



*Sede "Camilo Cienfuegos"*  
*Facultad de Ciencias Técnicas*  
*Departamento de Construcciones*

## **EVALUACIÓN DE MESA DE CIMENTACIÓN PARA TURBO-GRUPO DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA "MÁXIMO GÓMEZ"**

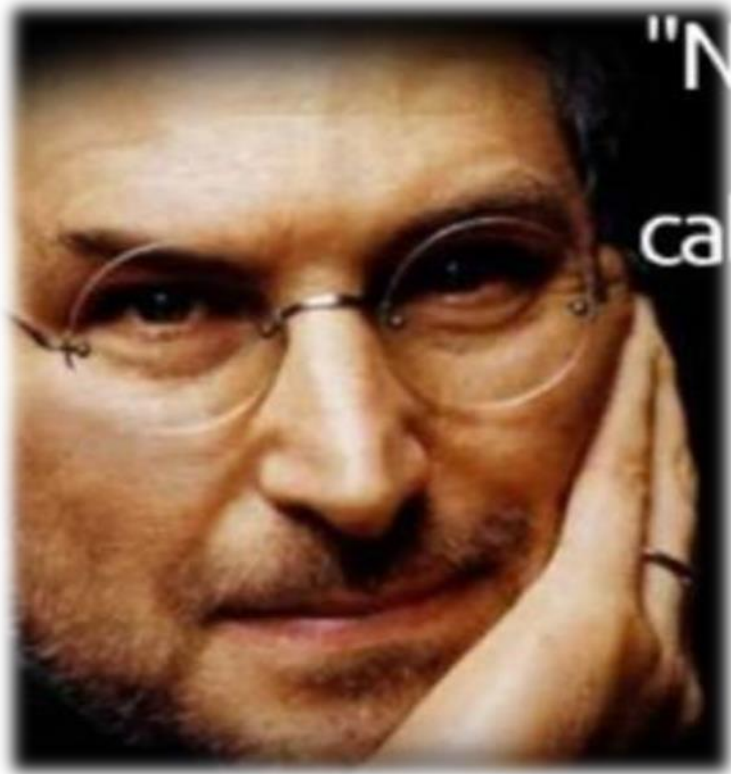
**Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil**

**Autor:** Gabriel Mayol Cabrera

**Tutor:** Lic. Ing. Pedro A. Hernández Delgado

*Matanzas, 2019*

## PENSAMIENTO



*“NO DEJES QUE EL RUIDO DE LAS OPINIONES DE LOS DEMÁS CALLEN TU PROPIA VOZ INTERIOR”*

*STEVE JOBS*

## DEDICATORIA

- A mis padres Nora Cabrera Galán y José J. Mayol Milián, quienes son mi ejemplo a seguir y me animan a conquistar mis mayores sueños.
- A mis hermanos Gabriela y Alejandro Mayol Cabrera por brindarme su cariño y apoyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A mi tutor el Lic. Ing. Pedro A. Hernández por su orientación y confianza.
- A mis padres y hermanos.
- A mi pareja
- A toda mi familia.
- A todos mis compañeros de estudio por ofrecerme su amistad y apoyo.
- A los ingenieros Javier García, Carlos Prado y Orlando Santos por toda su colaboración y ayuda.
- A los que de lejos siempre se mantuvieron cerca.

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Miembros del Tribunal:

---

Presidente

---

Secretario

---

Vocal

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

Por medio de la presente declare que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

## RESUMEN

La central termoeléctrica “Máximo Gómez” ubicada en el municipio Mariel, provincia Artemisa, es uno de los principales productores de energía eléctrica. Como parte del proceso de mejoramiento técnico se sustituirán algunos equipos como es el caso del turbo-grupo número 6, el cual se encuentra apoyado sobre una cimentación de tipo pórtico de hormigón armado, por lo que se hace necesario el estudio de este elemento para determinar si puede continuar cumpliendo con su función. Para este estudio se realiza la modelación numérica en el software SAP2000 teniendo en cuenta parámetros como su geometría, materiales, condiciones de apoyo, cargas y suelos. Las vibraciones que se generan en la estructura producto al funcionamiento de la máquina, tienen influencia en la misma. Luego del procesamiento de los datos y el análisis dinámico de la cimentación, se demuestra que las condiciones de vibración de la mesa cumplen con los requerimientos para este tipo de maquinarias.

**Palabras claves:** Cimentación; modelación; vibraciones; maquinarias.

## **ABSTRACT**

The thermoelectric power station "Máximo Gómez" located in the Mariel municipality, in province Artemisa is one of the main producers of electricity. As part of the process of technical improvement, some equipment will be substituted, as is the case of the turbo-group number 6 which is supported on a reinforced concrete gantry type foundation, therefore, it is necessary to study this element to determine if it can continue fulfilling its function. For this study, numerical modeling is carried out in the SAP2000 software taking into account parameters, its geometry, materials, support conditions, sections, loads and soil. The vibrations that are generated in the structure have an influence in the machine. After the evaluation of the data and the dynamic analysis of the foundation, whose result shows that the vibration conditions of the foundation the requirements for this type of machinery.

**Keywords:** Foundation; modeling; vibrations; machinery.



## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Capítulo 1 Estado de arte y conocimiento .....	5
1.1 Maquinarias .....	5
1.1.1 Velocidad de operación.....	5
1.1.2 Medición y evaluación de las vibraciones .....	6
1.1.3 Criterio de diseño.....	7
1.2 Cimentaciones.....	8
1.3 Vibraciones .....	10
1.3.1 Importancia de las vibraciones.....	11
1.3.2 Efectos más frecuentes de vibraciones en los turbo-grupo.....	12
1.3.3 Tipos de vibraciones .....	12
1.4 Grados de libertad.....	15
1.5 Normas.....	17
1.6 Análisis <i>steady-state</i> o estado estable .....	19
1.7 Método de elementos finitos.....	19
1.8 Concepción general de la modelación .....	19
1.9 Software para la modelación.....	20
Capítulo 2 Materiales y métodos .....	23
2.1 Proceso de dimensionamiento.....	23
2.2 Características de la máquina.....	30
2.3 Parámetros para modelar.....	31
2.3.1 Modelo geométrico .....	31
2.3.2 Modelo del material .....	31
2.3.3 Modelo del suelo.....	32
2.3.4 Cargas .....	32
2.4 Mallado.....	34
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	45
3.1 Análisis del dimensionamiento .....	45
3.2 Análisis de la estructura .....	51
3.3 Análisis de las vibraciones .....	55
3.3.1 Análisis de los puntos críticos.....	57
Conclusiones .....	62
Recomendaciones .....	63
Referencias Bibliográficas .....	64

## INTRODUCCIÓN

El interés en la vibración surge cuando se crean los primeros instrumentos musicales, probablemente silbatos o tambores. Desde entonces, tanto músicos como filósofos han buscado las reglas y las leyes de la producción del sonido y las han utilizado para mejorar los instrumentos musicales, transmitiéndolas de generación en generación. Ya en el año 4000 a.C. la música había alcanzado un alto nivel de desarrollo y era muy apreciada por chinos, hindúes, japoneses y, quizás, los egipcios. Estos pueblos antiguos observaron ciertas reglas definidas que de alguna manera estaban relacionadas con el arte de la música, aunque su conocimiento no llegó a nivel de ciencia (Vázquez, 2018).

Desde la antigüedad los sabios enfocaron el estudio de las vibraciones a los fenómenos naturales y el desarrollo de teorías matemáticas para describir la vibración en sistemas físicos. Actualmente, este tema es pertinente, debido a la influencia que puede tener en estudios de ingeniería, por lo que ha motivado a investigadores, entre otras, a diseño de cimentaciones, estructuras, turbinas y motores (Vázquez, 2018).

La vibración puede considerarse como el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio. Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos; desalineación en acoplamientos; engranajes desgastados o dañados; rodamientos deteriorados; fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, y problemas eléctricos. Estas causas, como se puede suponer, son fuerzas que cambian de dirección o de intensidad, estas fuerzas son debidas al movimiento rotativo de las piezas de la máquina, aunque cada uno de los problemas se detecta con el estudio de las características de vibración (Ferrández, 2016).

Una central termoeléctrica es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, normalmente mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica a partir de un proceso que comprende grandes maquinarias como los turbogeneradores.

El diseño de cimentación para máquinas, es más complejo que una cimentación que soporta solamente cargas estáticas. En la cimentación de máquinas el diseñador debe considerar, aparte de las cargas estáticas, las fuerzas dinámicas ocasionadas por la operación de la máquina la cual genera fuerzas y momentos dinámicos desbalanceados y esto hace necesarios procedimientos especiales de diseño de estructuras de cimentación (Peña, 2016).

La generación de energía eléctrica constituye un pilar fundamental hoy en día para la población, para su generación es necesario el uso de estructuras que garanticen la estabilidad y funcionamiento de turbo-grupos, los cuales se presentan con combinaciones de carga estáticas y dinámicas debido a los movimientos rotativos de la turbina.

Resulta de gran importancia la modelación estructural de mesas de cimentación para turbo-grupo que garanticen la estabilidad de las maquinarias, así como de la base. Por lo que se hace necesario un diseño correcto de la mesa de cimentación para el turbo-grupo número 6 de la central termoeléctrica “Máximo Gómez”, en la incorporación de las nuevas maquinarias, para que garantice que no existan roturas en las mismas que pueden afectar a la población y a la economía del país.

**Situación problemática:** Debido al proceso de modernización del turbo-grupo de la central termoeléctrica “Máximo Gómez” es necesario conocer si la base existente es apta para los requerimientos de la nueva maquinaria.

**Problema científico:** La incorporación de un turbo-grupo en la central termoeléctrica “Máximo Gómez” supone de una evaluación de las vibraciones de la mesa de cimentación para conocer si la estructura es apta para el nuevo equipo.

**Objeto de estudio:** Modelación numérica de la base del turbo-grupo número 6 de la central termoeléctrica “Máximo Gómez”.

**Campo de acción:** Se enfoca en la revisión de bases para turbo-grupos en centrales eléctricas.

**Hipótesis:** Si se realiza el modelo numérico para la comprobación bajo cargas dinámicas producto al emplazamiento de los nuevos equipos de la base de cimentación para el turbo-grupo número 6 de la central termoeléctrica “Máximo Gómez”, se podrá determinar si la estructura cumple con los requerimientos de vibraciones de la máquina.

**Variables de la investigación:**

**Variable independiente:** Modelo numérico de la mesa de cimentación.

**Variable dependiente:** Análisis de las vibraciones en la mesa de cimentación.

**Objetivo general:** Evaluar las vibraciones de la mesa de cimentación de la central termoeléctrica “Máximo Gómez” para el nuevo turbo-grupo mediante la modelación numérica.

**Objetivos específicos:**

- Analizar el estado del arte y la práctica en el diseño de mesas de cimentación de hormigón armado para turbogeneradores.
- Describir parámetros y procedimientos para modelar numéricamente la estructura de la base del turbo-grupo de la central termoeléctrica “Máximo Gómez”.
- Evaluar las vibraciones de la mesa de cimentación del turbo-grupo de la central termoeléctrica “Máximo Gómez” a partir del comportamiento del modelo numérico.

**Tareas de la investigación**

- Análisis del estado del arte para el diseño de mesas de cimentaciones de hormigón armado para turbogeneradores.
- Obtención de los datos de la maquinaria
- Obtención de los datos de la mesa de cimentación.
- Evaluación del dimensionamiento
- Modelación numérica de la base del turbo-grupo de la central termoeléctrica “Máximo Gómez”.
- Análisis de las vibraciones de la base.

Se emplean como métodos de investigación, los métodos empíricos, a través del análisis documental de información recopilada, y empírico experimental como la observación de los fenómenos del objeto estudiado; se tienen en cuenta además los métodos teóricos como análisis-síntesis, donde se relacionan las partes analizadas, producto de los resultados obtenidos en la búsqueda documental; el método inducción-deducción, el cual posibilita la conformación empírica de la hipótesis; y el método histórico-lógico, donde, de forma ilustrativa, se realizan modelaciones del estudio en cuestión.

**Resultados esperados:**

Un modelo numérico que permita estudiar el comportamiento vibracional de la base del turbo-grupo número 6 de la central termoeléctrica “Máximo Gómez”.

**Estructura de la tesis:**

Capítulo 1: Fundamentación teórica. Este capítulo posibilita justificar el desarrollo de la investigación. Se expone los antecedentes y el estado actual del tema de la modelación y diseño de cimentaciones de maquinarias y se establecen conceptos básicos según los materiales recopilados.

Capítulo 2: Definición de parámetros para la modelación. Se puntualizan los parámetros determinantes en el comportamiento estructural de la base de maquinarias, tales como la geometría del modelo, las características de los materiales a utilizar, el mallado, las cargas y el suelo, también se definen los parámetros que debieron cumplirse de acuerdo al proyecto original en cuanto a dimensionamiento.

Capítulo 3: Análisis de los resultados alcanzados, para comprobar si las vibraciones generadas en la estructura, son aptas para el correcto funcionamiento de la máquina.

Conclusiones.

Recomendaciones.

Bibliografía.

## **CAPÍTULO 1 ESTADO DE ARTE**

Las vibraciones son de gran importancia para el estudio del comportamiento de las estructuras, fundamentalmente para aquellas que sostienen maquinarias pesadas con motores y turbinas. A la hora del diseño y revisión de las estructuras es necesario tener en cuenta el efecto de las mismas, debido a que factores como las frecuencias de excitación y amplitud de fuerza pueden conllevar a fallas tanto en la estructura como en la maquinaria. En el presente capítulo se abordan temas para el aporte al lector del estado del conocimiento acerca de las temáticas de la investigación, donde se resaltan las directrices en el campo de las cimentaciones para este tipo de maquinarias y la modelación.

### **1.1 Maquinarias**

Una máquina es un conjunto de piezas o elementos móviles y fijos, cuyo funcionamiento posibilita aprovechar, dirigir, regular o transformar energía o realizar un trabajo. Es un aparato creado para aprovechar, regular o dirigir la acción de una fuerza. Estos dispositivos pueden recibir cierta forma de energía y transformarla en otra para generar un determinado efecto. Pueden realizarse diferentes clasificaciones de equipo dinámico, depende del aspecto bajo el cual se las considere. Atendiendo a nuestros intereses se pueden realizar las siguientes clasificaciones (Peña, 2016):

- Velocidad de operación.
- Medición y evaluación de vibraciones.
- Criterios de diseño.

#### **1.1.1 Velocidad de operación**

Basadas en su frecuencia de operación, las máquinas pueden ser clasificadas en tres categorías (Peña, 2016).

- Frecuencias bajas a medias 0 – 500 rpm
- Frecuencias medias a altas 500 – 1000 rpm
- Frecuencias muy altas > 1000 rpm

El primer grupo se compone de grandes motores alternativos, compresores y ventiladores de gran tamaño. Los motores alternativos suelen operar a frecuencias que van de 50-250 rpm. Para este grupo, las cimentaciones de tipo bloque con gran superficie de contacto con el suelo son adoptadas generalmente (Peña, 2016).

El segundo grupo consta de motores alternativos de tamaño medio, tales como motores a diesel y de gas. Cimentaciones tipo bloque que descansan sobre resortes o adecuadas camas elásticas, son generalmente sugeridos para este grupo, a fin de mantener las frecuencias naturales de la cimentación considerablemente por debajo de la frecuencia de operación (Peña, 2016).

El tercer grupo incluye los motores de combustión interna a gran velocidad, motores eléctricos y equipos turbogeneradores. Donde son usadas cimentaciones de bloque macizo. Es deseable que exista poco contacto con la superficie y adecuada aislación con camas elásticas, para reducir las frecuencias naturales. Turbo maquinaria requieren cimentaciones tipo pórtico, en las cuales es necesario acomodar el equipo auxiliar entre las columnas (Peña, 2016).

### **1.1.2 Medición y evaluación de las vibraciones**

Para Martínez (2003), el medidor de vibración se utiliza para la medición de vibraciones y oscilaciones en muchas máquinas e instalaciones o para el desarrollo de productos (desde componentes a herramientas). La medición en sí misma aporta los siguientes parámetros: aceleración de vibración, velocidad de vibración y desviación de vibración.

En los casos de máquinas de movimiento alternativo con componentes tanto rotativos como alternativos (motores a diesel y ciertos tipos de bombas y compresores) la vibración se mide normalmente en la estructura principal de la máquina a bajas frecuencias.

Para máquinas rotativas con rotores flexibles (grandes generadores de turbina de vapor, bombas multi-etapa y compresores). La máquina puede vibrar de acuerdo con más de un modo de vibración según pasa por una o más de sus velocidades críticas hasta alcanzar la velocidad correspondiente al régimen de servicio. En este tipo de máquinas, la medida de la amplitud de vibración en un elemento de la estructura puede no ser indicativa del estado vibracional del rotor. Por ejemplo, un rotor flexible puede experimentar desplazamientos en vibración de gran amplitud que den lugar a un rápido fallo de la

máquina, aunque el nivel de vibración medido en la tapa del cojinete resulte ser muy pequeño. En estos casos, por tanto, puede resultar esencial medir directamente la vibración en el eje (Martínez, 2003).

Para máquinas rotativas con rotores semi-rígidos (turbinas de vapor de baja presión, compresores de flujo axial y ventiladores) el tipo de rotor flexible que les caracteriza permite que la medida de amplitud de vibración en la tapa del cojinete resulte indicativa de la vibración del eje (Martínez, 2003).

### **1.1.3 Criterio de diseño**

Se llama máquinas de impacto a aquellas que producen fuerzas de muy corta duración en comparación con los intervalos a los que se repiten. En estas máquinas se puede considerar que los efectos de un pulso ya han cesado cuando se presenta el siguiente, por lo que sólo requieren del análisis para un impacto. Como ejemplo podemos citar los martillos mecánicos, prensas, taladros, etc. Las máquinas de impacto más importantes son los martillos mecánicos. La acción del martillo sobre el yunque puede ser descrita por la forma del pulso que define la fuerza en el tiempo. La descripción del pulso se solicitará al fabricante del equipo (Flores, 2012).

Dentro de las máquinas que producen fuerzas periódicas se incluyen las máquinas rotativas y las máquinas alternantes. Las solicitaciones producidas por máquinas rotatorias deben calcularse a partir de posibles desbalances debidos al desgaste de piezas de la maquinaria. En las máquinas alternantes deben tomarse en cuenta las fuerzas primaria y secundaria. Para ambos tipos de máquinas, la descripción de las solicitaciones debe tratarse de obtener directamente del fabricante del equipo. Como ejemplo podemos citar los compresores (Flores, 2012).

Según Flores (2012), las máquinas de alta velocidad, a las que se refiere colectivamente como "turbo-máquinas", pueden ser clasificadas según su finalidad, de la forma siguiente:

- Los turbo-generadores que producen energía eléctrica.
- Turbo-compresores rotativos y turbo-ventiladores que entregan aire comprimido u otros gases.
- Turbo-bombas rotativas.



Las turbinas y equipos auxiliares tienen, en la mayoría de los casos, un eje común y por lo tanto la misma velocidad. A veces, sin embargo, un engranaje de reducción se ha instalado entre la turbina y el equipo auxiliar. La velocidad de los ventiladores rotativos y bombas pueden depender de la demanda y varían entre límites bastante amplios.

Existen otras máquinas categorizadas como misceláneas que ciertamente inducen muy pequeñas fuerzas dinámicas, las cuales pueden ser colocadas directamente sobre el piso sin cimentaciones especiales (Flores, 2012).

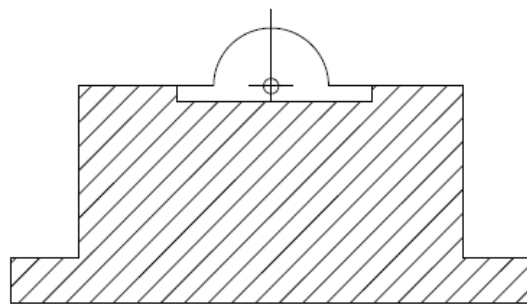
## 1.2 Cimentaciones

A lo largo del mundo en el proceso industrial y los medios industriales se usan cimentaciones para el equipo estático. El término "equipo estático" se refiere al equipo industrial que no contiene partes que desplacen largas distancias o que sus características operacionales son esencialmente estáticas en la naturaleza. Según la rigidez, las estructuras de cimentación para maquinaria se pueden clasificar en cuatro tipos (Flores, 2012):

- Tipo bloque
- Tipo caja
- Tipo muro
- Tipo pórtico

### Tipo bloque

El tipo bloque consiste en un bloque macizo o con huecos generalmente de hormigón reforzado que soporta a la máquina en su parte superior como se muestra en la figura 1.1. Para fines de análisis puede ser considerado como un cuerpo rígido (López, 2010).



*Figura 1.1 Cimentación tipo bloque.*

*Fuente: (Rodríguez, 1991)*

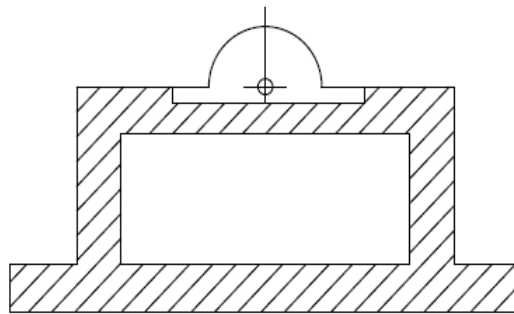
López (2010) plantea las hipótesis básicas para el análisis de cimentaciones tipo bloque para máquinas de impacto expuesto a continuación.

Se supone que el yunque y el bloque son cuerpos rígidos y que el yunque se ha colocado sobre el bloque de tal manera que el centro de masas del conjunto yunque-bloque se aloja sobre la vertical que pasa por el centro de rigidez vertical de la cimentación. Se supone también que la caída del martillo es a lo largo de esta vertical, con lo que no se presenta excentricidad en el choque y por lo tanto no hay acoplamiento de las vibraciones verticales con ningún otro tipo de vibración.

La hipótesis básica para el análisis de cimentaciones tipo bloque para máquinas de fuerzas periódicas supone que la máquina y el bloque se encuentran rígidamente unidos. Para modelar una cimentación de este tipo puede aceptarse que el sistema máquina-bloque forma un solo cuerpo rígido y que el bloque descansa sobre resortes y amortiguadores de tipo viscoso. Se supone, además, que el centro de masa del conjunto bloque-máquina se aloja sobre la vertical que contiene al centro de rigidez vertical y horizontal del suelo (López, 2010).

#### Tipo caja

Para autores como Flores (2012), el cimiento tipo caja consiste en un bloque hueco de hormigón armado que soporta a la máquina en su parte superior.

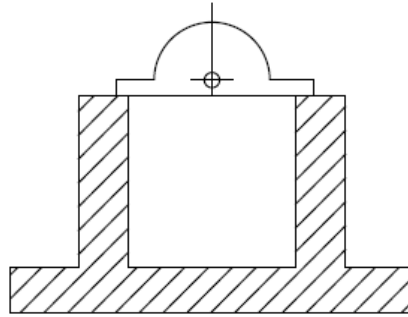


*Figura 1.2 Cimentación tipo caja (Rodríguez, 1991)*

*Fuente: (Rodríguez, 1991)*

#### Tipo muro

El tipo muro consiste en un par de muros de hormigón armado que aloja a la máquina en su parte superior (López, 2010).

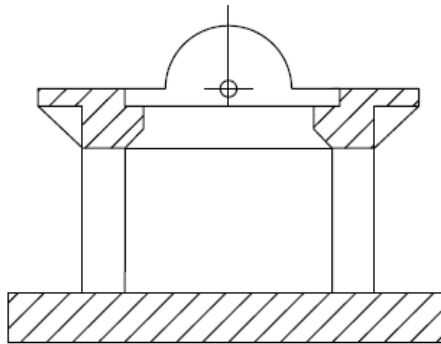


*Figura 1.3 Cimentación tipo muro (Rodríguez, 1991)*

*Fuente: (Rodríguez, 1991)*

#### Tipo pórtico

En general, una cimentación de tipo pórtico está formada por una pesada losa de cimentación apoyada en el terreno o en pilotes, en la cual se apoyan una serie de columnas. Las columnas están unidas en sus extremos superiores por vigas transversales y longitudinales que forman pórticos en ambas direcciones. Sobre las vigas hay una losa con huecos que soporta la turbina y el generador. El condensador generalmente va abajo de la turbina, apoyado sobre la losa de cimentación (López, 2010).



*Figura 1.4 Cimentación tipo pórtico (Rodríguez, 1991)*

*Fuente: (Rodríguez, 1991)*

### **1.3 Vibraciones**

En estudios acerca del tema como los de Zetina (2011) plantean que la vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación, normalmente con el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y más pequeña que la referencia. Es el resultado de fuerzas dinámicas en las máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variables. Las diferentes partes de la máquina vibran con distintas frecuencias y amplitudes. Una vibración puede describirse como el movimiento de un cuerpo sólido alrededor de una posición de equilibrio, sin que se produzcan desplazamientos (neto) del mismo.

#### **1.3.1 Importancia de las vibraciones**

Resulta necesario el estudio de las vibraciones, pues todas las estructuras diseñadas para soportar máquinas centrífugas pesadas como motores y turbinas, o máquinas reciprocantes como motores de vapor y de gasolina, se ven sometidas a vibración. En todas estas situaciones, el componente de la estructura o máquina sometido a vibración puede fallar debido a fatiga del material producida por la variación cíclica del esfuerzo inducido (Rao, 2012).

Para López (2010), todas las estructuras mecánicas son susceptibles de experimentar problemas de vibraciones (resonancia), dentro de los aspectos que se derivan de los mismos se encuentra que:

- Los esfuerzos dinámicos producidos por las vibraciones, además de ser alternativos, pueden ser varias veces mayores que los esfuerzos estáticos.
- Los problemas de vibración generalmente se traducen en altos costos de operación y mantenimiento debido al desgaste prematuro y/o la falla.
- Un sistema mecánico bien diseñado puede vibrar en un rango específico sin producir mayores problemas.
- Las mediciones de vibración pueden dar información sobre la condición de los equipos y pueden ayudar a diagnosticar o evitar una falla.

### **1.3.2 Efectos más frecuentes de vibraciones en los turbo-grupo**

Un cambio en la forma de comportarse las vibraciones, de manera diferente a lo usual, es síntoma de que ha ocurrido una alteración en la instalación que puede ser el inicio de una avería mayor.

Según (López, 2010), se relacionan los defectos que suelen suceder con mayor frecuencia en el proceso de operación:

- Inestabilidad térmica de los rotores a causas del material.
- Disminución de la rigidez del sistema rotor-apoyos-cimientos.
- Defectos en la dilatación térmica.

### **1.3.3 Tipos de vibraciones**

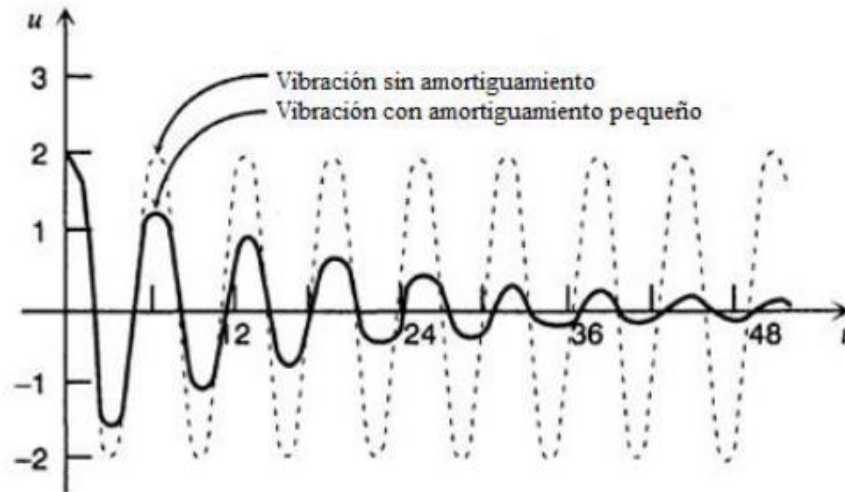
Las vibraciones pueden ser clasificadas de diferentes tipos entre ellos se encuentran las que a continuación se exponen.

- Vibración lineal y no lineal

Si todos los componentes básicos de un sistema vibratorio, el resorte, la masa y el amortiguador, se comportan linealmente, la vibración resultante se conoce como vibración lineal. Pero si cualquiera de los componentes básicos se comporta de manera no lineal, la vibración se conoce como vibración no lineal (Rao, 2012).

- Vibración no amortiguada y amortiguada.

Según Rao (2012) si no se pierde o disipa energía por fricción u otra resistencia durante la oscilación, la vibración se conoce como vibración no amortiguada. Sin embargo, si se pierde energía se llama vibración amortiguada como se muestra en la figura 1.4. En muchos sistemas físicos, la cantidad de amortiguamiento es tan pequeña que puede ser ignorada en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, la consideración del amortiguamiento se vuelve extremadamente importante al analizar sistemas vibratorios próximos a la resonancia.



*Figura 1.5 Amortiguamiento*

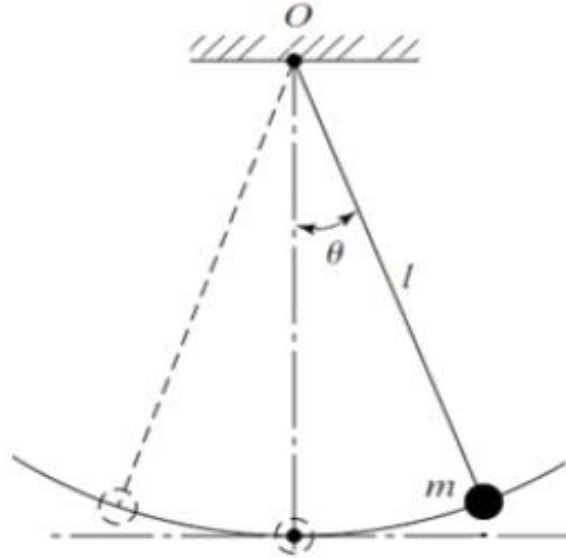
*Fuente: (Vázquez, 2018)*

- Vibración libre o forzada

La vibración se puede clasificar de varias maneras. Algunas de las clasificaciones importantes son las siguientes:

**Vibración libre:** Si se deja que un sistema vibre por sí mismo después de una perturbación inicial, la vibración resultante se conoce como vibración libre. Ninguna fuerza externa actúa en el sistema. La oscilación de un péndulo simple es un ejemplo de vibración libre mostrado en la figura 1.5 (Vázquez, 2018).

**Vibración forzada:** Si un sistema se somete a una fuerza externa (a menudo, una fuerza repetitiva), la vibración resultante se conoce como vibración forzada. La oscilación que aparece en máquinas como motores diesel es un ejemplo de vibración forzada (Vázquez, 2018).



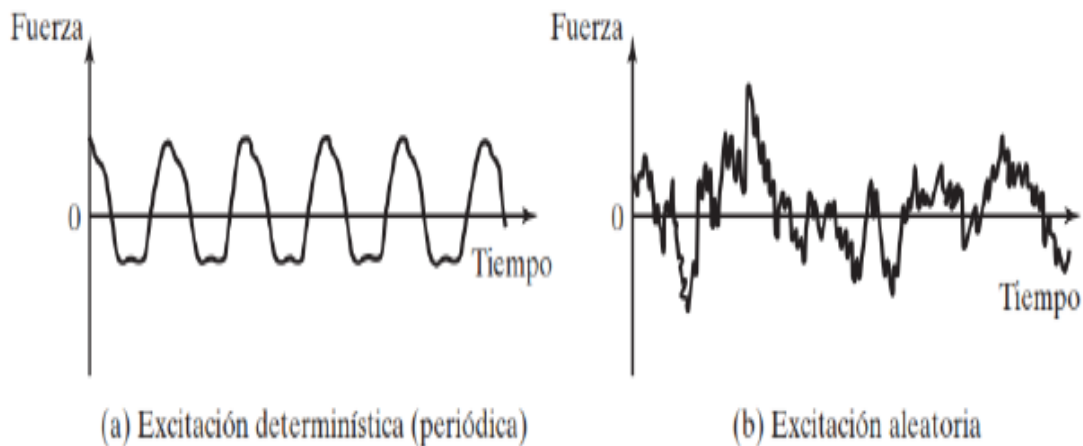
*Figura 1.6 Péndulo simple*

*Fuente: (Vázquez, 2018)*

- Vibración determinística y vibración no determinística

Si el valor o magnitud de la excitación (fuerza o movimiento) que actúa en un sistema vibratorio se conoce en cualquier tiempo dado, la excitación se llama determinística. En algunos casos la excitación es no determinística o aleatoria; el valor de la excitación en un momento dado no se puede pronosticar. En estos casos, una recopilación de registros de la excitación puede presentar cierta regularidad estadística (Vázquez, 2018).

Es posible estimar promedios como los valores medios o medios al cuadrado de la excitación. Ejemplos de excitaciones aleatorias son la velocidad del viento, la aspereza del camino y el movimiento de tierra durante sismos. Si la excitación es aleatoria, la vibración resultante se llama vibración aleatoria. En este caso la respuesta vibratoria del sistema también es aleatoria; se puede describir sólo en función de cantidades estadísticas. La figura 1.6 muestra ejemplos de excitaciones determinísticas y aleatorias (Rao, 2012).



*Figura 1.7 Excitación determinística y aleatoria*

*Fuente: (Rao, 2012)*

#### **1.4 Grados de libertad**

El número de grados de libertad de un cuerpo es el número de coordenadas independientes necesarias para especificar de forma única la posición de ese cuerpo respecto a un sistema de referencia dado. De forma similar, diremos que el mínimo número de coordenadas necesarias para especificar de forma única las posiciones de todos los componentes de un sistema de cuerpos rígidos, es el número de grados de libertad del sistema (Oliver, 2019).

El número de grados de libertad, necesarios para el análisis vibratorio mecánico, es el número de coordenadas cinemáticamente independiente, que especifican el movimiento de cada partícula contenida en el sistema; el número de grados se determina por:

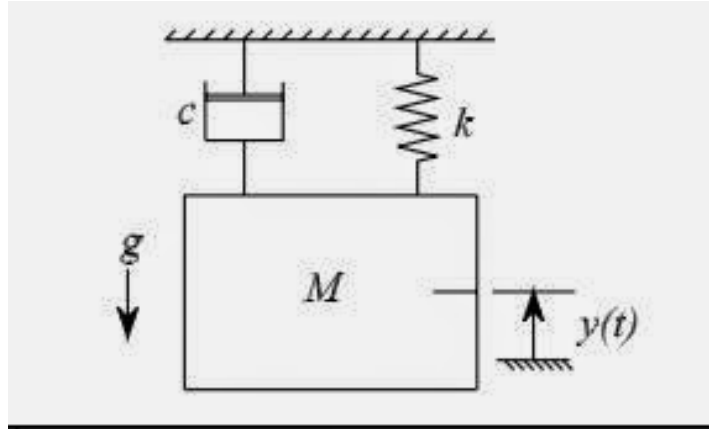
No. G.L. = No. De masas X No. de posibles movimientos de cada masa (Oliver, 2019).

- Sistema de un grado de libertad.

La variable que determina la posición del sistema se denomina “y”, es en general una función del tiempo, denotada por  $y(t)$ . En estos sistemas, existe un elemento másico o de inercia que se supone que es totalmente rígido y que no disipa energía, existen también un elemento elástico, un resorte, que se supone de masa despreciable y que tampoco disipa energía, finalmente, en el sistema, existe un elemento disipador de energía, un



amortiguador, que se supone de masa despreciable y totalmente rígido como se muestra en la figura 1.7 (Enrique, 2011).



*Figura 1.8 Sistema de un grado de libertad*

*Fuente: (Rao, 2012).*

- Sistema de 2 grados de libertad.

Requiere de dos coordenadas cinemáticamente independientes para definir completamente su configuración; para cada coordenada se pueden escribir dos ecuaciones de movimiento, una para cada grado de libertad. Esas dos ecuaciones generalmente se presentan en forma de ecuaciones diferenciales acopladas, en cada ecuación se involucran las dos coordenadas independientes (Enrique, 2011).

Si se suponen soluciones armónicas para cada ecuación de movimiento, se obtienen 2 frecuencias naturales. La configuración de un sistema se especifica por un grupo de coordenadas independientes (una longitud, un ángulo o 2 longitudes). A los grupos de coordenadas utilizadas se llama coordenadas generalizadas, estas ecuaciones están normalmente acopladas, pero se puede encontrar ecuaciones que contengan sólo una coordenada. Al grupo de coordenadas de las ecuaciones acopladas se llaman coordenadas principales (Enrique, 2011).

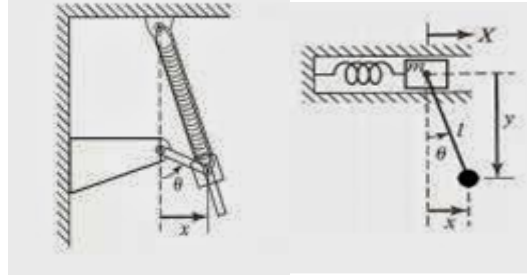


Figura 1.9 Sistema de dos grados de libertad

Fuente: (Rao, 2012)

- Sistema de varios grados de libertad.

En realidad, las estructuras son modelos continuos y como tales, poseen un número infinito de grados de libertad. Los métodos analíticos existentes que describen el comportamiento dinámico de las estructuras continuas, son bastantes complejos, debido a que requieren análisis matemático considerable, como la solución de ecuaciones diferenciales parciales y además son aplicables solo a estructuras reales simples (Oliver, 2019).

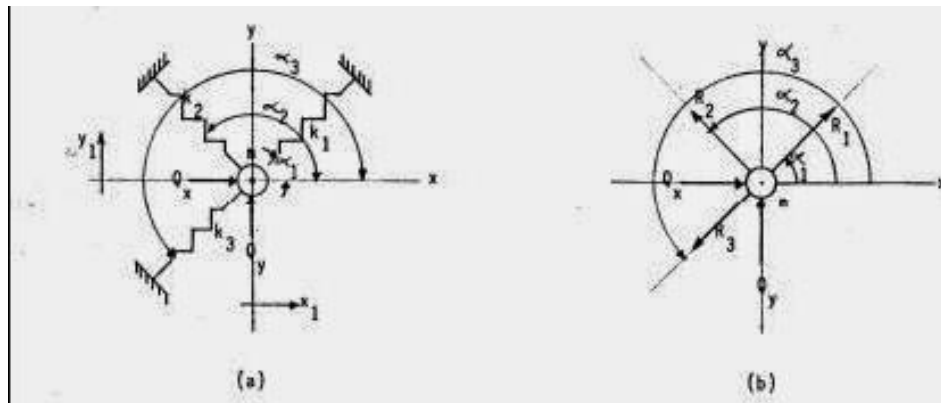


Figura 1.10: Sistema de varios grados de libertad

Fuente: (Rao, 2012)

## 1.5 Normas

Los estándares o normas son documentos establecidos por consensos y aprobados por un organismo reconocido que provee para el uso común y repetitivo, reglas, directrices, o características para actividades o sus resultados dirigidos a alcanzar el nivel óptimo de orden en un concepto dado.

Los estándares para la medición y evaluación de la severidad de la vibración son clasificados en dos tipos:

- Estándares para los ensayos de la aceptación de las máquinas.
- Estándares para el monitoreo de la vibración durante la operación de las máquinas.

La tabla 1.1 resume las diferentes partes en que se desglosan las normas ISO 7919 e ISO 10816 respectivamente.

*Tabla 1.1: Desglose en partes de las normas ISO 7919 e ISO 10816.*

Series ISO 7919: “Vibración de máquinas no-recíprocas. Mediciones realizadas en los ejes rotatorios”	
7919-1	Guías generales
7919-2	Turbinas de vapor y generadores fijos a la tierra sobre 50 MW con velocidades de rotación de 1500, 1800, 3000 y 3600cpm.
7919-3	Máquinas industriales acopladas
7919-4	Conjuntos de turbinas de gas
7919-5	Conjuntos de máquinas hidráulicas que generan potencia y bombean fluido.
Series ISO 10816: “Vibración mecánica. Evaluación de la vibración de máquinas en base a su medición en partes no-rotatorias de ella”	
108106-1	Guías generales.
108106-2	Turbinas de vapor y generadores fijos a la tierra sobre 50 MW con velocidades de rotación de 1500, 1800, 3000 y 3600 cpm.
108106-3	Máquinas industriales con frecuencia nominal sobre 15 kW y velocidades nominales entre 120 y 15000 cpm. Cuando se mide en terreno.

108106-4	Conjuntos de turbina de gas excluyendo las aeronaves.
108106-5	Conjunto de máquinas hidráulicas que generan potencia y bombean fluido
108106-6	Máquinas recíprocas con potencia nominal sobre 100 kW
108106-7	Bombas roto-dinámicas para la aplicación industrial

*Fuente: (ISO Standards for Evaluation of Vibration Severity, 2009)*

### **1.6 Análisis *steady-state* o estado estable**

Este procedimiento también es un análisis de perturbación lineal, quiere decir que está dentro del rango elástico lineal, utilizado en este caso para una excitación armónica. El análisis *Steady State Dynamics Modal* obtiene las máximas amplitudes de la respuesta en el estado estacionario de la estructura para una carga dinámica aplicada y a diferentes frecuencias, es decir, realiza un barrido de frecuencias para una carga aplicada a diferentes frecuencias; para ello utiliza los valores de las frecuencias propias por ello se denomina Modal (Lázaro, 2015).

### **1.7 Método de elementos finitos**

Según Frías (2014), el método de los elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que el continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos. Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos donde el comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma (Frías, 2014)

### **1.8 Concepción general de la modelación**

La modelación juega un papel fundamental como medio de solución de problemas existentes en el campo de la ingeniería. Por tal motivo, el desarrollo y utilización de los modelos para sistemas en general es una de las tareas científicas más importantes a

desarrollar en la actualidad. Los modelos y los métodos de modelación se convierten por tanto en importantes herramientas de trabajo (Vázquez, 2018).

Se define la modelación como el método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual se estudiará este, pero no como tal, sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el que, desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real que se estudie. Es decir, es el método que opera de forma práctica o teórica como un “objeto”, no de forma directa, sino utilizando cierto sistema auxiliar (natural o artificial) el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el “objeto” modelado y está en condiciones de sustituir el “objeto” que se estudia en determinadas etapas de la investigación, permitiendo obtener información susceptible de comprobaciones experimentales (Recarey, 1999).

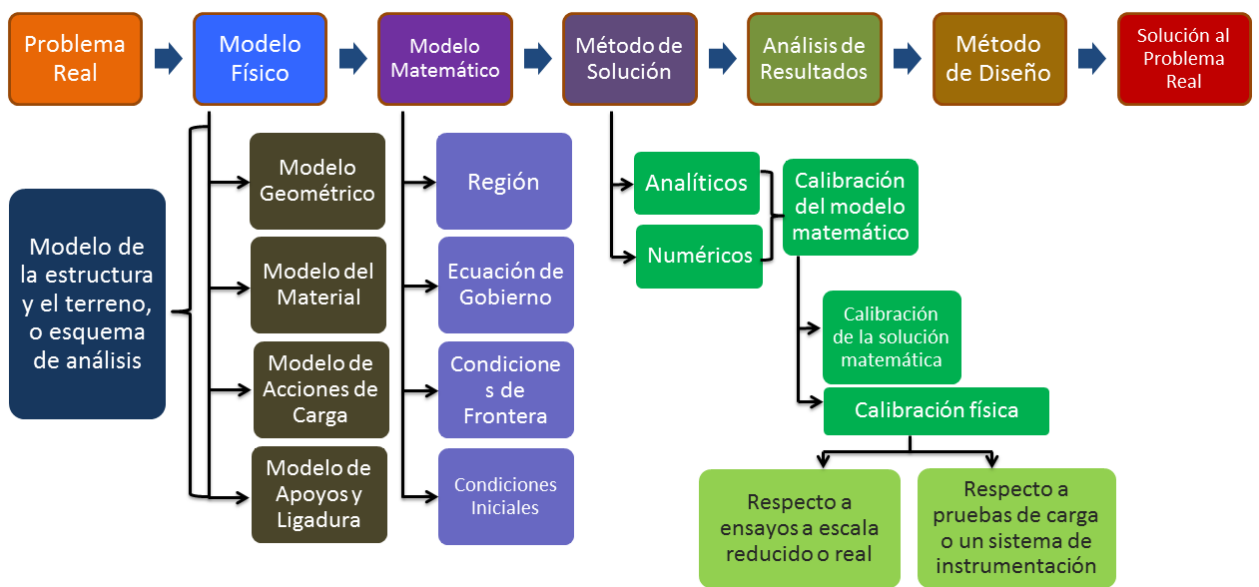


Figura 1.11 Esquema de proceso de modelación

Fuente: (García, 2015)

### 1.9 Software para la modelación

El SAP2000 es un programa de elementos finitos, con interfaz gráfico 3D orientado a objetos, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, la modelación, análisis y

dimensionamiento de los diferentes problemas de ingeniería de estructuras (García, 2016).

Conocido por la flexibilidad en el tipo de estructuras que permite analizar, por su poder de cálculo y por la fiabilidad de los resultados, SAP2000 es la herramienta de trabajo diaria para varios ingenieros. La versatilidad en modelar estructuras, permite su utilización en el dimensionamiento de puentes, edificios, estadios, presas, estructuras industriales, estructuras marítimas y todo tipo de infraestructura que necesite ser analizada y dimensionada (García, 2016).

Con respecto a las acciones, es posible generar automáticamente cargas de sismo, viento y vehículos, y posteriormente, hacer el dimensionamiento y comprobación automática de estructuras de hormigón armado, perfiles metálicos, de aluminio y conformados en frío, a través de las normativas europeas, americanas, canadienses, turcas, indias, chinas, y otras (García, 2016).

Para la investigación se ha decidido trabajar con el software SAP 2000, este propicia una interfaz amigable muy versátil, permite incorporar elementos al diseño desde el propio programa, también permite modelar estructuras poco convencionales. Ofrece facilidades como lo son integrar los resultados a hojas de cálculos y diferentes gráficos. Es utilizado también debido a su gran velocidad en cuanto al postprocesamiento de los resultados, disminuyéndose considerablemente el tiempo computacional (García, 2016).

Este software ha sido utilizado por diferentes investigadores en el análisis de vibración en bases de cimentaciones, Ricardo González Alcorta, Luis Manuel Aranda Máltez ambos profesores de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México han utilizado el SAP2000 en su estudio “Análisis de la vibración de una losa de concreto ocasionada por la operación de una maquinaria” obteniendo resultados satisfactorios. También por Carlos Y. Vázquez en su estudio “Modelación numérica de base para maquinaria tipo cuchilla del Central Mario Muñoz”

#### Conclusiones parciales del capítulo

- El análisis de cualquier estructura requiere de la profundización de las características de la misma debido a la gran cantidad de parámetros que inciden

en su comportamiento, lo cual también ocurre en bases de cimentaciones de hormigón armado para turbogeneradores.

- La modelación de bases de cimentaciones de hormigón armado para turbogeneradores mediante software de elementos finitos nos permite analizar con gran precisión la variación de los distintos parámetros.
- El software SAP 2000 se considera una herramienta idónea para la modelación, debido a las ventajas que trae, por tanto, se decide modelar en el mismo.

## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

El objetivo principal del presente capítulo es definir los parámetros referidos al dimensionamiento, así como los parámetros que contribuyen a la modelación de la cimentación de hormigón para la base del turbo-grupo de la central termoeléctrica “Máximo Gómez” a través del software SAP 2000. De manera general se tratan los aspectos a tener en cuenta en la modelación, donde se detalla el caso de estudio tratado, se definen aspectos como la geometría del modelo, características de los materiales a utilizar, tipo de mallado, las cargas y el suelo.

### 2.1 Proceso de dimensionamiento

El predimensionamiento se define como el conjunto de técnicas que permiten calcular elementos de ingeniería de manera sintetizada. El objetivo de esta reducción es el de encontrar unas magnitudes orientativas en cuanto a dimensiones o características del elemento que pueden servir para afinar un proceso de diseño que, finalmente, ha de ser ratificado por un cálculo exhaustivo (Mayoral, 2012).

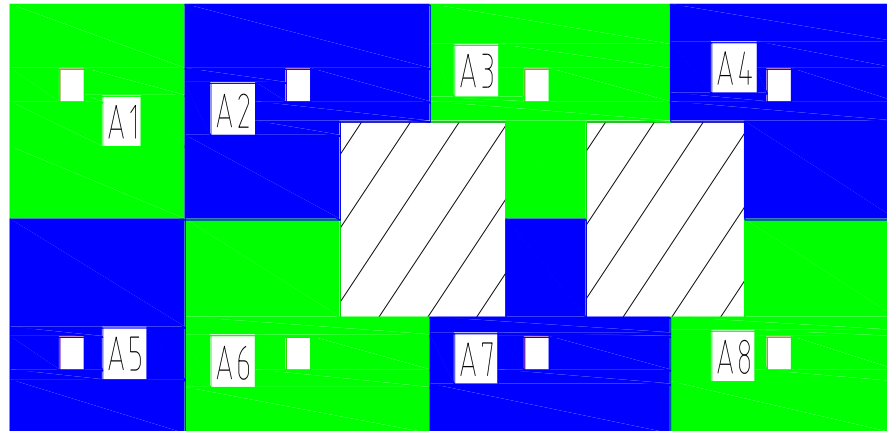
A continuación, se definen los parámetros del proceso de dimensionamiento que deben cumplirse en el caso de estudio según (Kouzier, 2014):

**(a)** Las dimensiones de la losa superior, debe considerar las dimensiones de la máquina, así como los espacios requeridos para su operación y mantenimiento. Dentro de los espacios a considerar se encuentran los referidos a:

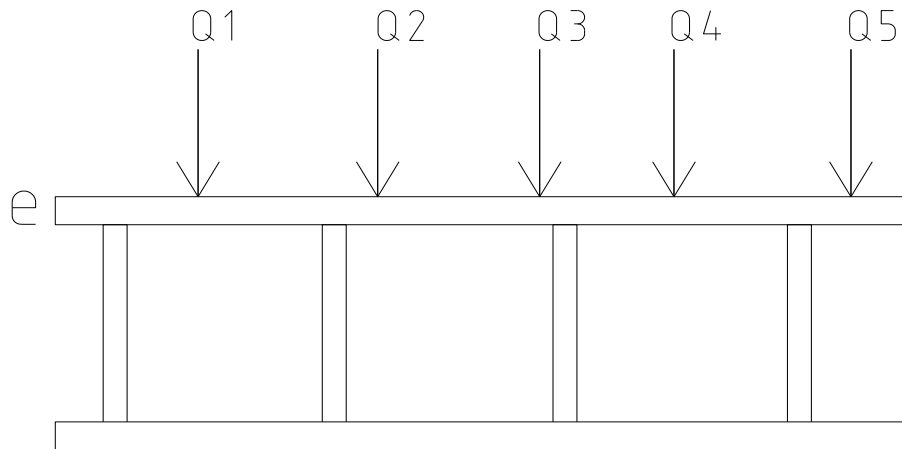
- Generador
- Turbina de altas frecuencias
- Turbina de medias frecuencias
- Turbina de bajas frecuencias
- Condensador
- Elementos auxiliares
- Trabajos de mantenimiento y operación del equipo.

**(b)** Las columnas deben ser dimensionadas de tal manera que se encuentren sometidas a aproximadamente las mismas cargas verticales.





*Figura 2.1 Área de la losa que tributa a cada columna*  
*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 2.2 Cargas del equipo sobre las columnas*  
*Fuente: elaboración propia.*

Para ello se calcula del peso que llega a cada una de las columnas, donde tendremos en cuenta dos elementos:

1. Peso de la mesa.

$$P = y h * A_t * e$$

Ecuación 2.1

Donde,  $\gamma h$ : densidad del material

At: Área que se le atribuye a cada columna.

e: Espesor de la losa.

2. Peso del turbo-grupo.

Por tanto:  $(PM+PT) * A = P_{total}$  sobre columna

Ecuación 2.2

PM: Peso de la losa

PT: Peso del equipo

A: Área tributaria a la columna

**(c)** Las columnas son sometidas a aproximadamente 6 veces la carga vertical actual y deben estar espaciadas a no menos de 3.6 metros de cara a cara.

Luego de conocer el peso que llega a cada columna se calcula la tensión sobre la misma.

$$R = \frac{W}{A}$$

Ecuación 2.3

Donde, R: Tensión

W: Peso total sobre la columna.

A: Área de la sección de la columna.

La resistencia de diseño es sometida a su sexta parte.

$$R^* = \frac{R_{hor}}{6}$$

Ecuación 2.4

R\*: Resistencia minorada.

Luego debe cumplirse que  $R < R^*$

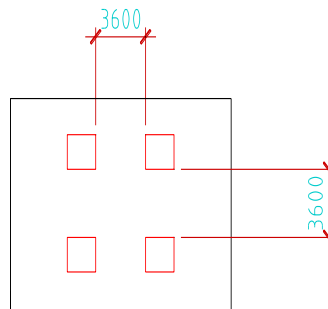
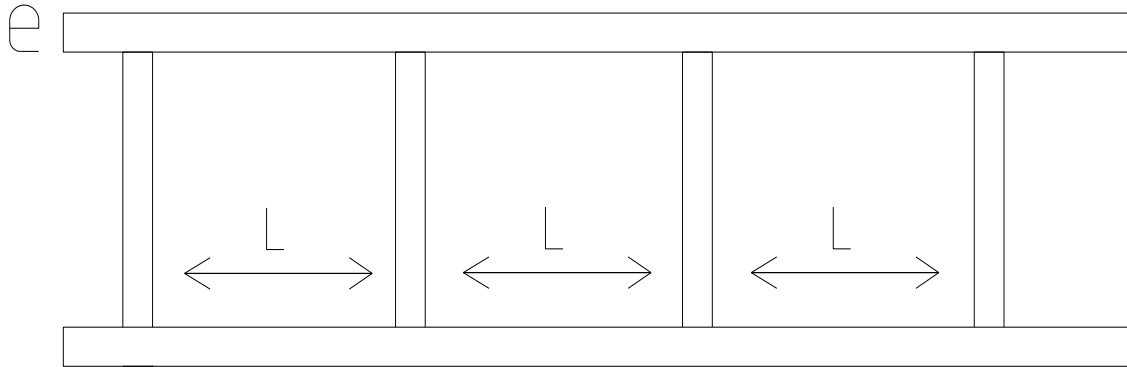


Figura 2.3 Distancias de cara a cara entre las columnas.

Fuente: elaboración propia.

- (d) Un quinto del tramo de cara a cara de las columnas debe ser menor que el espesor de la losa.



*Figura 2.4 Distancia entre columnas y espesor de losa.*

*Fuente: elaboración propia.*

Debe de cumplirse que:

$$\frac{L}{5} < e$$

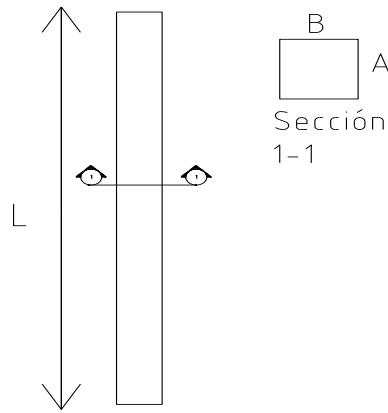
Ecuación 2.5

Donde, L: Distancia de cara a cara entre columnas

e: Espesor de la losa.

- (e) La estructura debe en un principio actuar como un elemento rígido, donde la rigidez de las vigas debe ser el doble de la rigidez de las columnas.

Se calcula la rigidez axial de las columnas.



*Figura 2.5 Columnas*  
*Fuente: elaboración propia.*

$$Kc = \frac{EA}{L}$$

Ecuación 2.6

Donde, K: rigidez axial

E: Módulo de elasticidad del material

A: Área de la sección transversal

L: Longitud de la columna

Se calcula de la rigidez de las vigas:

$$Kv = \frac{12 * E * Iz}{L^3}$$

Ecuación 2.7

Donde, K: rigidez

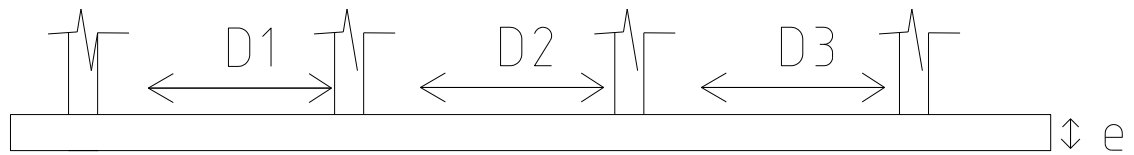
E: Módulo de elasticidad del material

Iz: Inercia de la viga

L: Longitud de la viga

Debe de cumplirse que:  $2Kv$  sea aproximadamente igual a  $Kc$

- (f)** La balsa se emplaza en el suelo, donde el espesor de la misma debe ser mayor que  $0.07L^{4/3}$  donde L: distancia media entre columnas.



*Figura 2.6 Balsa de cimentación.*

*Fuente: elaboración propia.*

$$e < 0.07L_3^4$$

Ecuación 2.8

$$L = \frac{D1 + D2 + D3 + \dots + Dn}{n}$$

Ecuación 2.9

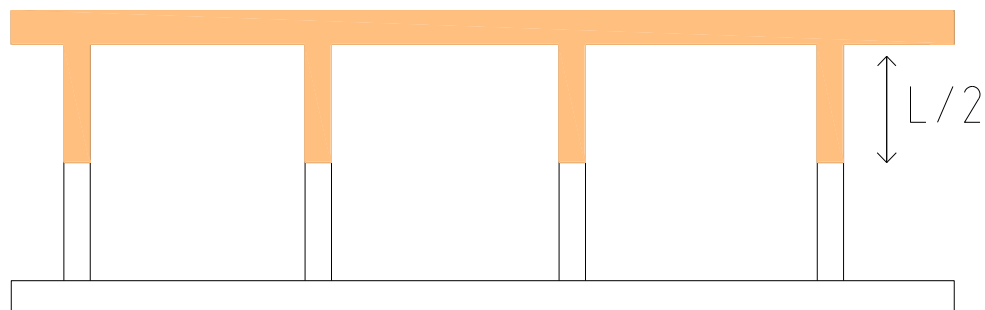
Donde, L: Distancia promedio entre columnas

e: Espesor de la balsa

n: Número de espacios entre columnas

D: Distancia entre columnas.

**(g)** El peso de la mitad de las columnas, más el peso de la losa superior debe ser mayor que el peso de la turbina y sus elementos auxiliares.



*Figura 2.7 Parte de la estructura a calcular el peso.*

*Fuente: elaboración propia.*

Peso de la mesa.

$$P = \gamma h * At * e$$

Ecuación 2.10

Donde,  $\gamma h$ : Densidad del material

At: Área que se le atribuye a cada columna.

e: Espesor de la losa

Peso de la mitad de las columnas.

$$P = \gamma h * At * L$$

Ecuación 2.11

Donde,  $\gamma h$ : Densidad del material

At: Área que se le atribuye a cada columna respectivamente.

L: Longitud de la mitad de la columna.

Luego se adicionan todos los pesos calculados para así obtener el peso total de dicha parte de la estructura y poder realizar la siguiente comparación:

$$P_{est\ sup} > P_{turb}$$

**(h)** El peso total de la estructura, más el peso de la balsa, debe ser mayor que tres veces el peso de la máquina.

$$P_{losa} + P_{columnas} + P_{balsa} > 3 * P_{maquina}$$

Ecuación 2.12

**(i)** La tensión producida en el suelo no excede al 50% de la capacidad portante del mismo. Para cimientos sobre pilotes, el pilote más cargado no debe soportar más del 50% de su carga permisible.

$$\frac{P_{losa} + P_{columnas} + P_{balsa} + P_{maquina}}{Abalsa} < 50\% * R_{suelo}$$

Ecuación 2.13

**(j)** El centro de rigidez de las columnas coincide con el centro de gravedad del equipo en un rango no mayor del 3%.

Se procede al cálculo de los centros de masas, tanto de las cargas como de las columnas, donde se define en un principio los ejes de referencia para la ubicación de las posiciones de ambos centros de gravedad.

Se aplican las siguientes ecuaciones para el caso de las columnas y las cargas respectivamente:

$$\sum \frac{A_i \cdot X_i}{A_i} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$\sum \frac{P_i \cdot X_i}{A_i} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

A<sub>i</sub>: Área de la sección transversal de las columnas.

P<sub>i</sub>: Valor de la carga.

X<sub>i</sub>: Posición de las columnas y las cargas con respecto al eje de referencia respectivamente.

La diferencia de los centros de gravedad no debe variar en  $\pm 3\%$  con respecto a la longitud total.

$$\frac{X_{carga} - X_{columna}}{L_{total}} \leq 3\% \quad \text{Ecuación 2.16}$$

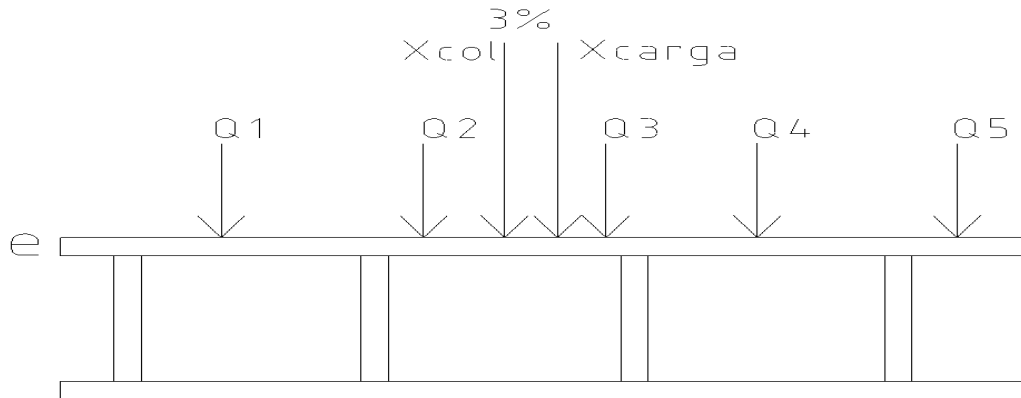


Figura 2.8 Centros de gravedad.

Fuente: elaboración propia.

## 2.2 Características de la máquina

Las características necesarias para la modelación de la base son el peso y la velocidad angular de la maquinaria, valores que se obtienen del fabricante.

Tabla No. 2.1 Características de la máquina

Descripción	Tipo	Salida (kW)	Velocidad (r.p.m)	Momento dinámico de inercia (tm <sup>2</sup> )
Turbina	K-100-2/3600	100000	3600	4.44

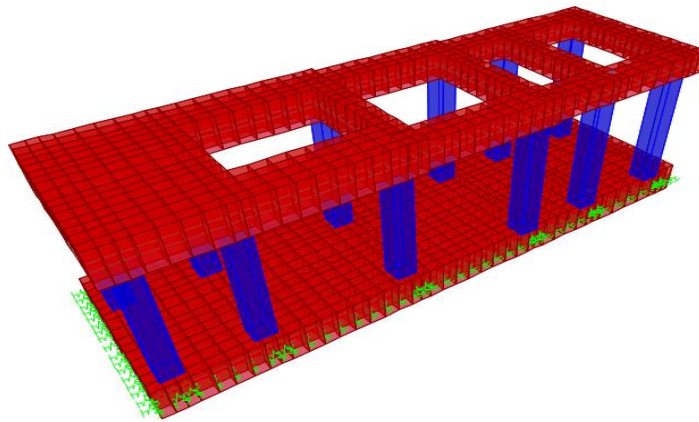
Fuente: (Klimov, 2017)

### 2.3 Parámetros para modelar

Para la modelación de la base de cimentación es necesario tener en cuenta, la geometría del objeto, el material que lo compone, las condiciones de apoyo y las cargas actuantes. A continuación, se abordan de forma independiente cada uno de estos parámetros.

#### 2.3.1 Modelo geométrico

La mesa de cimentación sobre la cual se apoya el turbo-grupo, es de tipo pórtico, compuesta por una balsa apoyada sobre el suelo de 29.3 x 8.8 x 2.0 metros, presenta doce columnas de 1 x 1 metro y 8.8 metros de altura; losa superior es de 29.3 x 8.8 metros y el espesor en los primeros 12.6 metros es de 2 metros, para los siguientes 7 metros el espesor es de 1.68 metros, y para los 9.6 metros restantes el espesor es de 1.4 metros. La losa presenta cuatro aberturas, ubicadas a 5.54 metros, 12.6 metros, 18.6 metros y 23.75 metros a lo largo del eje x, dichas aberturas son de 6.07 x 4.55 metros, 6 x 5.74 metros, 3.14 x 5.75 metros y 4 x 5.75 metros respectivamente.



*Figura 2.9 Modelo geométrico extruido*

*Fuente: elaboración propia.*

#### 2.3.2 Modelo del material

Para la modelación de la mesa de cimentación, el material utilizado es el hormigón armado.

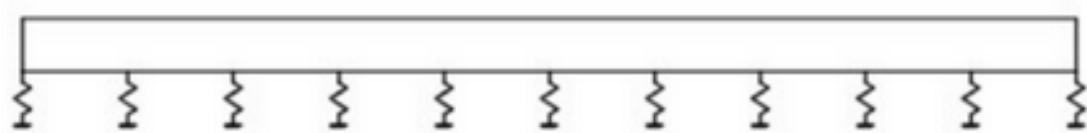
En la presente investigación se adopta un modelo lineal-elástico para dicho material presente en la base de cimentación del turbo-grupo de la central termoeléctrica “Máximo



Gómez”. La resistencia a la compresión del hormigón puede ser considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general, tanto desde el punto de vista de durabilidad, como de la capacidad de resistencia mecánica. El material utilizado posee una resistencia a la compresión de 250 (Kg/cm<sup>2</sup>).

### 2.3.3 Modelo del suelo

El suelo es modelado elásticamente, sobre un número infinito de resortes elásticos, que simulan la rigidez del suelo (modelo de Winkler), uno de los métodos más utilizados a nivel mundial, presenta una gran aceptación, el cual permite una fácil asimilación de la interacción suelo-estructura por los métodos matriciales de cálculo.



*Figura 2.10 Representación del suelo*

*Fuente: (García, 2016)*

En base del informe geotécnico se obtuvieron los siguientes parámetros del terreno de cimentación. Basándose en el cálculo y la compactación, en el análisis se ha considerado el valor de rigidez del terreno de cimentación  $C_z=30\text{MN.m}^{-3}$  en la dirección vertical y  $C_{xy}=15\text{MN.m}^{-3}$  en la dirección horizontal. Dado que la bancada de turbogenerador ha sufrido un uso prolongado (45 años), el suelo se ha considerado también como estabilizado, con el valor de rigidez del terreno de cimentación de  $C_z=60\text{MN.m}^{-3}$  en dirección vertical y de  $C_{xy}=30\text{MN.m}^{-3}$  en direcciones horizontales.

### 2.3.4 Cargas

En el modelo se presentan dos tipos de cargas: estáticas y dinámicas.

Cargas estáticas.

El turbo grupo se muestra compuesto por el generador, las turbinas de alta, media y baja presión respectivamente. Además, consta con elementos auxiliares, dígame el condensador, instalaciones y elementos de soporte.

En los siguientes esquemas se muestran las posiciones de las cargas estáticas.

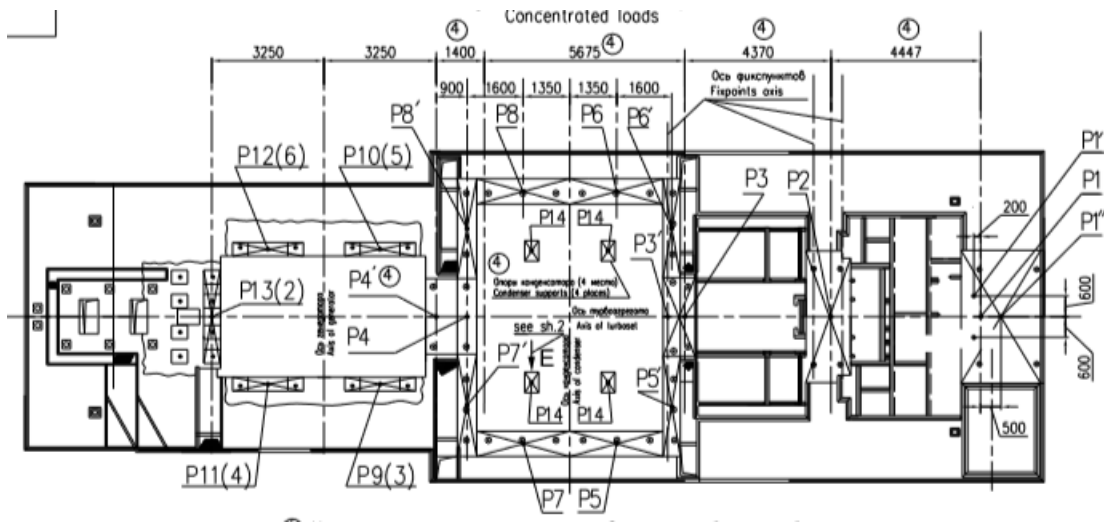


Figura 2.11 Posición de los pesos de la máquina.

Fuente: (Klimov, 2017)

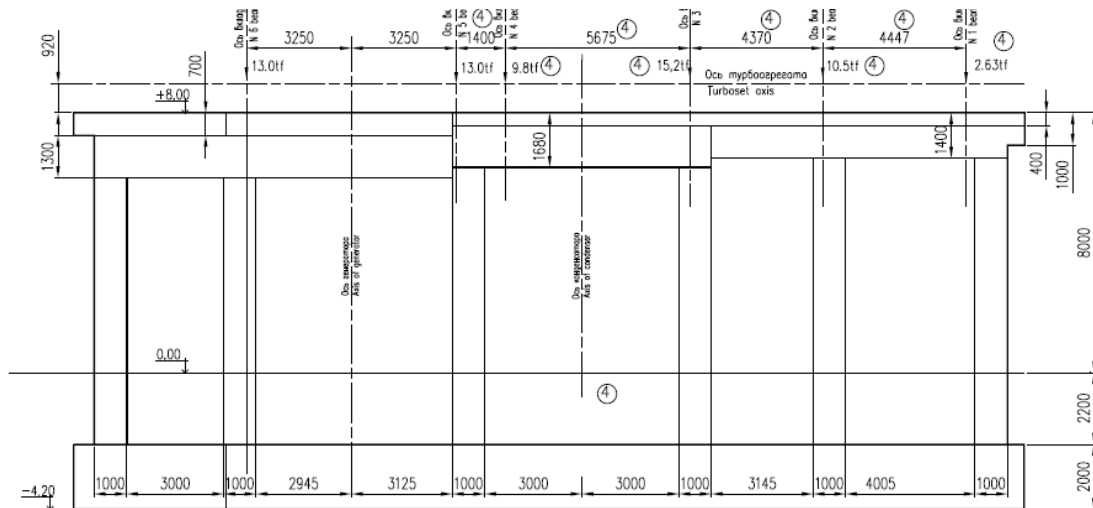


Figura 2.12 Posición de los pesos del eje de rotación

Fuente: (Klimov, 2017)

Tabla 2.2 Valores de cargas.

Punto	Peso (tf)	Punto	Peso (tf)	Punto	Peso (tf)	Punto	Peso (tf)
P1	2.64	P4	16	P7	13	P11	9.8
P1'	26	P4'	15	P7'	16	P12	13
P1''	10	P5	13	P8	13	P13	10.5
P2	94	P5'	16	P8'	16	P14	42.5
P3	73	P6	13	P9	15.2		
P3'	16	P6'	16	P10	13		

Fuente: (Klimov, 2017)

Cargas dinámicas.

Las cargas presentes son de tipo oscilatorias originadas por la propia máquina. Se realiza un barrido de frecuencias para una carga aplicada a diferentes frecuencias; para ello se utilizan los valores de las frecuencias propias del equipo (3600 r.p.m). Este análisis conocido como *steady state* busca la respuesta de la estructura en una o más frecuencias para cargar el formulario:

$$\bar{p}(w) = \sum_j s_j f_j(w) p_j e^{i\theta_j} = \sum_j s_j f_j(w) p_j (\cos \theta_j + i \sin \theta_j)$$

Ecuación 2.17

Dónde:  $S_j$  es un factor de escala y  $\theta_j$  es el ángulo de fase al que se aplica la carga  $p_j$ .

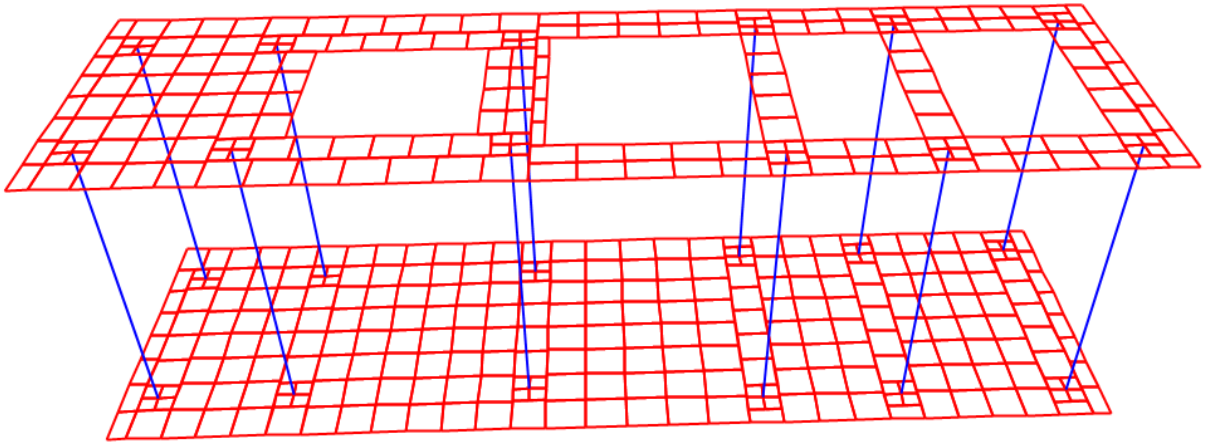
La función de frecuencia,  $f_j(w)$  viene dada directamente por una función de *steady state* que se defina. Representa la magnitud de la carga antes de escalar por  $s_j$ .

## 2.4 Mallado

Determinar el elemento finito a utilizar en los modelos es uno de los primeros pasos para comenzar con la corrección, en cada uno de los sistemas previamente definidos, se adoptó la utilización de un elemento tipo área con cuatro nodos.

Estudios como (Kouzer, 2014) plantean el uso de los elementos tipo Shell thick y frame como factible para este tipo de estructura, basándose en resultados de diversos análisis y experiencias en este tipo de modelo.

## Mallado 1



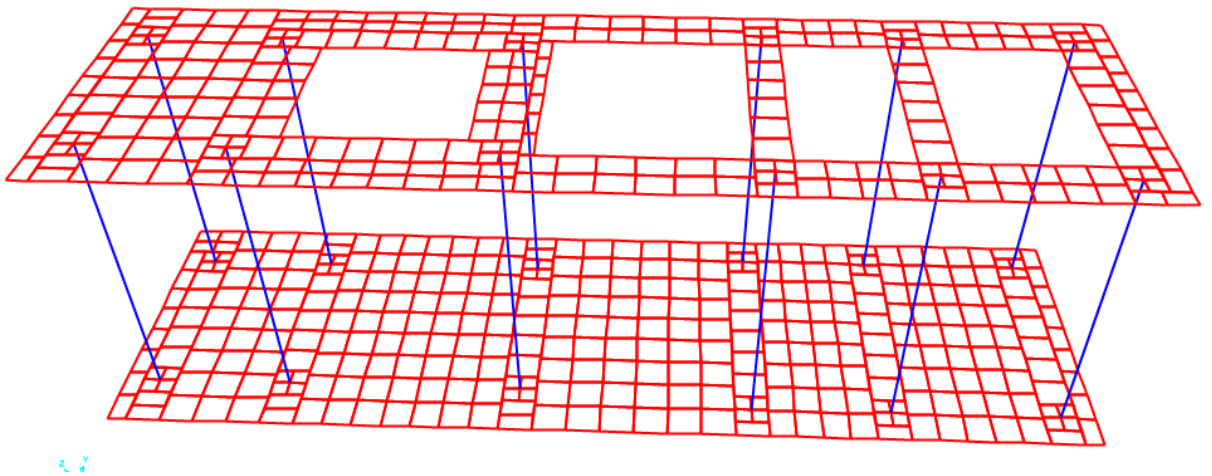
*Figura 2.13 Mallado 1*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 210 elementos

Balsa: 271 elementos

## Mallado 2



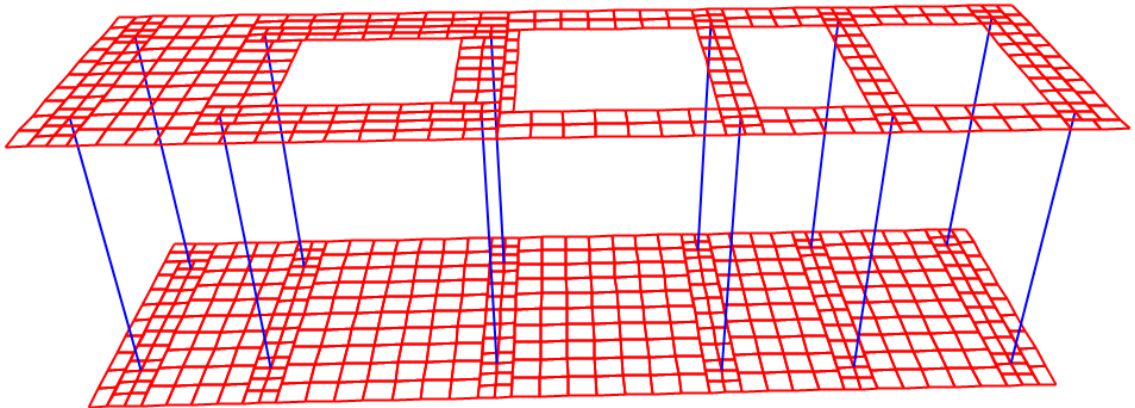
*Figura 2.14 Mallado 2*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 263 elementos

Balsa: 343 elementos

### Mallado 3



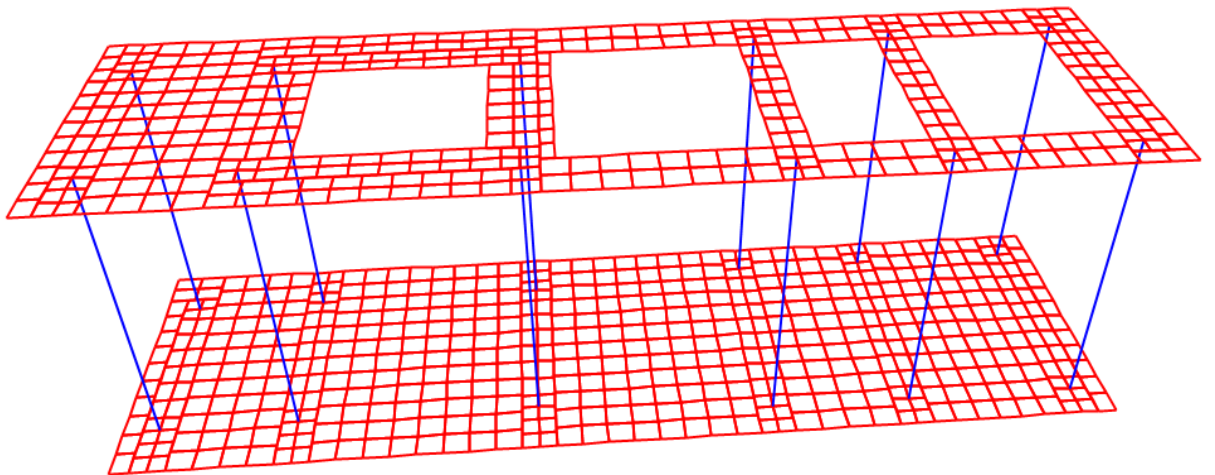
*Figura 2.15 Mallado 3*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 341 elementos

Balsa: 457 elementos

### Mallado 4



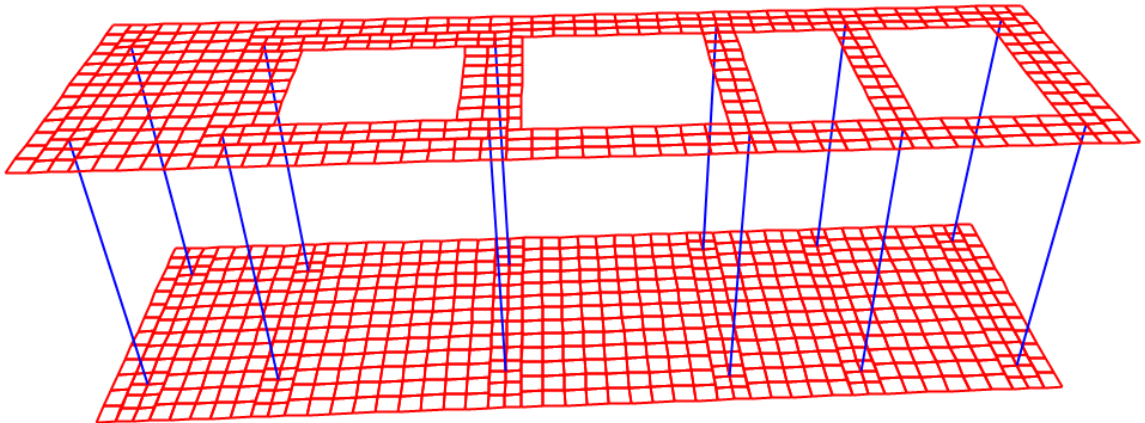
*Figura 2.16 Mallado 4*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 385 elementos

Balsa: 550 elementos

### Mallado 5



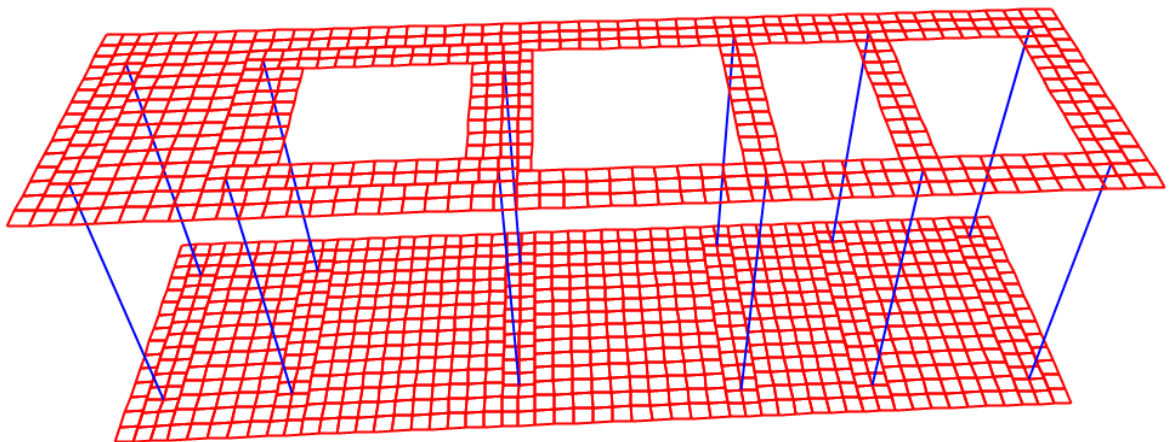
*Figura 2.17 Mallado 5*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 475 elementos

Balsa: 648 elementos

### Mallado 6



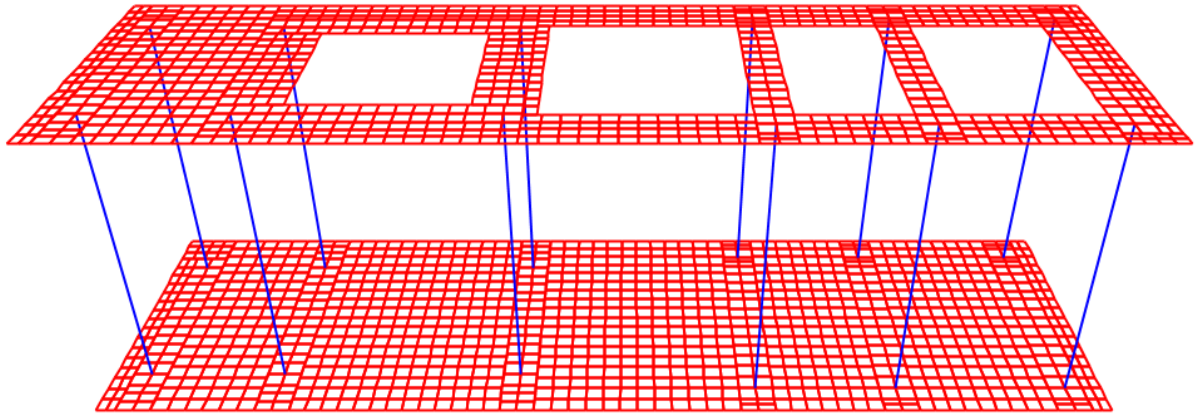
*Figura 2.18 Mallado 6*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 824 elementos

Balsa: 1166 elementos

Mallado 7



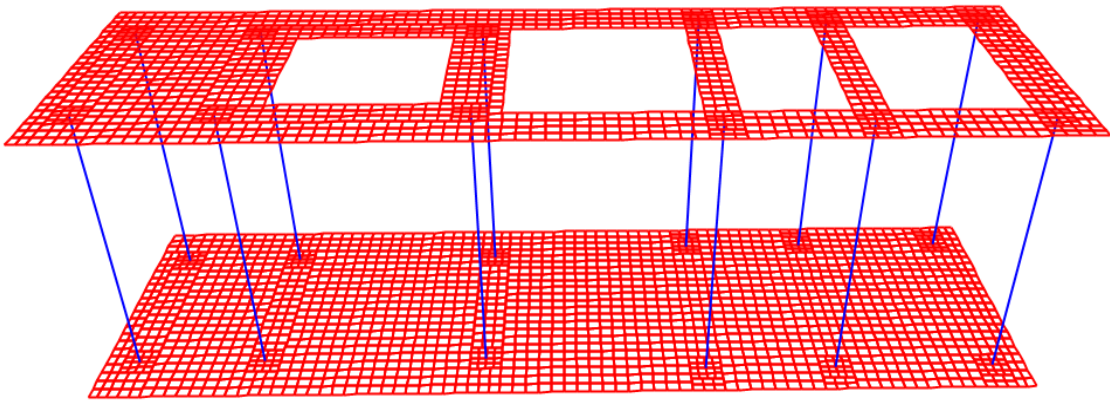
*Figura 2.19 Mallado 7*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 1308 elementos

Balsa: 1948 elementos

Mallado 8



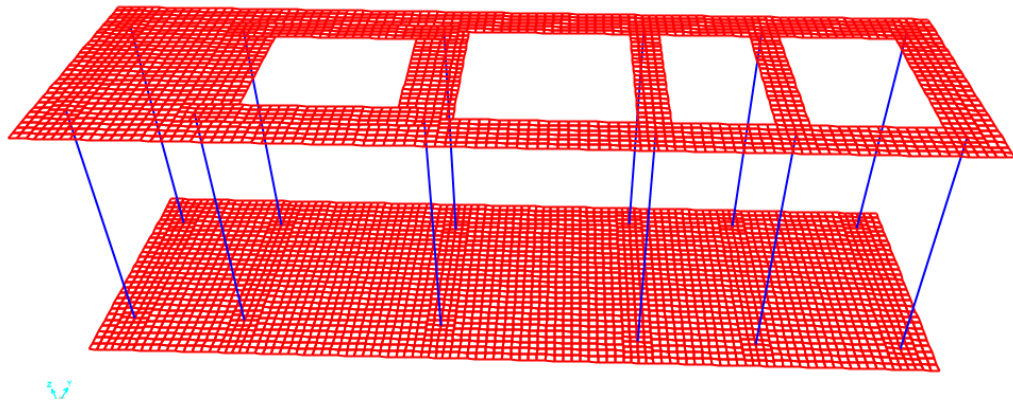
*Figura 2.20 Mallado 8*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 2136 elementos

Balsa: 3168 elementos

Mallado 9



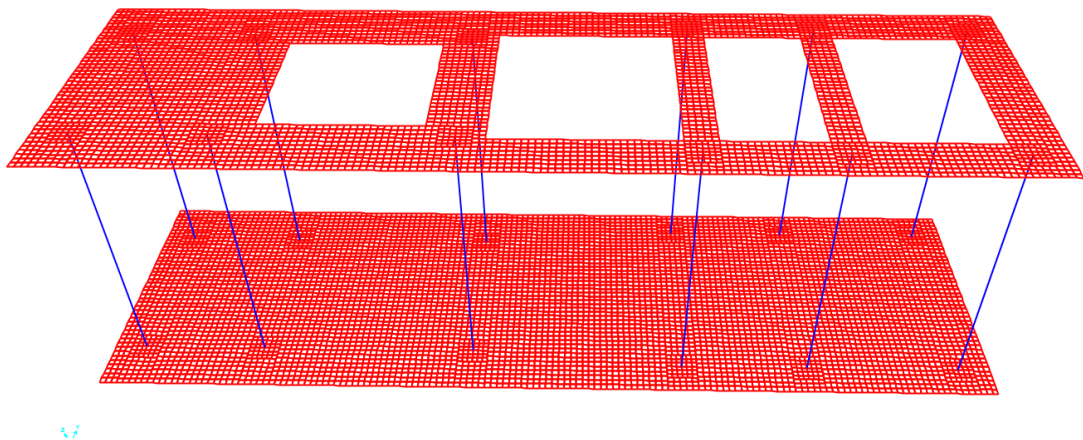
*Figura 2.21 Mallado 9*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 4377 elementos

Balsa: 6837 elementos

Mallado 10



*Figura 2.22 Mallado 10*

*Fuente: elaboración propia.*

Losa superior: 8607 elementos

Balsa: 13429 elementos



A continuación se analizan 6 puntos de prueba, 3 ubicados en la balsa y 3 en la losa superior, donde se describen las tensiones a medida que se varía el número de elementos.

*Tabla 2.3 Tensiones en la balsa*

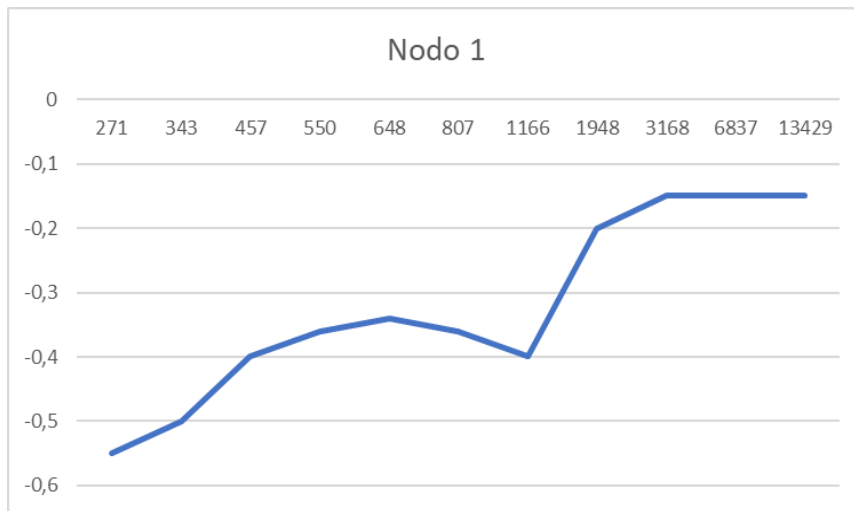
No. de elementos	Nodos (Mpa)		
	1	2	3
271	-0,55	-0,016	0,29
343	-0,5	0,03	0,3
457	-0,4	0,013	0,31
550	-0,36	0,045	0,33
648	-0,34	0,1	0,35
1166	-0,4	0,08	0,43
1948	-0,2	0,1	0,23
3168	-0,15	0,11	0,33
6837	-0,15	0,11	0,334
13429	-0,149	0,113	0,33

*Fuente: elaboración propia.*

*Tabla 2.4 Tensiones en la losa*

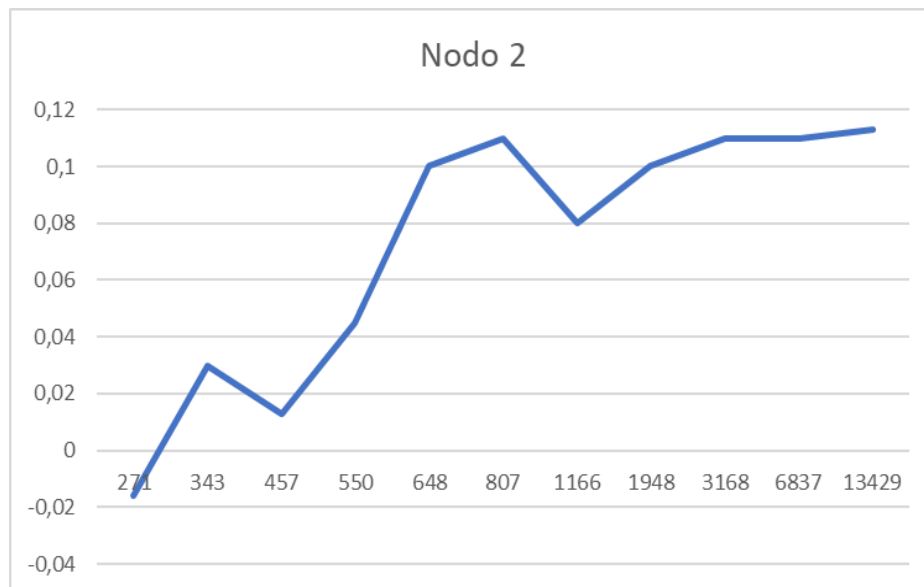
No. de elementos	Nodos (Mpa)		
	4	5	6
210	0,2	-0,3	-0,46
263	0,4	-0,3	-0,47
341	0,18	-0,32	-0,48
385	0,17	-0,33	-0,47
475	0,33	-0,32	-0,46
545	0,28	-0,32	-0,48
1308	0,22	-0,33	-0,48
2136	0,131	-0,32	-0,49
4377	0,132	-0,32	-0,49
8607	0,13	-0,32	-0,49

*Fuente: elaboración propia.*



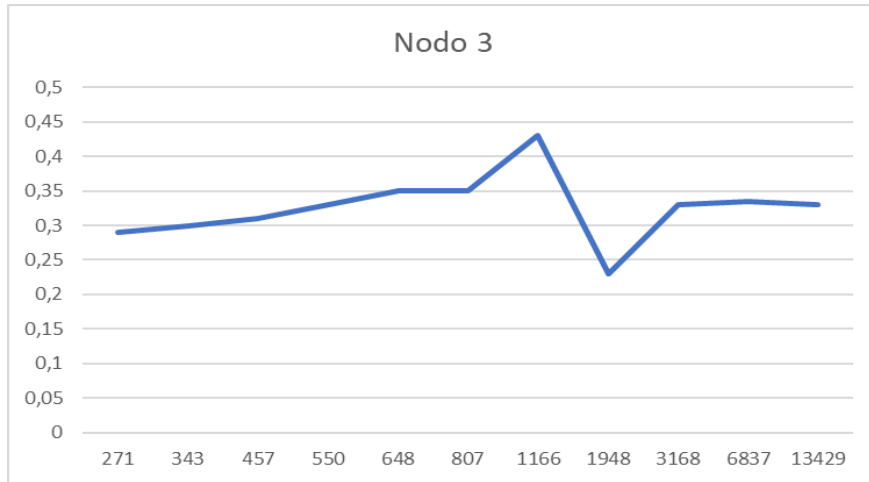
*Figura 2.23 Tensión contra cantidad de elementos*

*Fuente: elaboración propia.*



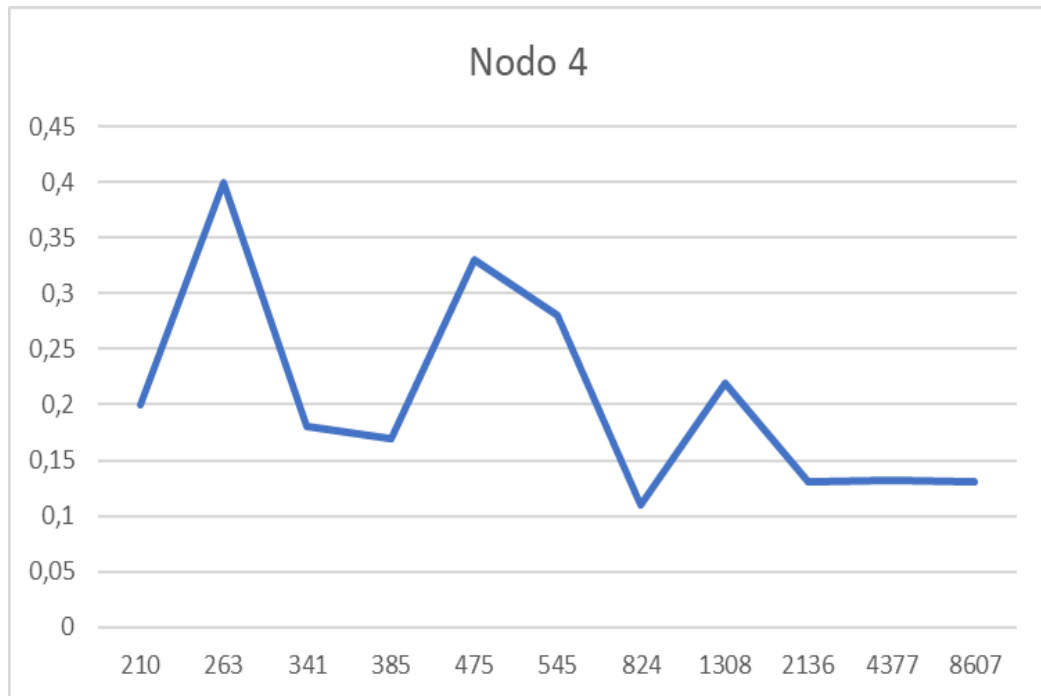
*Figura 2.24 Tensión contra cantidad de elementos*

*Fuente: elaboración propia.*



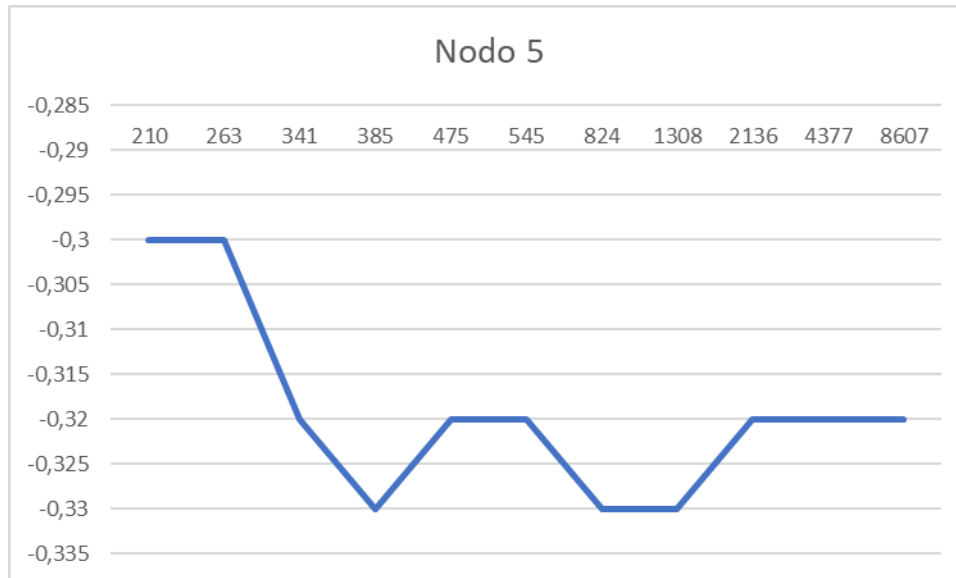
*Figura 2.25 Tensión contra cantidad de elementos*

*Fuente: elaboración propia.*



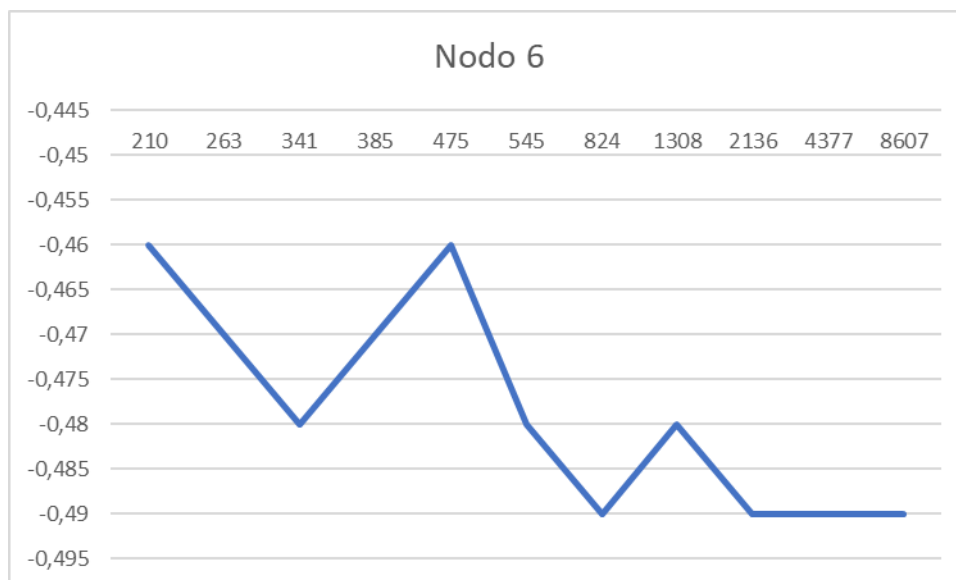
*Figura 2.26 Tensión contra cantidad de elementos*

*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 2.27 Tensión contra cantidad de elementos*

*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 2.28 Tensión contra cantidad de elementos*

*Fuente: elaboración propia.*

Como se puede apreciar existen variaciones en los primeros mallados analizados, a partir de 3168 elementos en la balsa se observa estabilidad en las tensiones, siendo así también en el mallado de la losa superior a partir de 2136 elementos. Por tanto el mallado a estudiar es el número 8.

Conclusiones parciales del capítulo.

- Las cargas actuantes se definen como estáticas y dinámicas, las primeras producto del peso propio del equipo y la estructura, y las segundas producidas por el movimiento ondulatorio de la máquina
- Para la revisión del dimensionamiento se usan diferentes criterios para el análisis de los mismos en el objeto de investigación.
- El modelo computacional se realiza a partir del ajuste del mallado y experiencias acerca de este tipo de bases para turbo-grupos.

## CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Este capítulo tiene como objetivo principal al análisis de los resultados obtenidos de la modelación en SAP 2000, que muestran el comportamiento estructural de la mesa de cimentación para el turbo-grupo de la central termoeléctrica “Máximo Gómez” y el resultado de las vibraciones generadas en la misma. También se ofrecen resultados acerca del dimensionamiento de la base de cimentación.

### 3.1 Análisis del dimensionamiento

A continuación, se exponen los criterios de dimensionamiento presentes en el caso de estudio.

(a) Las dimensiones de la losa superior, debe considerar las dimensiones de la máquina, así como los espacios requeridos para su operación y mantenimiento.

Según las dimensiones que muestra la mesa, y las experiencias en cuanto al uso de los espacios para la operación del equipo y su mantenimiento, así como el acoplamiento adecuado de cada uno de los elementos del turbo-grupo, sin que se muestren deficiencias, demuestra que las dimensiones de la losa superior son apta en cuanto al presente planteamiento.

(b) Las columnas deben ser dimensionadas de tal manera que se encuentren sometidas a aproximadamente las mismas cargas verticales.

Luego del análisis estático en la modelación numérica de la estructura, se pudo comprobar que cumple con el presente criterio

(c) Las columnas son sometidas a aproximadamente 6 veces la carga vertical actual y deben estar espaciadas a no menos de 3.6 metros de cara a cara. La siguiente tabla muestra los resultados de tensiones producidas en cada una de las columnas y la resistencia del hormigón minorada, todo ello en Kg/cm<sup>2</sup>.

Todas las columnas se encuentran espaciadas a más de 3.6 metro, por tanto, se cumple con el presente criterio.

*Tabla No. 3.1 Tensiones*

Tensión Hormigón Real (W/A) (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resist. Hormigón minorado (kg/cm <sup>2</sup> )	Observación
5,80	41,67	Cumple
8,38	41,67	Cumple
8,51	41,67	Cumple
5,46	41,67	Cumple
4,47	41,67	Cumple
4,38	41,67	Cumple
5,80	41,67	Cumple
8,38	41,67	Cumple
8,51	41,67	Cumple
5,46	41,67	Cumple
4,47	41,67	Cumple
4,38	41,67	Cumple

*Fuente: elaboración propia.*

(d) Un quinto del tramo de cara a cara de las columnas tanto transversales como longitudinales debe ser menor que el espesor de la losa.

Se le calcula la quinta parte de la distancia de cara a cara de cada columna y se compara con el espesor de la losa entre ambas caras respectivamente. La tabla 3.2 muestra la observación acerca de la comparación descrita.

*Tabla 3.2 Comparación distancia-espesor*

Columnas	Distancia L (m)	L/5	Espesor (m)	Observación
1;2	3,00	0,60	1,68	Cumple
2;3	6,07	1,21	1,68	Cumple
3;4	6,00	1,20	1,68	Cumple
4;5	3,145	0,63	1,68	Cumple
5;6	4,005	0,81	1,68	Cumple
1;1'	4,55	0,91	1,68	Cumple

5,5'	5,75	1,15	1,68	Cumple
------	------	------	------	--------

*Fuente: elaboración propia.*

Se cumple con el presente criterio debido a que en todos los casos

$L/5 >$  espesor de losa

(e) La estructura debe en un principio actuar como un elemento rígido, donde la rigidez de las vigas debe ser el aproximadamente la mitad de la rigidez de las columnas.

Se realiza el cálculo de cada una de las rigideces, donde se obtiene como resultado de los cálculos la rigidez promedio de las vigas y las columnas, mostradas en la tabla. Donde cuando realizamos la comparación se puede apreciar una similitud en cuanto a los valores de rigideces de ambos elementos.

$9,062 \cdot 2 = 18,124 \text{KN/m}^2$  es aproximadamente igual a  $18,578 \text{KN/m}^2$ , el cual es la rigidez de la columna de la losa. Por tanto, cumple con lo referente a este criterio.

*Tabla No. 3.3 Rigidez*

Vigas	Longitud vigas (m)	Módulo de elasticidad (E)	b (m)	h (m)	Inercia (m <sup>4</sup> )	Rigidez (KN/m)
	4	74313,525	2	2	1,33	18578,38
Columnas	Longitud columnas (m)	Módulo de elasticidad (E)	Área (m <sup>2</sup> )	Rigidez (KN/m)		
	8,2	74313,525	1	9062,63		

*Fuente: elaboración propia.*

(f) La balsa se emplaza en el suelo, donde el espesor de la misma debe ser mayor que  $0.07L^{4/3}$  donde L: distancia media entre columnas.

La tabla muestra las distancias ente columnas, luego se calcula el valor promedio de las mismas, el cual es L, y se aplica a la fórmula para ver si este es mayor que el espesor de la balsa, el cual es de 2 metros.



Tabla 3.4 Distancia entre columnas

Columnas	Distancia L (mm)
1;2	3000
2;3	6070
3;4	6000
4;5	3145
5;6	4005
1;1'	4550
2;2'	4550
3;3'	4550
4;4'	5750
5;5'	5750
6;6'	5750
Promedio	4829,09091

Fuente: elaboración propia.

$$5713.7\text{mm} > 2000\text{mm}$$

Cumple con el presente criterio

(g) El peso de la mitad de las columnas, más el peso de la losa superior debe ser mayor que el peso de la turbina y sus elementos auxiliares.

Se calcula el peso de la mitad de cada columna, luego se calculan las cargas de la losa que se le atribuye a cada columna y se calcula el peso total.

Tabla 3.5 Peso de la mitad de la estructura y del turbo-grupo

No.	Densidad (KN/m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Mitad de Longitud (m)	Carga (Masa-media columna) KN	Carga (Masa-losa) KN	Carga (total media estructura) KN	Carga-Turbo KN
1	24	1	8,20	4,10	98,40	580,8	679,20	0
2	24	1	8,20	4,10	98,40	773,76	872,16	65
3	24	1	8,52	4,26	102,24	737,68	839,92	114
4	24	1	8,52	4,26	102,24	470,87	573,11	76

5	24	1	8,80	4,40	105,60	395,47	501,07	52,5
6	24	1	8,80	4,40	105,60	425,71	531,31	13,15
1'	24	1	8,20	4,10	98,40	580,80	679,20	0
2'	24	1	8,20	4,10	98,40	773,76	872,16	65
3'	24	1	8,52	4,26	102,24	737,68	839,92	114
4'	24	1	8,52	4,26	102,24	470,87	573,11	76
5'	24	1	8,80	4,40	105,60	395,47	501,07	52,5
6'	24	1	8,80	4,40	105,60	425,71	531,31	13,15
TOTAL							7993,55	641,3

*Fuente: elaboración propia.*

7993.5552KN > 641.3KN

Cumple con el presente criterio

(h) El peso total de la estructura, más el peso de la balsa, debe ser mayor que tres veces el peso de la máquina.

Primeramente, se calcula el peso de cada columna, luego se calculan las cargas de la losa que se le atribuye a cada columna y después se adicionan cada uno de estos pesos al peso de la balsa.

*Tabla No. 3.6 Peso total de la mesade cimentación y el equipo*

No. Columnas	Densidad (KN/m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Carga (Masa-columna) KN	Carga (Masa-loso) KN	Carga (total estructura) KN	Carga-Turbo KN
1	24	1	8,20	196,80	580,80	777,6	0
2	24	1	8,2	196,80	773,76	970,5	65,00
3	24	1	8,52	204,48	737,68	942,1	114,00
4	24	1	8,52	204,48	470,87	675,3	76,00
5	24	1	8,80	211,20	395,47	606,6	52,50
6	24	1	8,80	211,20	425,71	636,9	13,15
1'	24	1	8,20	196,80	580,80	777,6	0
2'	24	1	8,20	196,80	773,76	970,5	65,00
3'	24	1	8,52	204,48	737,68	942,1	114,00

4'	24	1	8,52	204,48	470,87	675,3	76,00
5'	24	1	8,80	211,20	395,47	606,6	52,50
6'	24	1	8,80	211,20	425,71	636,9	13,15
TOTAL						9218,5	641,30

Fuente: elaboración propia.

Tabla No.3.7 Peso de la balsa

	Densidad (KN/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Peso (KN)
Balsa	24	2	260,49	12503,52

Fuente: elaboración propia.

$$P_{losa} + P_{columnas} + P_{balsa} > 3 * P_{maquina} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$9218.5152 + 12503.52 = 21722.03 \text{KN} > 3 * 641.3 = 1923.9 \text{KN}$$

Cumple con el presente criterio

(i) La tensión producida en el suelo no excede al 50% de la capacidad portante del mismo. Para cimientos sobre pilotes, el pilote más cargado no debe soportar más del 50% de su carga permisible.

Se calcula el peso que llega al suelo y la tensión que se produce en el mismo, el cual interactúa con una balsa de 260.49m<sup>2</sup>

$$\frac{P_{losa} + P_{columnas} + P_{balsa} + P_{maquina}}{A_{balsa}} < 50\% * R_{suelo} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

La tensión producida es de 85.8 KN/m<sup>2</sup> la cual es menor que el 50% de la resistencia del suelo en que se encuentra apoyado, dicha resistencia es de 400KN/m<sup>2</sup>.

Cumple con el presente criterio

(j) El centro de rigidez de las columnas coincide con el centro de gravedad del equipo.

Se toma como eje de referencia el (0; 0), donde nos muestra un resultado para cada elemento, o sea, las columnas y las cargas respectivamente.

La posición del centroide de las columnas se encuentra con respecto al eje X en el centro debido a la simetría que presenta y en el eje Y en el punto 13.7625

La posición del centroide de las cargas se encuentra con respecto al eje X en el centro debido a la simetría que presenta y en el eje Y en el punto 13.7938

El por ciento que existe de diferencia entre ambos centroides con respecto a la longitud total es de  $0.1\% < 3\%$ .

*Tabla No. 3.8 Centros de masas de columnas y cargas respectivamente*

Columna	Posición	Área (m <sup>2</sup> )	Ai*Xi	Cota (mm)
No.	Xi			
1	0	1	0	0
2	4	1	4,00	4000
3	11,07	1	11,07	7070
4	18,07	1	18,07	7000
5	22,215	1	22,21	4145
6	27,22	1	27,22	5005
Suma		6	82,57	

**Yc 13,7625**

Carga	Posición	Carga (tf)	Pi*Xi	Cota
No.	Xi			
1	4,195	13	54,53	4195
2	10,695	13	139,03	6500
3	12,095	9,8	118,53	1400
4	17,77	15,2	270,10	5675
5	22,14	10,5	232,47	4370
6	26,587	2,63	69,92	4447
Suma		64,13	884,58	

**Yc 13,7938377**

*Fuente: elaboración propia.*

Cumple con el presente criterio.

### **3.2 Análisis de la estructura**

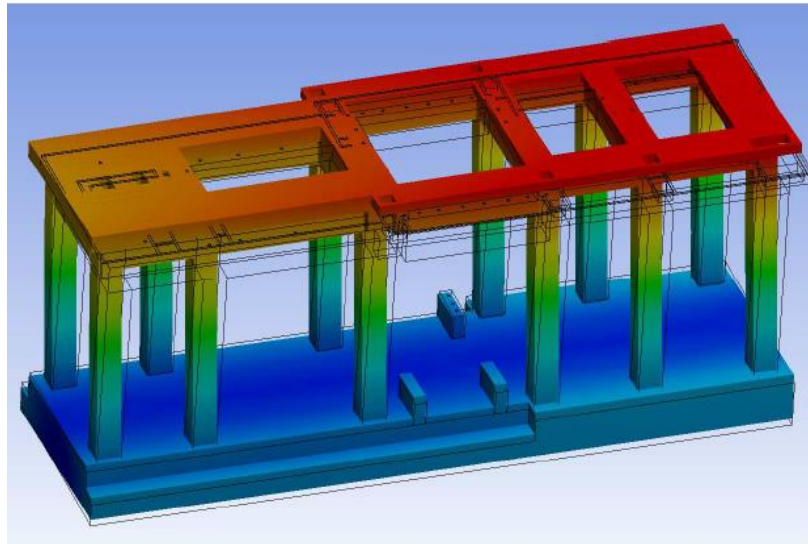
En la presente instancia se muestran los modos propios de oscilaciones y frecuencias naturales de la estructura arrojados por el software, y se realiza una comparación con los respectivos datos que se ofrecen en el informe ofrecido por la República Eslovaca sobre

un equipo similar sobre la base. Se puede apreciar que los valores de frecuencias son similares, además, la forma oscilar la estructura, coincide en cada uno de los modos para ambos modelos.

*Tabla 3.9 Modos propios*

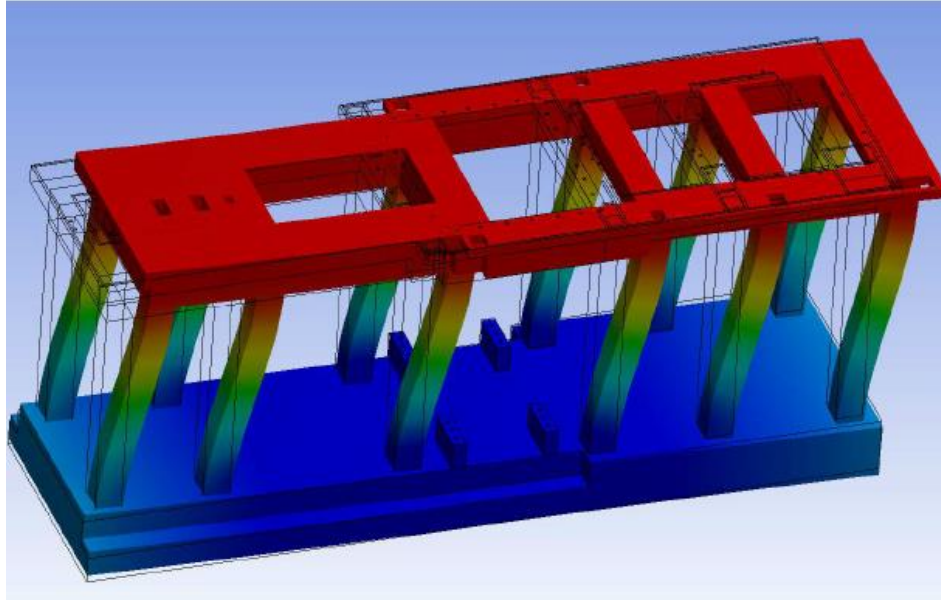
Modo de oscilación analizados	Frecuencias (Hz)	
	Modelo creado	Modelo eslovaco
1	2.21	2.095
2	2.86	2.92
3	3.61	3.69
4	8.24	8.52
5	59.36	59.81

*Fuente: elaboración propia.*



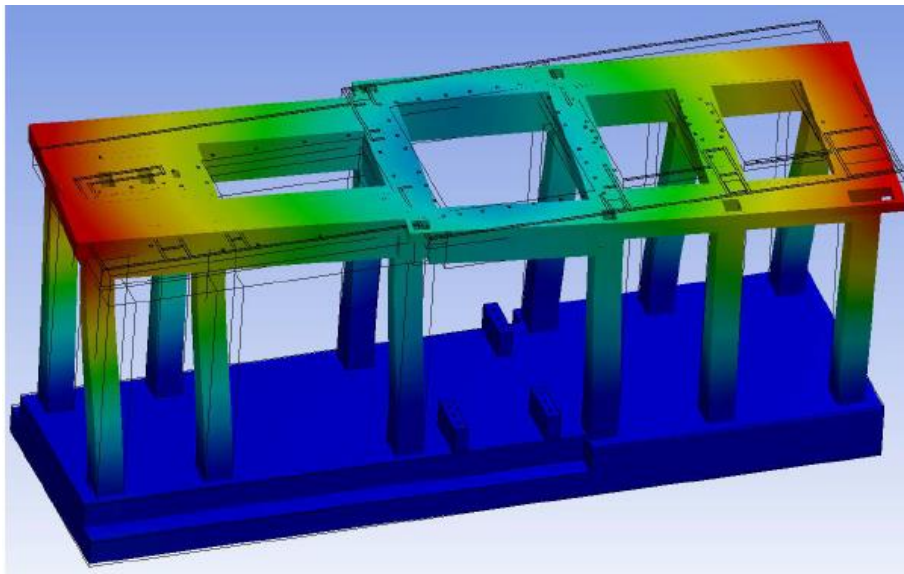
*Figura 3.1 Forma propia 1*

*Fuente: elaboración propia.*



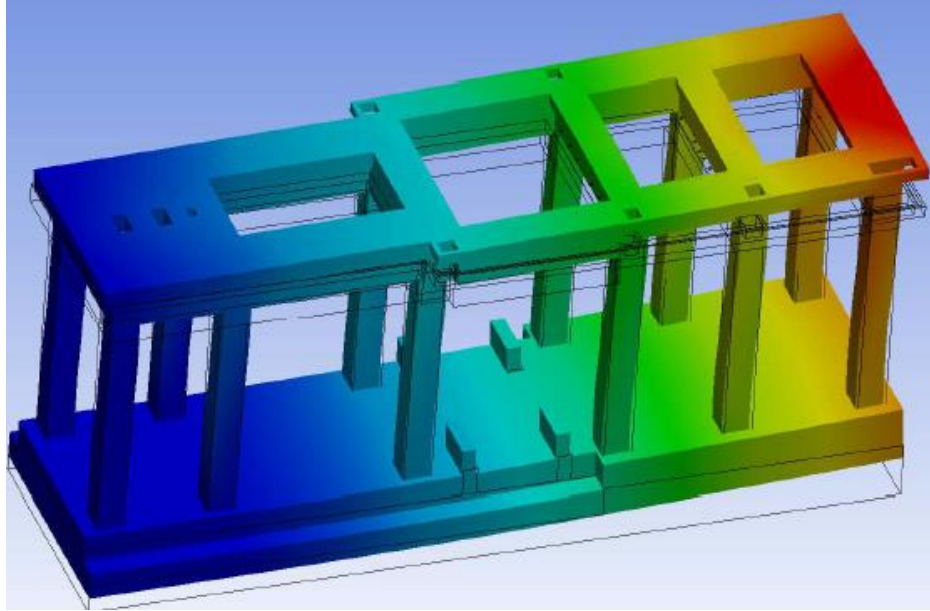
*Figura 3.2 Forma propia 2*

*Fuente: elaboración propia.*

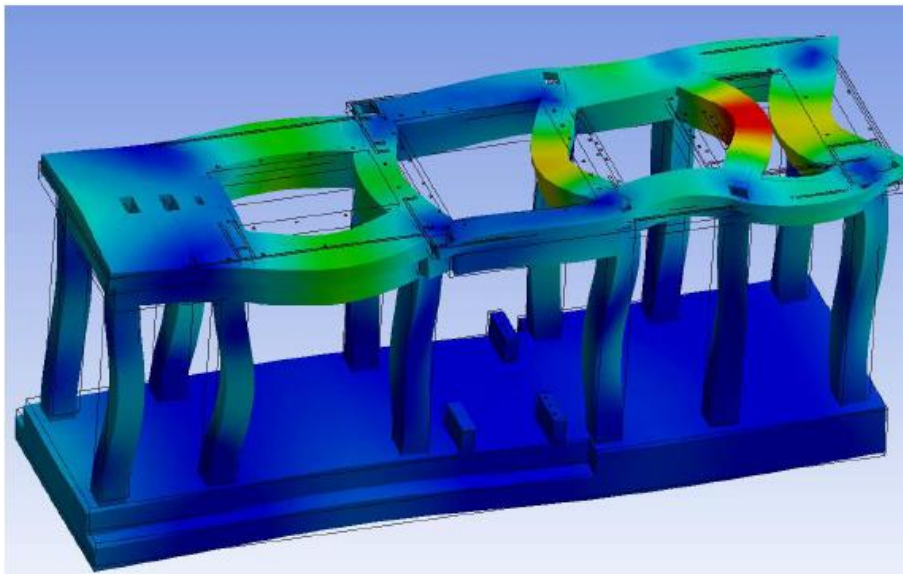


*Figura 3.3 Forma propia 3*

*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 3.4 Forma propia 4*  
*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 3.5 Forma propia 5*  
*Fuente: elaboración propia.*

### 3.3 Análisis de las vibraciones

Una vez analizados los modos propios de la estructura, se procede al análisis de las vibraciones que se generan en la mesa de cimentación.

Para el cálculo de las funciones que describen las amplitudes de fuerzas introducidas en cada punto *steady state*, se utiliza la siguiente ecuación dada por la norma STN 731020.

“Diseño de bases para máquinas rotativas”:

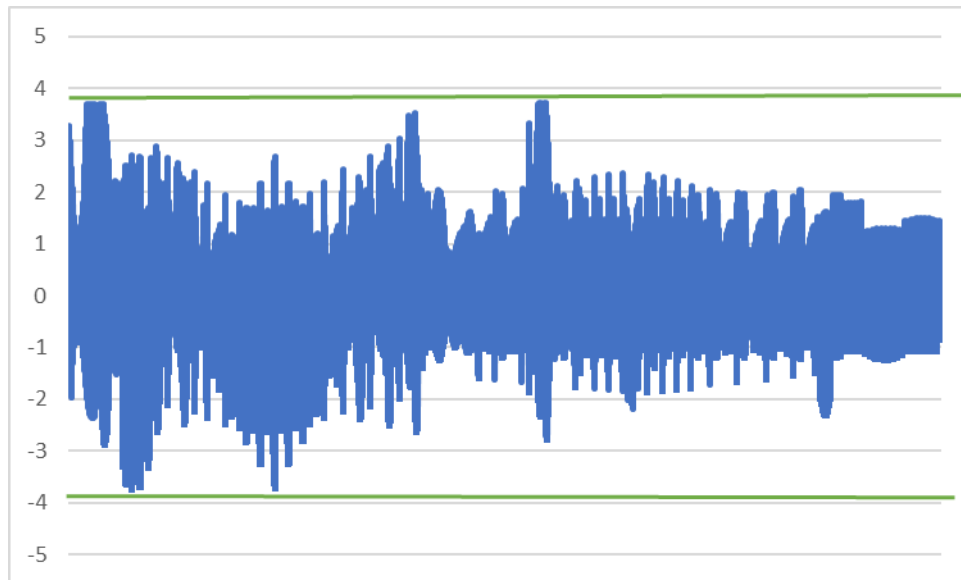
$$F=0.2R(f/f_{sr})^2, \text{ donde:}$$

R: Reacción del rotor en el respectivo lugar

f: Frecuencia de la máquina para la cual se calcula la fuerza de excitación

$f_{sr}$ : Frecuencia de servicio de la máquina.

La siguiente figura muestra el umbral de velocidades para todos los puntos de la base, la línea verde representa la velocidad de 3.8mm/s, la cual es la velocidad permisible por la norma ISO 10816 para el correcto funcionamiento de la maquinaria.



*Figura 3.6 Velocidades*

*Fuente: elaboración propia.*

En la figura anterior se muestra que todas las velocidades generadas en la mesa de cimentación para cada uno de los nodos analizados, no sobrepasan los 3.8mm/s

En la siguiente tabla se muestran algunos valores de las velocidades más críticas y sus respectivas frecuencias las cuales se generan en la mesa de cimentación.



*Tabla 3.10 Velocidad de vibraciones mayores*

Puntos	Vibraciones	
	Frecuencias (Hz)	Velocidad (mm/s)
1	60	3.72
2	60	3.71
3	36	3.72
4	36	3.70
5	36	3.69

*Fuente: elaboración propia.*

Como se puede apreciar, el valor máximo de velocidad de vibración es de 3.72 mm/s, menor que lo que establece la norma ISO 10816 para este tipo de maquinarias.

*Tabla 3.11- Recomendaciones del valor de las velocidades para cada una de las zonas.*

Zona límite	Velocidad del eje rotacional (r/min)	
	500 o 1800	3000 o 3600
	Velocidad de vibración (mm/s)	
A/B	2.8	3.8
B/C	5.3	7.5
C/D	8.5	11.8

*Fuente: (ISO 10816, 2009)*

La zona A se define como la zona ideal para el funcionamiento de la máquina nueva, por tanto, al situarse la velocidad crítica en dicha zona, la mesa de cimentación cumple con el presente requerimiento para el funcionamiento del turbo-generador.

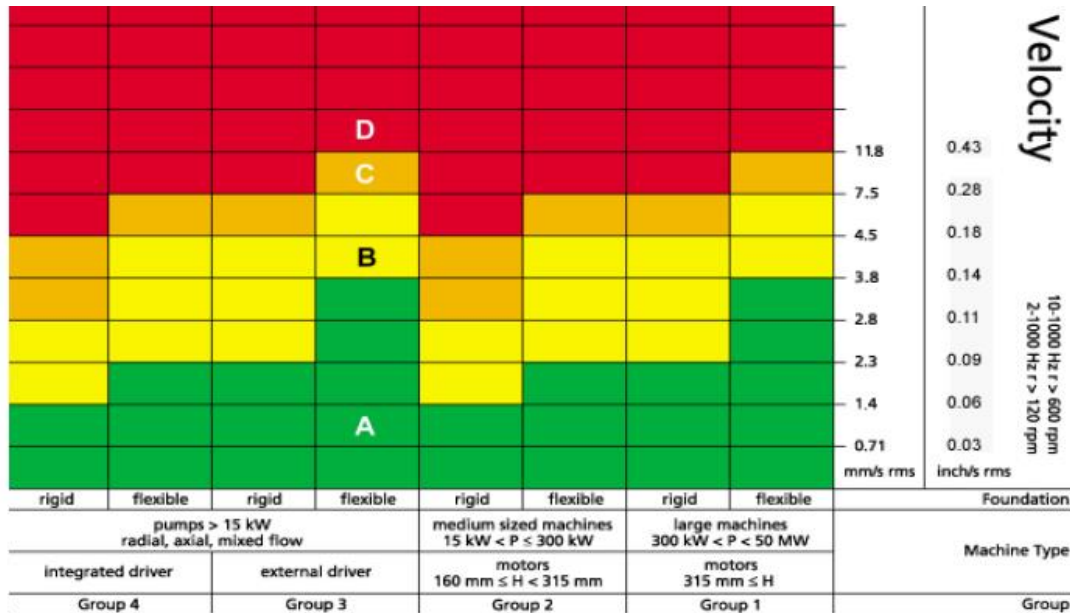


Figura 3.7 Zonas de funcionamiento correcto y defectuoso de la máquina

Fuente: (ISO 7919, 2009)

### 3.3.1 Análisis de los puntos críticos

Dentro de los requerimientos que sugiere este tipo de maquinaria, se encuentra el análisis de los desplazamientos de la mesa en los puntos críticos del eje. El siguiente esquema muestra la posición de dichos puntos.

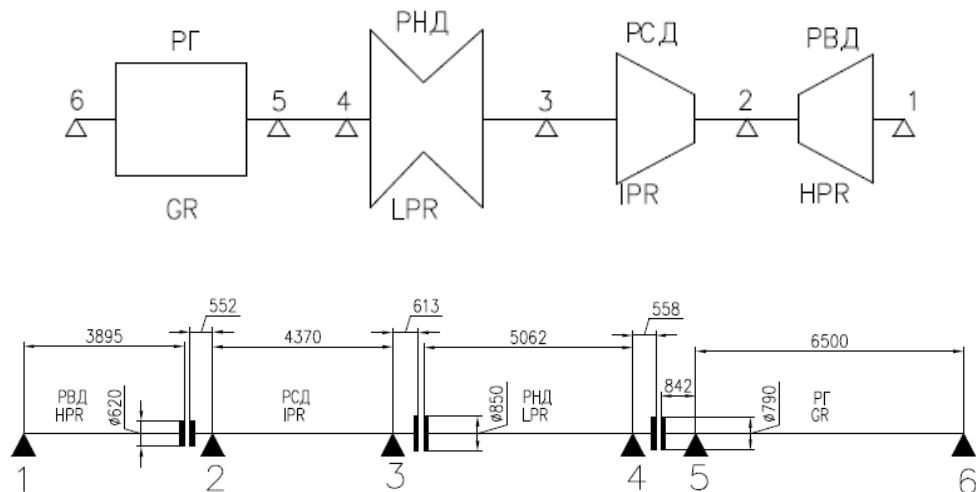


Figura 3.8 Puntos críticos

Fuente: (Klimov, 2017)

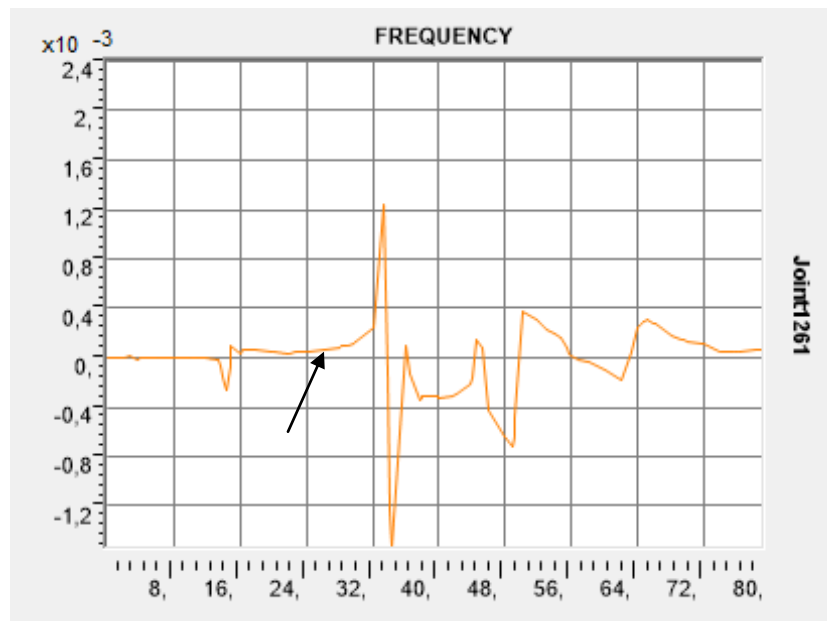
La siguiente tabla muestra los valores de frecuencias donde no deben producirse las deformaciones más críticas para cada uno de los puntos, o sea, los desplazamientos deben ser mínimos.

*Tabla 3.11-Puntos críticos*

Punto	1	2	3	4	5	6
Frecuencias críticas (Hz)	26.5	27.9	35.9	42.1	68.2	79.9

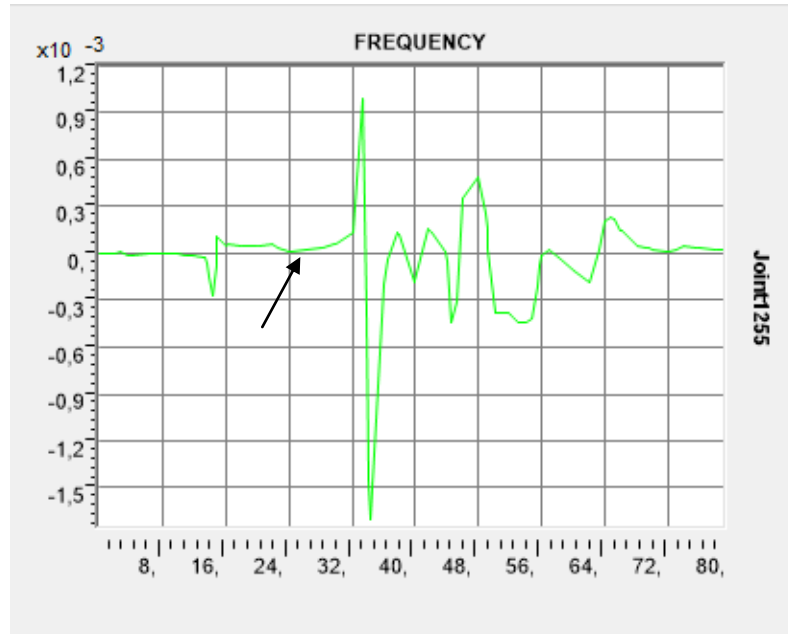
*Fuente: elaboración propia.*

A continuación, se muestra el gráfico de frecuencias contra deformaciones para cada punto.



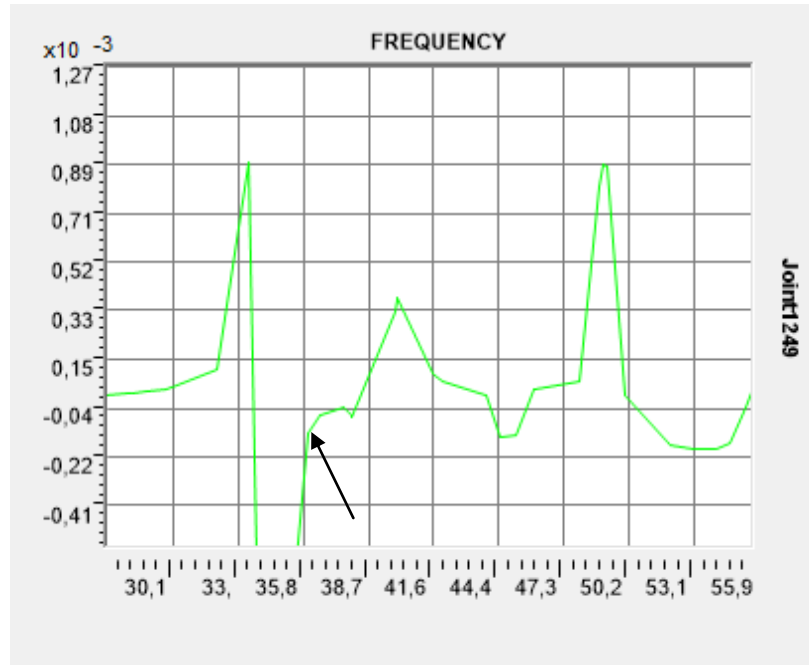
*Figura 3.9 Punto 1- 26.5Hz*

*Fuente: elaboración propia.*



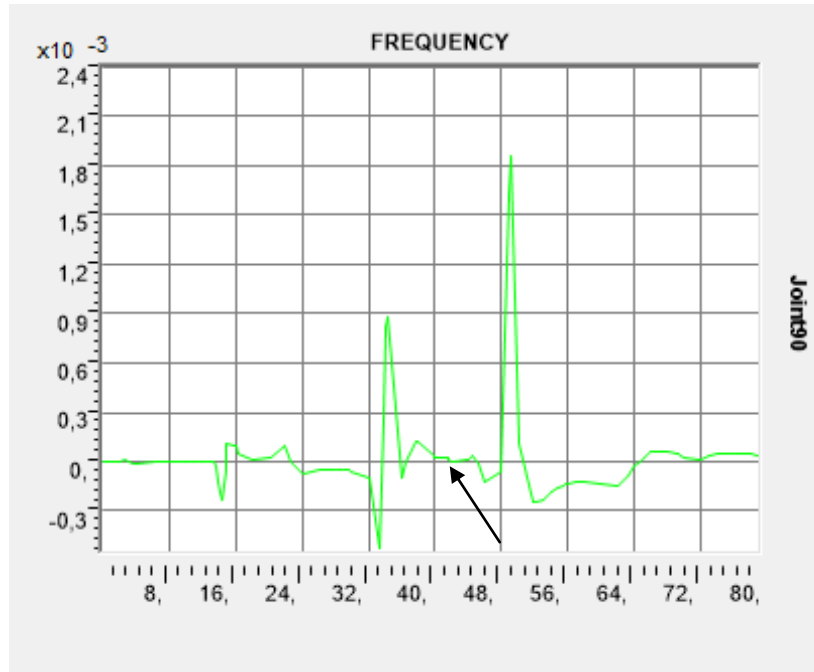
*Figura 3.10 Punto 2- 27.9 Hz*

*Fuente: elaboración propia.*



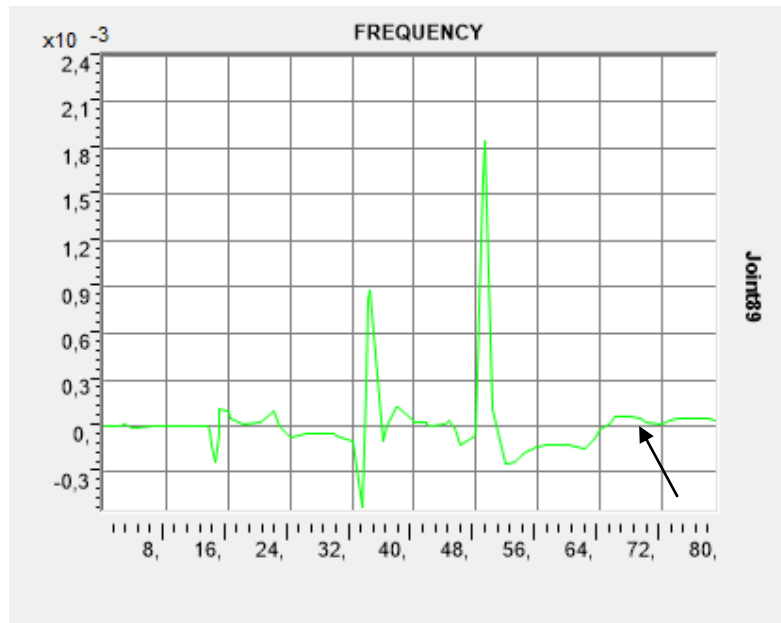
*Figura 3.11 Punto 3- 35.9 Hz*

*Fuente: elaboración propia.*



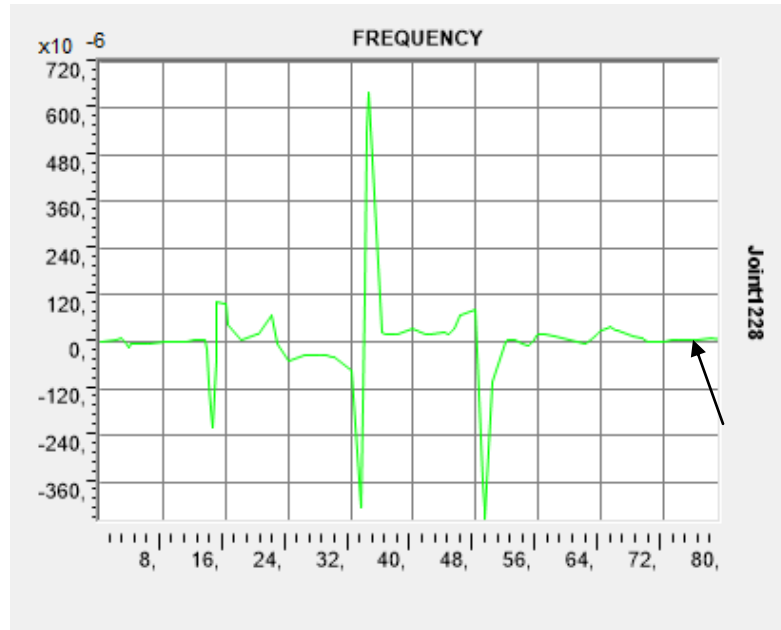
*Figura 3.12 Punto 4- 42.1 Hz*

*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 3.13 Punto 5- 68.2 Hz*

*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 3.14 Punto 6- 79.9 Hz*

*Fuente: elaboración propia.*

Como se puede apreciar en cada uno de los casos, los desplazamientos en sus respectivas frecuencias de análisis son mínimas, cumpliendo así con el requerimiento para los puntos analizados.

Conclusiones parciales del capítulo.

- La base cumple con los criterios de dimensionamiento para maquinarias como la del caso de investigación.
- Las velocidades que se generan en la mesa de cimentación no superan a las velocidades límites que establecen las normas para maquinarias y su correcto funcionamiento.
- Los desplazamientos en los puntos críticos de la mesa cumplen con los desplazamientos mínimos admisibles para la máquina.

## CONCLUSIONES

1. Investigaciones realizadas demuestran que en los últimos años se ha profundizado en los estudios acerca de la incidencia de las vibraciones provocadas por maquinarias en bases de hormigón armado.
2. El uso de la modelación trae consigo notorias ventajas, además de brindar información del comportamiento de objetos de forma complicada bajo la acción de cargas inimaginables, permite identificar y previamente erradicar problemas de diseño antes de fabricar un prototipo.
3. A partir del análisis de dimensionamiento de la mesa de cimentación, se comprueban los requerimientos para el tipo de maquinaria analizada en el caso de estudio, comprobándose que sí cumple con dichos criterios.
4. A partir del análisis dinámico de la mesa de cimentación se comprueba que las vibraciones generadas en la mesa a partir del funcionamiento de la máquina no superan a las vibraciones que requiere el equipo, comprobándose, que en los puntos críticos de del eje del turbo-grupo, no se sobrepasan los límites de deformaciones para este tipo de maquinarias.
5. A partir del desarrollo de la investigación queda demostrado que la realización del análisis de los requerimientos para turbogeneradores puede ser llevado a cabo en entidades dentro del territorio nacional.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda a la EMPAI profundizar en el estudio de las vibraciones de mesas de cimentaciones de turbo-generadores.
2. Se recomienda al Departamento de Construcciones de la Universidad de Matanzas continuar con la línea de investigación relacionada con las vibraciones mecánicas y su repercusión en las estructuras.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHATTI, K., LYSMER, J. & MONISMITH, C. 1994. *Dynamic Finite-Element Analysis of Jointed Concrete Pavements*.
- ENRIQUE, P. 2011. *Creación del Modelo de Vibraciones Libres para el Laboratorio Virtual de Vibraciones Mecánicas*.
- FLORES, J. E. 2012. *Análisis Dinámico de Cimentaciones Parque Industrial –ICA*.
- FRIAS, E. 2004. *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*, doctor
- FERRÁNDEZ, M. D. 2016. *Estudio de la transmisión de vibraciones por impacto en las losas de hormigón y mortero*. Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid.
- GARCÍA, J. 2015. *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba*. doctor, Universidad José Antonio Hecheverría.
- GARCÍA, I. J. 2016 *Modelación numérica de pisos industriales en concreto rígido*., Universidad de Matanzas sede Camilo Cienfuegos.
- HUANG, Y. & WANG, T. 1973. *Finite Element Analysis of Concrete Slab and its implication for rigid pavement design*, Washington D.C.
- HUANG, Y. H. 1985. *A Computer Package for Structural Analysis of Concrete Pavements, Proceedings*.
- International Organization for Standardization 2009, *Vibración de máquinas no-recíprocas. Mediciones realizadas en los ejes rotatorios*, ISO 7919
- International Organization for Standardization 2009, *Vibración mecánica. Evaluación de la vibración de máquinas en base a su medición en partes no-rotatorias de ella*, ISO 10816
- ISYUMOV, N. 2012. Alan G. Davenport's mark on wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106, 12-24.
- JAYARAJAN P., KOUZIER K. M. 2014, 'Dynamic Analysis of Turbo-generator Machine Foundations', *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, volumen 1, number 4, pp. 30-35
- KUO, C., HALL, K. & DARTER, M. 1995. *Three-Dimensional Finite Element Model for Analysis of Concrete Pavement Support*. Washington, D.C.

- LÓPEZ, E. S. 2010. *Manual de Diseño de Cimentación Tipo Pórtico para Equipo Dinámico*.
- LÁZARO, I. L. 2015. *Ensayo a escala de edificio de dos alturas sometido a desplazamientos horizontales*. Máster.
- MARTÍNEZ, A. D. 2003. *Aportación Metodológica para el Diseño de Sistemas de Aislamiento de Base para Estructuras de Soporte de Maquinaria Rotatoria*.
- PEÑA, P. F. 2016. *Proyecto Estructural de la Cimentación para una Prensa de Extrusión y su Equipo Periférico*, inédito.
- MAJOR, A. *Vibration Analysis and design of foundations for machines and turbines*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1962.
- MAYORAL, A. E. 2012. *Arquitectura a ojo de buen cubero: manual práctico de predimensionados de estructuras e instalaciones*. Ulzama
- Oliver, J 2019, Jose Oliver [Página web], consultado: 11 de abril de 2019, <http://www.upv.es>
- RAO, S. S. 2012. *Vibraciones Mecánicas*, México.
- RE CAREY, C. 1999. *Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo*. Doctor, Universidad Marta Abreu.
- RODRIGUEZ, A. 1991. *Análisis de vibraciones en cimentaciones para maquinarias*. Colombia.
- SES TLMACE 2017, INFORME DE PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DEL BLOQUE No.6 (1x100 MW), noviembre 2017, República de Eslovakia
- SRINIVASULU, P & VAIDYANATHAN, C. V., 1980, *Handbook of Machine Foundations*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi.
- VAZQUEZ, C. Y. 2018. *Modelación numérica de base para maquinaria tipo cuchilla del central "Mario Muñoz"*.
- ZETINA, I. J. 2011. *Diseño práctico de cimentaciones sujetas a vibración producida por maquinaria*.