1,916	1,675	1,807	1,625	6,0
1-IP	1,417	1,377	1,399	1,322	1,3
2-IP	0,665	0,626	0,645	0,640	3,1
3-IP	3,072	2,830	2,834	2,934	8,4
4-IP	1,373	1,319	1,320	1,251	4,0
5-IP	0,763	0,731	0,737	0,724	3,5
6-IP	4,469	4,146	4,321	4,161	3,4
7-IP	1,284	1,231	1,239	1,174	3,6
8-IP	0,885	0,870	0,877	0,874	0,9
9-IP	1,244	1,175	1,200	1,170	3,7
1-LP	1,031	1,002	1,019	0,996	1,2
2-LP	1,249	1,188	1,246	1,135	0,2
3-LP	1,190	1,141	1,150	1,087	3,5
4-LP	1,220	1,159	1,190	1,098	2,5
5-LP	1,628	1,531	1,622	1,542	0,4
GenBea	1,767	1,687	1,750	1,710	1,0
GenSea	2,062	1,960	2,046	2,050	0,8
Inner	0,625	0,601	0,610	0,584	2,5
Rear	1,265	1,242	1,241	1,207	1,9
Front	1,608	1,570	1,565	1,571	2,7
Outer	3,100	2,934	3,075	2,891	0,8

4.5 Caso 4: Comparación de modelos considerando distintas propiedades dinámicas en los descansos del rotor del equipo

Debido a que SAP2000 no permite incorporar en componentes mecánicos matrices de propiedades asimétricas y si lo permite ANSYS, se aplica en ANSYS un análisis lineal tiempo-historia a un modelo con matrices de propiedades dinámicas asimétricas para los descansos del rotor (modelación correcta de los descansos del rotor) y otro modelo con matrices de propiedades dinámicas simétricas para los descansos del rotor.

Las propiedades dinámicas en los descansos del rotor del equipo turbo generador, es decir rigidez y amortiguamiento, son modificadas en un modelo construido en ANSYS apdl. para analizar con propiedades dinámicas simétricas, con el fin de verificar la sensibilidad que tienen las propiedades de los descansos del rotor (asimétrica o simétrica) sobre la respuesta de desplazamiento en los puntos de control del rotor. Para cumplir con lo anterior, se analizan ambos modelos con el método de análisis tiempo-historia. La diferencia en las propiedades dinámicas en los descansos del rotor del equipo turbo generador (propiedades simétricas y asimétricas) aplicados en cada modelo fue detallada anteriormente en el punto **3.2.1** en las **Tablas 5 y 6**.

Considerando los resultados de desplazamiento del rotor de la siguiente **Tabla 17**, se evidencia una diferencia en los puntos de control del rotor, esta diferencia se encuentra en el rango entre **0.1% y 1.5%** de mayor desplazamiento en el caso de descansos con propiedades asimétricas. Esta diferencia no sería significativa y el resultado de este análisis comparativo podría concluir que para el modelo integrado del turbo generador y la determinación de los desplazamientos en los puntos de control del rotor, se puede modelar los descansos con propiedades simétricas (SAP2000). Sin embargo si en la verificación de las holguras en los descansos y tramos del rotor están muy juntas con los límites recomendados por el fabricante, será necesario realizar el análisis con ANSYS y propiedades asimétricas de los descansos del rotor.

Tabla 17: Comparación de las respuestas de desplazamiento con respecto al modelo con las propiedades dinámicas simétricas.

Punto de Control	Desplazamiento [mm]		
	Descanso propiedades simétricas	Descanso propiedades asimétricas	Diferencia Porcentual
1-HP	1,135	1,150	1,32
2-HP	1,093	1,094	0,12
3-HP	1,067	1,079	1,10
4-HP	1,052	1,053	0,10
5-HP	1,568	1,584	1,02
6-HP	0,510	0,513	0,74
7-HP	1,843	1,863	1,09
8-HP	1,479	1,490	0,74
9-HP	0,510	0,512	0,37
10-HP	1,289	1,299	0,78
11-HP	1,479	1,497	1,22
12-HP	0,565	0,569	0,78
13-HP	1,970	1,980	0,51
1-IP	1,435	1,456	1,43
2-IP	0,667	0,669	0,26
3-IP	3,147	3,160	0,41
4-IP	1,398	1,414	1,17
5-IP	0,768	0,776	1,05
6-IP	4,531	4,606	1,66
7-IP	1,288	1,301	1,01
8-IP	0,900	0,905	0,59
9-IP	1,263	1,280	1,32
1-LP	1,048	1,057	0,86
2-LP	1,265	1,280	1,16
3-LP	1,202	1,206	0,33
4-LP	1,238	1,244	0,53
5-LP	1,635	1,649	0,83
GenBea	1,778	1,791	0,77
GenSea	2,098	2,118	0,96
Inner	0,626	0,632	0,94
Rear	1,276	1,290	1,05
Front	1,609	1,620	0,71
Outer	3,114	3,155	1,30

CONCLUSION PROGRAMAS DE ANÁLISIS

El proceso de construcción del modelo integrado en ambos programas difiere principalmente en el manejo de los elementos necesarios y en la visualización gráfica del modelo y sus componentes. En el programa SAP2000, la modelación es más simple y rápida ya que varias de las propiedades, tanto geométricas como mecánicas, están pre definidas de tal forma que al ingresar un dato, el programa automáticamente define varios otros. En el caso de ANSYS apdl., se debe definir todo de forma manual, aunque hay otras versiones como la ANSYS workbench, que presenta propiedades pre definidas. El motivo es principalmente a que el programa ANSYS abarca muchas áreas de la ciencia, con propiedades y métodos distintos de diseño, por ende no tiene comandos pre definidos para cada área. En cambio SAP2000 es un programa completamente estructural, por lo tanto incluye herramientas pre definidas en el cálculo de propiedades y formas geométricas, ya que son las más utilizadas en forma general en el diseño estructural. No obstante a lo anterior, al utilizar la versión ANSYS apdl., la construcción del modelo se realiza en base a comandos definidos, escritos en una hoja con formato txt sin utilizar la ventana gráfica del programa. Esto agiliza notoriamente la construcción del modelo en ANSYS. Esta ventaja aparece al utilizar ANSYS con fines comparativos con otros programas computacionales que permiten la exportación de sus datos dado que ANSYS apdl. permite importar datos.

Con respecto a la interacción del modelo, al considerar la respuesta dinámica y a las formas modales, los resultados en ambos programas son similares. Sin embargo dan resultados con un porcentaje de diferencia y esto se debe a que ambos programas ocupan métodos analíticos distintos, ANSYS es más preciso pero utiliza más carga computacional. Es importante mencionar las diferencias en el modelamiento en ambos programas, característica que no estaba dentro de los objetivos de la memoria, pero que no deja de ser valioso considerar las ventajas y desventajas que tienen ambos programas, para un futuro trabajo de investigación.

CONCLUSION CASO 1

En cuanto a los resultados obtenidos en los tres modelos con las mismas características, pero diferente mallado construidos en SAP2000, se concluye que un aumento en el mallado provoca un aumento en la respuesta de desplazamiento. Sin embargo en el tercer modelo con más mallado, el aumento en la respuesta no es tan diferente con respecto al segundo modelo, hay una convergencia. Esto podría estar relacionado a la zona donde se aumenta el mallado, la cual no siempre implicaría un aumento en la respuesta. También es importante mencionar que la rapidez en el análisis del modelo fue inversamente proporcional a la cantidad del mallado, característica que se debe tener en consideración cuando se decide afinar los resultados para tener una precisión adecuada. Para el estudio, se seleccionó el modelo 3 para el análisis comparativo de los Casos 2, 3 y 4.

CONCLUSION CASO 2

Al comparar los resultados obtenidos en un mismo modelo de mallado y propiedades simétricas de descanso, con distintos programas, se concluye que los valores obtenidos en ANSYS son mayores a los obtenidos en SAP2000, en un rango de diferencia desde un 0.6% a 3% en este modelo de estudio. Esto se debería a que existen diferentes tipos de elementos finitos para ser usados en la construcción del modelo en el programa ANSYS, los cuales permiten una mejor representación de la estructura y equipo en sus propiedades y su respuesta. Más aún, el mallado del modelo era igual en ambos programas, sin embargo no se obtiene la misma rigidez en el cálculo de los períodos de las formas modales.

Sin embargo esta diferencia no implica que un programa sea mejor que otro. Todo dependerá del propósito del problema a resolver al usar los programas. En nuestro caso en estudio, se están evaluando deformaciones de décimas y centésimas de milímetros, por lo que ha parecido relevante la comparación entre los softwares de análisis y sus resultados. SAP2000 fuertemente utilizado por estructurales y problemas sísmicos y ANSYS de amplio uso por los especialistas mecánicos, que frente a un modelo integrado de turbo generador exigido por el capítulo 14 de la norma NCh2369 actualizada, debe incorporarse modelación de suelo, estructura de hormigón armado y equipos mecánicos y rotatorios de una alta precisión de fabricación y montaje y de límites operacionales. La modelación del equipo y componentes pequeños importantes y sensibles al movimiento, se requiere que la respuesta sea lo más precisa en comparación con modelos usuales estructurales más robustos, cuyas respuestas de deformaciones son de otro orden de magnitud.

CONCLUSION CASO 3

Todos los registros sísmicos de aceleración correspondientes a los terremotos seleccionados, los resultados de desplazamientos en los puntos de control del rotor, obtenidos en el método de análisis tiempo-historia, son menores en comparación al método de análisis modal espectral, aún cuando la respuesta es integrada en toda la duración del registro. El rango de diferencia en los resultados de método modal espectral con respecto al método tiempo-historia es de un 0.2% a 8.4% mayor. Esto se debería a que cada registro sísmico de aceleración está asociado a un espectro de aceleración, el cual contiene un rango de períodos con valores de aceleración mayores o menores a los definidos por el espectro de diseño de la norma NCh2369 actualizada. Considerando que este modelo presenta períodos bajos en sus modos utilizados, la diferencia de los valores de desplazamientos estaría asociada a esta causa. Si bien la norma NCh2369 actualizada [3] no considera los resultados del método tiempo-historia para el diseño de la estructura y verificación del equipo, es importante tener en cuenta registros sísmicos representativos de la zona del proyecto, cuyas respuesta podrían ser más elevadas que las obtenidas utilizando el espectro de diseño y de esta forma contar con una información adicional de verificación que aumente la confiabilidad del diseño de la estructura, equipos y sus componentes.

CONCLUSION CASO 4

En cuanto a la modificación de las propiedades dinámicas de los descansos del rotor de un equipo turbo generador montado sobre una estructura de grandes dimensiones, al modificar sus propiedades de forma simétrica escogiendo el mayor valor de rigidez y el menor valor de amortiguamiento, tal y como se presenta en la **Tabla 5 y 6**, la respuesta de desplazamiento obtenida es menor que la alcanzada al utilizar las propiedades dinámicas entregadas por el fabricante del equipo. Evaluando las diferencias porcentuales entre ambas respuestas, el rango de diferencia está entre un 0.1 a 1.5% de mayor desplazamiento en los descansos con matriz de propiedades asimétricas.

Considerando la importancia crítica del equipo turbo generador, es necesaria la utilización de un segundo modelo computacional con ANSYS que considere las propiedades dinámicas asimétricas de los descansos del rotor establecidas por el fabricante del equipo, lo cual aportaría mayor confiabilidad a la verificación del equipo y sus componentes, así como en el diseño estructural del pedestal de soporte, manteniendo las garantías necesarias de parte del fabricante.

CONCLUSION FINAL

En el presente trabajo de título, la norma chilena NCh2369 actualizada es aplicada sin inconvenientes en los modelos estudiados del equipo turbo generador MIATG. Los 4 casos de estudio corresponden a respuestas pendientes de resolver de la discusión del capítulo 14 y el subcapítulo **14.11.1 Turbo Generador y su Fundación**, las cuales son consideradas en los estudios comparativos siguientes con sus resultados:

CASO 1: Comparación de mallados en SAP2000

Se concluye que un aumento en el mallado provoca un aumento en la respuesta de desplazamiento, con una tendencia a converger.

Se selecciona el modelo 3 (mayor mallado) para los análisis comparativos de los Casos 2, 3 y 4.

CASO 2: Comparación entre programas SAP2000 y ANSYS apdl.

Se concluye que los resultados de desplazamientos en los puntos de control del rotor obtenidos en ANSYS con el análisis modal espectral, son mayores a los obtenidos en SAP2000, diferencia entre un 0.6% a 3% en este modelo de estudio.

CASO 3: Comparación entre métodos modal espectral y tiempo-historia

Los resultados de desplazamientos en los puntos de control del rotor, obtenidos en el método de análisis tiempo-historia, son menores en comparación al método de análisis modal espectral.

CASO 4: Comparación de modelos considerando distintas propiedades dinámicas en los descansos del rotor del equipo

Las respuestas de desplazamiento en los puntos de control del rotor obtenidas son mayores cuando se utilizan las propiedades dinámicas asimétricas en los descansos del rotor, las cuales son entregadas por el fabricante del equipo. Evaluando las diferencias porcentuales entre ambas respuestas (descansos matriz asimétrica y descansos matriz simétrica), el rango de diferencia está en un rango de 0.1% a 1.5% de mayor desplazamiento en los descansos con matriz de propiedades asimétricas.

Es necesaria la utilización de un segundo modelo computacional con ANSYS que considere las propiedades dinámicas asimétricas de los descansos del rotor establecidas por el fabricante del equipo, lo cual aportaría mayor confiabilidad a la verificación del equipo y sus componentes.

RECOMENDACIÓN PARA OTROS ESTUDIOS

En general, los objetivos propuestos al inicio de esta memoria son desarrollados sin problemas, considerando el alcance definido previamente y la aplicación del capítulo 14 de la NCh2369 actualizada. Se deja como tema de investigación futura, el análisis en el comportamiento del turbo generador en operación bajo distintas velocidades (inicio de operación, trip y parada del equipo), ya que esta variable incide directamente en las propiedades dinámicas de los descansos del rotor, y cuya importancia es analizada y presentada en este trabajo de título. Para esta condición de operación, el fabricante también entrega límites de desplazamientos que deben ser verificados.

6 Bibliografía

- [1] Norma chilena NCh2369. Of2003. Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [2] ASCE STANDARD, ASCE/SEI 7-10, 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, United States of America.
- [3] Norma chilena NCh2369 actualiza, en revisión. Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile
- [4] CHOPRA, A.K. 2012. Dynamics of Structures. 4^a ed. California. Pearson.
- [5] R.Boroschek, D. Comte, P. Soto, R. Leon 2006, Registros del Terremoto de Tarapacá 13 de Junio de 2005.
- [6] R.Boroschek, D. Comte, P. Soto, R. Leon 2007, Terremoto norte Chile 12 de Noviembre de 2007 M=7.7.
- [7] Centro sismológico nacional, Universidad de Chile, 2014, Informe Técnico Terremoto de Iquique, Mw=8.2, 1 de abril de 2014
- [8] NIST GCR 12-917-21 2012, Soil-Structure Interaction for Building Structures.
- [9] Norma chilena NCh433. Of1996, modificada en 2012. Diseño sísmico de edificios.

A) Análisis Dinámico
 a. Código obtención de espectro

05-01-18 03:32 PM L:\Ejem Japon\Obtencion espectros.m 1 of 2

```

%Funcion predefinida.
%Obtención de archivo formato txt con el espectro de respuesta del registro
%de aceleración aplicado.

%inputs: 1-nombre del registro
%         2-amortiguamiento del sistema
%         3-intervalo entre datos del registro
Re=load('registro_2014_ms2_mod.txt');
bet=0.05;
Dt=0.01;

%Algoritmo de respuesta de aceleración (Newmark).
%Hay dos tipos: aceleracion promedio e interpolacion lineal
%ap---->beta=1/4 y gamma=1/2
%il---->beta=1/6 y gamma=1/2
beta=1/4;
gamma=1/2;
m=1;%[kg]
Tn=0.01:0.02:3;
Sa=zeros (length (Tn),2);
for i=1:length (Tn)
    w=2*pi/Tn(i);
    k=w.^2*m;%[kg/s2]
    c=2*m*bet*w;%[kg/s]
    Kg=m/(beta*(Dt)^2)+gamma*c/(beta*Dt)+k;%[kg/s2]
    a=m/(beta*Dt)+gamma*c/beta;
    b=m/(2*beta)+Dt*(gamma/(2*beta)-1)*c;
    d=zeros (length (Re),1);
    v=zeros (length (Re),1);
    ac=zeros (length (Re),1);
    for j=1:(length (Re)-1)
        DP=m*(Re (j+1,2)-Re (j,2))+a*v (j)+b*ac (j);
        Dd=DP/Kg;
        Dv=gamma/(beta*Dt)*Dd-gamma/beta*v (j)+Dt*(1-gamma/(2*beta))*ac (j);
        Dac=(1/(beta*(Dt)^2)*Dd-(1/(beta*Dt))*v (j)-(1/(2*beta))*ac (j));
        d (j+1)=d (j)+Dd;
        v (j+1)=v (j)+Dv;
        ac (j+1)=ac (j)+Dac;
    end
    Sa (i,1)=Tn (i);
    Sa (i,2)=max (abs (ac))/9.81;
end

save espectro_2014_mod.txt Sa -ASCII -TABS

```

b. Código comparación de espectros

05-01-18 03:46 PM L:\Ejem Japon\Comparacion espectros.m 1 of 1

```
registro1=load('espectro_2005_mod.txt');
registro2=load('espectro_2007_mod.txt');
registro3=load('espectro_2014_mod.txt');
registro4=load('EspectroNCh2369.txt');

Psa=zeros(length(registro1),2);
for j=1:length(Psa)
    Psa(j,1)=registro1(j,1);
    Psa(j,2)=(registro1(j,2)^2+registro2(j,2)^2+registro3(j,2)^2)/3)^0.5;
end

hold on
plot(registro1(:,1),registro1(:,2),'g')
plot(registro2(:,1),registro2(:,2),'m')
plot(registro3(:,1),registro3(:,2),'c')
plot(Psa(:,1),Psa(:,2),'black')
legend('Norma','Terremoto 2005','Terremoto 2007','Terremoto 2014','Promedio espectros')
hold off
```

B) Interacción Suelo-Estructura

Table 2-2a Elastic Solutions for Static Stiffness of Rigid Footings at the Ground Surface

Degree of Freedom	Pais and Kausel (1988)	Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)
Translation along z-axis	$K_{z, sur} = \frac{GB}{1-\nu} \left[3.1 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 1.6 \right]$	$K_{z, sur} = \frac{2GL}{1-\nu} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right]$
Translation along y-axis	$K_{y, sur} = \frac{GB}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.8 \left(\frac{L}{B} \right) + 1.6 \right]$	$K_{y, sur} = \frac{2GL}{2-\nu} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.65} \right]$
Translation along x-axis	$K_{x, sur} = \frac{GB}{2-\nu} \left[6.8 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right]$	$K_{x, sur} = K_{y, sur} - \frac{0.2}{0.75-\nu} GL \left(1 - \frac{B}{L} \right)$
Torsion about z-axis	$K_{zz, sur} = GB^3 \left[4.25 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.45} + 4.06 \right]$	$K_{zz, sur} = GJ_i^{0.75} \left[4 + 11 \left(1 - \frac{B}{L} \right)^{10} \right]$
Rocking about y-axis	$K_{yy, sur} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.73 \left(\frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right]$	$K_{yy, sur} = \frac{G}{1-\nu} (I_y)^{0.75} \left[3 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.15} \right]$
Rocking about x-axis	$K_{xx, sur} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[3.2 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.8 \right]$	$K_{xx, sur} = \frac{G}{1-\nu} (I_x)^{0.75} \left(\frac{L}{B} \right)^{0.25} \left[2.4 + 0.5 \left(\frac{B}{L} \right) \right]$

Notes:

Axes should be oriented such that $L \geq B$.
 I_i = area moment of inertia of soil-foundation contact,
 i denotes which axis to take the surface around.
 $J_i = I_x + I_y$ polar moment of inertia of soil-foundation contact surface.
 G = shear modulus (reduced for large strain effects, e.g., Table 2-1).

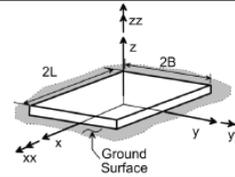


Table 2-2b Embedment Correction Factors for Static Stiffness of Rigid Footings

Degree of Freedom	Pais and Kausel (1988)	Gazetas (1991); Mylonakis et al. (2006)
Translation along z-axis	$\eta_z = \left[1.0 + \left(0.25 + \frac{0.25}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$	$\eta_z = \left[1 + \frac{D}{21B} \left(1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{A_w}{4BL} \right)^{0.75} \right]$
Translation along y-axis	$\eta_y = \left[1.0 + \left(0.33 + \frac{1.34}{1+L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.8} \right]$	$\eta_y = \left(1 + 0.15 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \left[1 + 0.52 \left(\frac{z_w A_w}{BL^2} \right)^{0.4} \right]$
Translation along x-axis	$\eta_x \approx \eta_y$	Same equation as for η_y , but A_w term changes for $B \neq L$
Torsion about z-axis	$\eta_{zz} = \left[1 + \left(1.3 + \frac{1.32}{L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^{0.9} \right]$	$\eta_{zz} = 1 + 1.4 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.9}$
Rocking about y-axis	$\eta_{yy} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + (L/B)^2} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$	$\eta_{yy} = 1 + 0.92 \left(\frac{d_w}{B} \right)^{0.6} \left[1.5 + \left(\frac{d_w}{D} \right)^{1.9} \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.6} \right]$
Rocking about x-axis	$\eta_{xx} = \left[1.0 + \frac{D}{B} + \left(\frac{1.6}{0.35 + L/B} \right) \left(\frac{D}{B} \right)^2 \right]$	$\eta_{xx} = 1 + 1.26 \frac{d_w}{B} \left[1 + \frac{d_w}{B} \left(\frac{d_w}{D} \right)^{0.2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right]$

Notes:

d_w = height of effective side wall contact (may be less than total foundation height)
 z_w = depth to centroid of effective sidewall contact
 A_w = sidewall-solid contact area, for constant effective contact height, d_w , along perimeter.
 For each degree of freedom, calculate $K_{emb} = \eta K_{sur}$

$$\text{Coupling Terms: } K_{emb,yx} = \left(\frac{D}{3} \right) K_{emb,x}$$

$$K_{emb,yy} = \left(\frac{D}{3} \right) K_{emb,y}$$

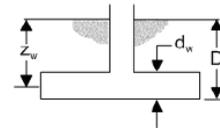


Table 2-3a Dynamic Stiffness Modifiers and Radiation Damping Ratios for Rigid Footings (adapted from Pais and Kausel, 1988)

Degree of Freedom	Surface Stiffness Modifiers	Radiation Damping
Translation along z-axis	$\alpha_z = 1.0 - \left[\frac{\left(0.4 + \frac{0.2}{L/B}\right) a_0^2}{\left(\frac{10}{1+3(L/B-1)}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_z = \left[\frac{4\psi(L/B)}{(K_{z,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$
Translation along y-axis	$\alpha_y = 1.0$	$\beta_y = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{y,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$
Translation along x-axis	$\alpha_x = 1.0$	$\beta_x = \left[\frac{4(L/B)}{(K_{x,sur}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$
Torsion about z-axis	$\alpha_{zz} = 1.0 - \left[\frac{\left(0.33 - 0.03\sqrt{L/B-1}\right) a_0^2}{\left(\frac{0.8}{1+0.33(L/B-1)}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)\left[(L/B)^3 + (L/B)\right] a_0^2}{\left(K_{zz,sur}/GB^3\right) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)^{0.75}}\right) + a_0^2\right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Rocking about y-axis	$\alpha_{yy} = 1.0 - \left[\frac{0.55a_0^2}{\left(0.6 + \frac{1.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B)^3 a_0^2}{\left(\frac{K_{yy,sur}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^2\right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$
Rocking about x-axis	$\alpha_{xx} = 1.0 - \left[\frac{\left(0.55 + 0.01\sqrt{L/B-1}\right) a_0^2}{\left(2.4 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2} \right]$	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4\psi/3)(L/B) a_0^2}{\left(K_{xx,sur}/GB^3\right) \left[\left(2.2 - \frac{0.4}{(L/B)^3}\right) + a_0^2\right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$
Notes:	Orient axes such that $L \geq B$. Soil hysteretic damping, β_s , is additive to foundation radiation damping, β . $a_0 = \omega B / V_s$; $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$	

Table 2-3b Dynamic Stiffness Modifiers and Radiation Damping Ratios for Embedded Footings (adapted from Pais and Kausel, 1988)

Degree of Freedom	Radiation Damping
Translation along z-axis	$\beta_z = \left[\frac{4\left[\psi(L/B) + (D/B)(1+L/B)\right]}{(K_{z,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_z} \right]$
Translation along y-axis	$\beta_y = \left[\frac{4\left[L/B + (D/B)(1+\psi L/B)\right]}{(K_{y,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_y} \right]$
Translation along x-axis	$\beta_x = \left[\frac{4\left[L/B + (D/B)(\psi + L/B)\right]}{(K_{x,emb}/GB)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_x} \right]$
Torsion about z-axis	$\beta_{zz} = \left[\frac{(4/3)\left[3(L/B)(D/B) + \psi(L/B)^3(D/B) + 3(L/B)^2(D/B) + \psi(D/B) + (L/B)^3 + (L/B)\right] a_0^2}{\left(\frac{K_{zz,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.4}{1+3(L/B-1)^{0.75}}\right) + a_0^2\right]} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{zz}} \right]$
Rocking about y-axis	$\beta_{yy} = \left[\frac{(4/3)\left[\left(\frac{L}{B}\right)\left(\frac{D}{B}\right) + \psi\left(\frac{D}{B}\right)\left(\frac{L}{B}\right) + \left(\frac{D}{B}\right)^3 + 3\left(\frac{D}{B}\right)\left(\frac{L}{B}\right) + \psi\left(\frac{L}{B}\right)^3\right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3}\right)\left(\frac{L}{B} + \psi\right)\left(\frac{D}{B}\right)^3}{\left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^2\right]} + \left(\frac{K_{yy,emb}}{GB^3}\right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{yy}} \right]$
Rocking about x-axis	$\beta_{xx} = \left[\frac{(4/3)\left[\left(\frac{D}{B}\right) + \left(\frac{D}{B}\right)^3 + \psi\left(\frac{L}{B}\right)\left(\frac{D}{B}\right)^3 + 3\left(\frac{D}{B}\right)\left(\frac{L}{B}\right) + \psi\left(\frac{L}{B}\right)\right] a_0^2 + \left(\frac{4}{3}\right)\left(\psi\frac{L}{B} + 1\right)\left(\frac{D}{B}\right)^3}{\left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3}\right) \left[\left(\frac{1.8}{1+1.75(L/B-1)}\right) + a_0^2\right]} + \left(\frac{K_{xx,emb}}{GB^3}\right)} \right] \left[\frac{a_0}{2\alpha_{xx}} \right]$
Notes:	Soil hysteretic damping, β_s , is additive to foundation radiation damping, β . $\alpha_{emb} = \alpha_{sur}$; from Table 2-3a $a_0 = \omega B / V_s$; $\psi = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$; $\psi \leq 2.5$