



*Sede “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Construcciones*

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE LA
MESA DE CIMENTACIÓN DEL TURBOGENERADOR DE LA
CENTRAL TERMOELÉCTRICA “MÁXIMO GÓMEZ BÁEZ” DE
MARIEL.

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Alejandro Monteagudo Durán.

Tutor: Ing. Pedro A. Hernández Delgado.

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente, Alejandro Monteagudo Durán, declaro que soy el único autor del presente trabajo de Diploma y, en tal calidad, autorizo a la Universidad de Matanzas a emplearlo como material de consulta.

Y para que así conste, firmo el presente a los _____ días del mes de _____ de 2019.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

PRESIDENTE SECRETARIO VOCAL

RESUMEN

La presente investigación lleva como título: Análisis de la interacción suelo-estructura de la mesa de cimentación del turbogenerador de la central termoeléctrica “Máximo Gómez Báez” de Mariel, persiguiendo como objetivo general, evaluar el comportamiento suelo-estructura de la mesa de cimentación para el turbogenerador de la central termoeléctrica de Mariel; debido a la falta de conocimiento en Cuba sobre el diseño y análisis de estructuras de cimentación como las que soportan los turbogeneradores, se hizo necesario llevar a cabo una investigación para el correcto estudio sobre las mismas. Para ello es necesario estudiar el estado del conocimiento respecto a estas cimentaciones y su comportamiento bajo cargas estáticas y dinámicas. Durante el proceso investigativo fueron empleados algunas herramientas informáticas, dentro de estas se encuentran: el software Excel como hoja de cálculo para mayor organización y agilidad y el uso del SAP 2000 como herramienta de modelación y análisis numérico mediante el método de elementos finitos para el análisis estático y dinámico de la estructura. Como resultado se espera obtener la influencia del suelo en el comportamiento sobre la estructura.

Palabras claves: turbogenerador, cimentación, estructura, estática, dinámica.

ABSTRACT

The present investigation takes like title: Analysis of the interaction soil-structure of the table of foundations of the turbogenerator of the thermal power station "Máximo Gómez Báez" of Mariel, pursuing like general objective, to evaluate the behavior soil-structure of the table of foundations for the turbogenerator of the Mariel thermoelectric power station; Due to the lack of knowledge in Cuba about the design and analysis of foundation structures such as those supported by turbogenerators, it was necessary to carry out an investigation for the correct study of them. For this it is necessary to study the state of knowledge regarding these foundations and their behavior under static and dynamic loads. During the research process, some computer tools were used, including Excel software as a spreadsheet for greater organization and agility and the use of SAP 2000 as a modeling and numerical analysis tool using the finite element method for analysis. static and dynamic structure. As a result, it is expected to obtain the influence of the soil on the behavior on the structure.

Keywords: turbogenerator, foundation, structure, static, dynamic.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1 Estado del arte y la práctica en el análisis y diseño de estructuras de soporte para turbo-grupos.	5
1.1- Antecedentes.	5
1.2- Generalidades sobre turbogeneradores.	7
1.2.1- Funcionamiento de las máquinas.	7
1.2.2- Tipos de cimentaciones.	7
1.3- Diagnóstico dinámico.	10
1.4- Conceptos de dinámica aplicados a las cimentaciones.	10
1.4.1- Vibraciones.	11
1.4.2- Período.	11
1.4.3- Frecuencia.	11
1.4.4- Frecuencia Natural.	11
1.4.5- Amplitud del movimiento.	11
1.4.6- Grado de Libertad.	12
1.4.7- Resonancia.	12
1.4.8- Amortiguamiento.	12
1.5- Importancia del estudio de las vibraciones en las construcciones.	12
1.5.1- Tipos de vibraciones.	13
1.5.2- Aislamiento de las vibraciones.	14
1.5.3- Criterios Estructurales.	15
1.5.4- Causas más frecuentes de vibraciones en los Turbogenerador.	16
1.8- Estándares o Normas.	17
1.10.1- Estándares ISO para el monitoreo operacional de las máquinas. ...	17
1.10.2- Los estándares para la medición y evaluación de la severidad de la vibración son clasificados en dos tipos:	17
1.10.3- Estándares para el monitoreo operacional de las máquinas.	18
1.9- Diseño en el SAP 2000 V20.	20
1.9.1- Método de elementos finitos.	20
1.9.2- Análisis Modal.	21
Conclusiones parciales	21
Capítulo 2. Materiales y métodos	23
2.1- Propósito del capítulo.	23
2.2- Planteamiento del problema.	23
2.3- Datos generales de la estructura.	23
2.4- Características de la máquina.	25
2.5- Estudio de suelo.	25
2.5.1- Modelo del suelo.	27

2.6- Cargas.....	27
2.6.1- Cargas estáticas.	27
2.6.2- Cargas dinámicas.	28
2.7- Revisión del dimensionamiento.	29
2.8- Modelo en SAP 2000.	37
2.9- Mallado del modelo en SAP.....	38
2.10- Interacción suelo-estructura.....	45
Conclusiones parciales	45
Capítulo 3 Análisis de los resultados alcanzados	47
3.1- Revisión del dimensionamiento de la cimentación	47
3.2- Resultados del análisis dinámico.....	54
3.3- Análisis Modal.....	55
3.2.1.2- Vibraciones máximas.....	58
Conclusiones.....	60
Recomendaciones	61
Referencias Bibliográficas	62

INTRODUCCIÓN

Los turbogeneradores (TG) son maquinarias generadoras de energía usadas en las centrales eléctricas y forman una parte vital y cara de estas. Estos equipos son soportados por una estructura de cimentación compuesta por: tablero superior, columnas y balsa. La losa superior soporta todo el equipamiento incluyendo: la turbina, el generador y otros equipos rotativos. La seguridad, la estabilidad, la durabilidad y la fiabilidad de la estructura deberán ser consideradas al diseñar el sistema de cimentación (S.A. Halkude, 2017, Madhu Priya M, 2017). Dichas estructuras generan una gran dificultad para su análisis y diseño debido a las vibraciones y las deformaciones que pueden generarse sobre la misma (S.A. Halkude, 2017, Madhu Priya M, 2017, Jayarajan P., August, 2014). El análisis y el diseño de la cimentación del turbogenerador es un problema complicado por la interacción de Ingeniería Estructural, Ingeniería en Geotecnia y la Teoría de vibración (Madhu Priya M, 2017). Es esencial que el diseño se realice adecuadamente para todas las combinaciones posibles de carga estática y dinámica. Los turbogeneradores en las centrales a menudo son colocados en estructuras flexibles sobre las que corren las maquinarias y pueden, por tanto, contribuir a su dinámica. Estos efectos, juegan un mayor papel sobre el dimensionamiento de la cimentación en donde las buenas condiciones de resonancia son para evitar la variación de la rigidez y la masa de la estructura y así, sus dimensiones. El sistema de la cimentación puede ser de tipo bloque, de tipo marco y marco con aislador. La cimentación de tipo marco es preferida, por soportar altas velocidades de la maquinaria debido a salvar en espacio, tiempo y materiales, facilitando la accesibilidad para la inspección de máquina (Madhu Priya M, 2017).

En el país no se encuentra a menudo este tipo de máquinas en las centrales eléctricas, son muy escasas las que integran estos turbogeneradores y se posee poco conocimiento sobre el análisis y diseño de las cimentaciones que soportan estas maquinarias. En la Habana, la central termoeléctrica (CTE) “Máximo Gómez Báez” de Mariel posee una de estas estructuras, la cual estuvo operando en modo dinámico durante unos 45 años, mostrando signos de una capacidad dinámica reducida, siendo necesario realizar un análisis y cálculo dinámico de la cuna del turbogenerador para conocer las capacidades soportantes del mismo y analizar la interacción suelo-estructura e intentar rehabilitarlo (Ján Benčat, abri,2017, Ján Benčat, julio,2017).

Es una estructura que ha sufrido el deterioro propio de la explotación y el envejecimiento lo que aumenta la incertidumbre acerca de la capacidad resistente de la estructura para el uso de un nuevo

equipo. La complejidad del proyecto de rehabilitación se considera alta y está dada en gran medida por todos los aspectos de tipo tecnológicos involucrados, así como los estados de carga y las combinaciones que se derivan de la operación de la maquinaria (turbogenerador).

Situación Problemática: La necesidad de analizar la interacción suelo-estructura de la cimentación del turbogenerador de la central termoeléctrica “Máximo Gómez Báez” de Mariel.

Problema Científico: ¿Cómo incide el suelo en el análisis dinámico de la mesa de cimentación del turbogenerador de la central termoeléctrica “Máximo Gómez Báez” de Mariel?

Campo de acción: Modelo para la revisión de cimentaciones de turbogenerador en centrales eléctricas.

Objeto de estudio: Modelación en SAP 2000 de la base de la cimentación del turbo-grupo de la CTE de Mariel.

Objetivo General: Evaluar el comportamiento suelo-estructura para la colocación de un nuevo turbogenerador.

Objetivos Específicos:

- Analizar el estado del arte y la práctica en el diseño y revisión de turbogenerador y su interacción con el suelo.
- Describir parámetros y procedimientos para modelar numéricamente la estructura de cimentación del turbogenerador de la CTE de Mariel.
- Análisis de la interacción suelo-estructura en la CTE de Mariel.

Hipótesis: Si se realizara el modelo numérico ajustado en SAP 2000 de la cimentación del turbogenerador de la CTE “Máximo Gómez Báez” de Mariel, se caracterizará la influencia del suelo sobre la estructura.

De la hipótesis quedan definidas las variables de la investigación:

Variable Independiente: Modelación numérica ajustada de la cimentación del turbogenerador de la CTE “Máximo Gómez Báez” de Mariel.

Variable dependiente: Caracterización del comportamiento suelo-estructura.

Tareas de Investigación:

- Analizar el estado de arte sobre el estudio de cimentaciones de turbogeneradores.
- Adquirir los parámetros de la máquina y de la cimentación del turbogenerador.
- Modelación numérica de la cuna de apoyo de la CTE “Máximo Gómez Báez” de Mariel.
- Analizar el comportamiento de la interacción suelo-estructura.

Métodos Científicos:

La investigación se fundamenta mediante el empleo de los siguientes métodos científicos entre los que figuran:

Método teórico:

- Analítico-sintético: Este permitirá el análisis de la situación problemática y a buscar la información necesaria para definir el problema y la hipótesis de la investigación.
- Histórico-lógico: Se realiza un estudio acerca de los trabajos realizados a lo largo de la historia sobre el análisis y diseño de cimentaciones de turbogeneradores.

Método de nivel empírico:

- Observación directa: Estudio sobre el turbogenerador de la CTE “Máximo Gómez Báez” de Mariel, el cual estuvo operando en modo dinámico durante varios años, mostrando signos de una capacidad dinámica reducida, siendo necesario realizar un análisis y cálculo dinámico para conocer el comportamiento de la interacción suelo-estructura para la colocación de un nuevo equipo.
- Estudio de fuentes documentales: Se llevará a cabo el estudio de la norma ISO 10816-2: 2001 de la International Organization for Standardization para el estudio de la cimentación del turbogenerador.

Estructura de la tesis

Introducción: Se tiene como objetivo principal el estudio de la estructura del turbogenerador de la central termoeléctrica CTE “Máximo Gómez Báez” de Mariel para analizar el comportamiento suelo-estructura al estar sometido a cargas estáticas y dinámicas. En el futuro se pretende instalar un nuevo turbogenerador para esta cuna de apoyo que, en términos de carga cuenta con los mismos parámetros que el turbogenerador original y se espera que la nueva turbina opere durante unos 50 años más. Para analizar la situación de dicha estructura, fue diseñada en el programa informático SAP 2000 V20 teniendo en cuenta cada una de sus dimensiones y materiales originales de la estructura para evaluar la interacción suelo-estructura.

Capítulo 1- Fundamentación teórica: Mediante este capítulo es justificado el objetivo de este trabajo, mostrando el estado actual del tema de investigación y se establecen conceptos básico según los materiales recopilados.

Capítulo 2- A través de este capítulo se definen los parámetros necesarios para la modelación. Se dan a conocer las características de la estructura, su geometría, materiales y datos necesarios sobre el suelo, para realizar el análisis del dimensionamiento de la estructura de cimentación y realizar su diseño en el SAP 2000 para estudiar la interacción suelo-estructura.

Capítulo 3- Análisis de los resultados alcanzados sobre la interacción suelo-cimentación.

Conclusiones

Recomendaciones

Referencias Bibliográficas

CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE PARA TURBO-GRUPOS.

El turbogenerador forma el corazón de una central eléctrica. Es el equipo más vital y caro de un complejo de planta de energía y generalmente se encuentra dentro de un edificio de turbogeneradores. Los cimientos de las máquinas requieren una consideración especial porque transmiten cargas dinámicas al suelo además de cargas estáticas debido al peso de la cimentación, la máquina y los accesorios. Entre los factores más importantes a tener en cuenta en el análisis de la interacción suelo-estructura se encuentran la frecuencia, la amplitud, frecuencia de excitación y resonancia. Este capítulo tiene como objetivo principal brindarle al lector, cómo se encuentra el estado de arte y la práctica en el análisis y diseño de estructuras de soporte de equipamiento tecnológico de centrales termoeléctricas.

1.1- Antecedentes.

El estudio de las cimentaciones de los turbogeneradores es un problema muy complejo debido a las vibraciones y deformaciones que genera el funcionamiento de las máquinas sobre dichas estructuras.

Varios autores han centrado su atención en el estudio dinámico sobre las estructuras de cimentación de equipamiento tecnológico de instalaciones industriales, definiendo patrones de comportamiento de los parámetros característicos del funcionamiento de los turbogeneradores y sus implicaciones en el comportamiento del suelo de soporte.

Prakash and Puri (2006) discuten los métodos de análisis para determinar la respuesta de los cimientos debido a las cargas vibratorias y el diseño de los cimientos de la máquina se realiza al idealizar el sistema de suelo del cimiento como un modelo de manantial de salpicadero de muelles con grados de libertad simples o dobles. Dado que la mayoría de los cimientos para la máquina se tratan como pie de superficie, los valores de amortiguación y resorte del suelo pueden obtenerse siguiendo el enfoque de la función de cumplimiento de impedancia y también utilizando el análogo de medio espacio elástico.

Bhatia (2008) ha tomado medidas de la vibración de campo en una base de turbogenerador de 200 MW y ha estudiado el comportamiento dinámico de las bases de turbogenerador de varias clasificaciones. También indicó la importancia del efecto de interacción de la estructura del suelo en la respuesta dinámica y las recomendaciones, incluido el efecto de interacción de la estructura del

suelo para los cálculos de respuesta dinámica basados en los resultados de los estudios analíticos y experimentales. Basado en un análisis sísmico detallado.

Fleischer and Trombik (2008) elaboran un enfoque de diseño práctico de sistemas de cimientos de tipo balsa, montados sobre muelles y montados en mesa, y le da importancia a la distribución de la carga a lo largo de la altura, aparte de los parámetros locales, tales como amplificaciones de suelo y aceleraciones del terreno.

Nawrotzki et al. (2008) presentan una visión general sistemática del análisis estático y dinámico de los cimientos de concreto reforzado con turbinas y también se enfoca en los casos de carga que deben aplicarse para la cimentación. Evalúan el valor de la rigidez estática de la cimentación y la rigidez dinámica de la cimentación y proporciona el límite máximo requerido y las comprobaciones del estado del límite de servicio.

Para la investigación detalladas sobre las características dinámicas del sistema de suelo de la base de una turbina, Ming et al. (2008) construyeron un modelo de elementos finitos altamente desarrollado y complejo para considerar el efecto del suelo y la vibración de la instalación. Se consideraron todos los componentes principales del sistema, incluidos el eje, el cojinete liso, los pilares, la plataforma, los rotores, las pilas, la base de la base y el medio del suelo, junto con la interacción completa entre la instalación, la base y el medio del suelo. Fue analizado el sistema de suelo de la base de turbina de 1000MW bajo excitaciones de terremotos y desequilibrios del rotor. Se utilizaron elementos de borde de resorte viscoso tridimensional para explorar la influencia de la interacción de la estructura del suelo en la respuesta del sistema. El efecto sobre la aceleración y la fuerza interna es mínimo, la presencia de suelo afecta los desplazamientos del sistema bajo excitaciones sísmicas.

Jayarajan P. (August, 2014) se centra en el análisis dinámico para calcular la frecuencia natural de vibración bajo una condición de carga que no debe estar dentro del $\pm 20\%$ de la frecuencia de operación y las velocidades críticas. Este destaca los problemas de análisis dinámico relacionados con el modelado matemático de la estructura, el suelo y la máquina. Dado que el método de elementos finitos proporciona una herramienta eficiente para el análisis dinámico y el modelado, Jayarajan utiliza SAP 2000 para realizar análisis de vibración libre y vibración forzada y también estudió el modelado de elementos finitos de la estructura y concluye que el análisis dinámico necesita atención al detalle, tanto en la interpretación de resultados como en el modelado de cimientos de turbinas.

1.2- Generalidades sobre turbogeneradores.

Los turbogeneradores son máquinas encargadas de transformar la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Al transformar la energía interna del vapor en energía mecánica, esta es aprovechada por un generador para producir electricidad (Garrido, 2011).

1.2.1- Funcionamiento de las máquinas.

Basándose en la función de operación de las maquinarias, estas pueden ser divididas en tres grupos:

- Grupo 1.- Frecuencias de bajas a medias, con valores de 0-500 revoluciones por minuto (r.p.m).
- Grupo 2.- Frecuencias de medias a altas, con valores de 300-1000 r.p.m.
- Grupo 3.- Frecuencias muy altas con valores mayores que 1000 r.p.m

Dentro del grupo 3, se encuentran las máquinas de combustión interna de alta velocidad, motores eléctricos y turbogeneradores, el cual será objeto de estudio en este trabajo (Alvarado, 1998, Peña Carrera, 2016, Castro, 2015).

Para el soporte de estos equipos existen diferentes diseños de cimentaciones de los cuales debemos tener conocimiento. A continuación, se muestran los diferentes tipos de cimentaciones existentes.

1.2.2- Tipos de cimentaciones.

Según Álvarez (2015), a lo largo de toda la vida útil de una cimentación esta deberá ser capaz de soportar todos los esfuerzos a los que estará sometida, de manera segura y eficiente. Cuando hablamos de estructuras que sustentarán maquinaria hay que considerar, además de los esfuerzos estáticos que ésta genera, los movimientos propios del funcionamiento de la maquinaria que se encuentran en función de su velocidad de operación y del tipo de equipo; asumiendo que los esfuerzos pueden variar dependiendo el tipo de maquinaria.

Atendiendo a su rigidez, las estructuras de cimentación para maquinaria se pueden clasificar en cuatro tipos:

1. Tipo bloque
2. Tipo caja

3. Tipo muro
4. Tipo pórtico

1. Cimentación tipo bloque.

Consiste en un pedestal de concreto sobre el cual “reposa” la máquina (Peña Carrera, 2016, Castro, 2015, Franciscaa and Arrúac, 2007, Alvarado, 1998).

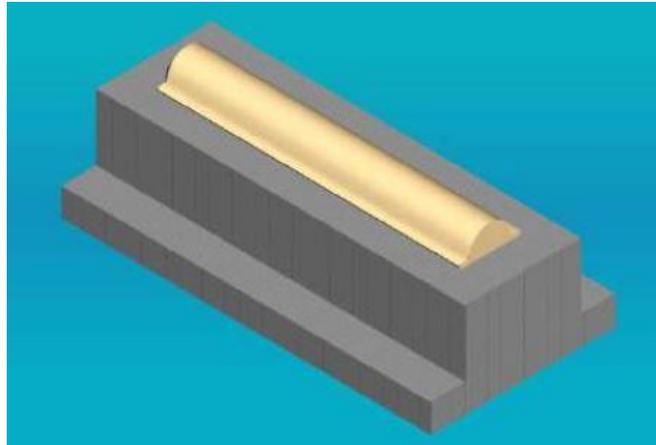


Figura 1.1 Cimentación tipo bloque.

Fuente:(Peña Carrera, 2016)

2. Cimentación tipo cajón.

Consiste en un bloque hueco de concreto en cuya losa tapa, soporta a la máquina (Peña Carrera, 2016) (Franciscaa and Arrúac, 2007, Alvarado, 1998).

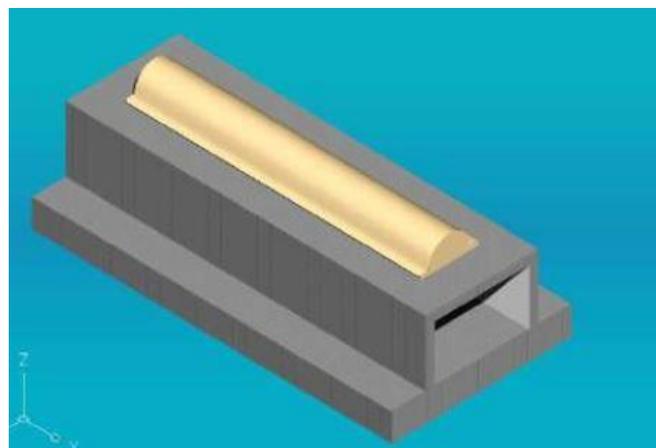


Figura 1.2 Cimentación tipo cajón.

Fuente: (Peña Carrera, 2016)

3. Cimentación tipo muro.

Consiste en un par de muros los cuales soportan a la máquina en la parte superior (Peña Carrera, 2016, Franciscaa and Arrúac, 2007, Alvarado, 1998).

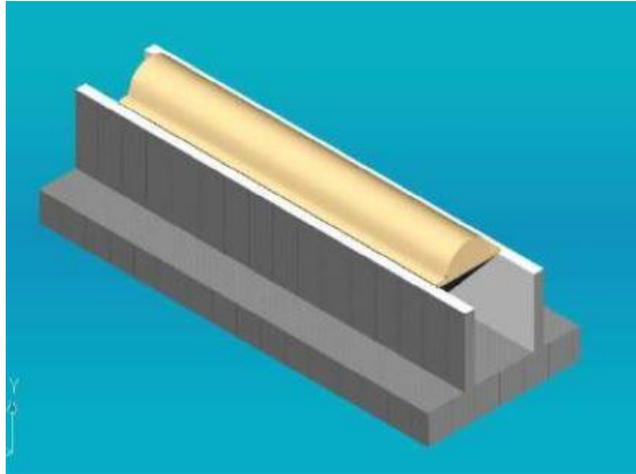


Figura 1.3 Cimentación tipo muro.

Fuente: (Peña Carrera, 2016)

4. Cimentación tipo pórtico.

Formado por columnas verticales que en su parte superior soportan un marco horizontal para soportar la máquina (Franciscaa and Arrúac, 2007, Peña Carrera, 2016, Alvarado, 1998).

Este diseño es el más utilizado para los turbogeneradores, tomando en cuenta aspectos como el del funcionamiento y la economía y permiten acomodar entre las columnas los equipos auxiliares necesarios. Estas pueden construirse con concreto reforzado o acero, siendo las de concreto reforzado las más comunes (Alvarado, 1998, Madhu Priya M, 2017).

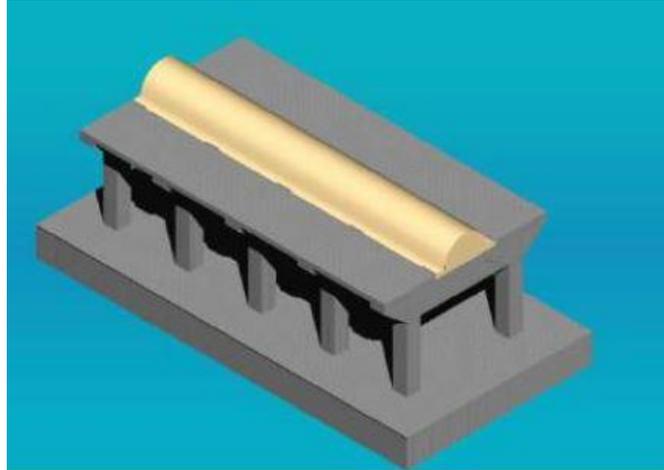


Figura 1.4 Cimentación tipo pórtico.

Fuente: (Peña Carrera, 2016)

1.3- Diagnóstico dinámico.

La prueba a realizar se centrará en analizar la interacción suelo-estructura y servirá, principalmente, para conocer el comportamiento entre estos dos elementos y diagnosticar sus características dinámicas. Para este estudio resultan primordiales las primeras vibraciones propias (globales) y las formas de vibración. Se trata de una comparación experimental de los valores obtenidos de las mediciones de las frecuencias propias y aquellos valores calculados por el diseñador. Para el diagnóstico estructural se emplearán métodos teóricos que servirán para la evaluación del estado real de la cimentación del turbogenerador, teniendo siempre en cuenta tanto su carácter estático como dinámico (Michal Tomko, 2018). Para llevar a cabo todo este análisis es necesario conocer algunos conceptos básicos de la dinámica aplicada a las cimentaciones que serán mostrados a continuación.

1.4- Conceptos de dinámica aplicados a las cimentaciones.

Según Álvarez (2015) en las cimentaciones sometidas a cargas dinámicas generadas por la acción de máquinas, como los turbogeneradores, las cargas a analizar son de tipo periódicas, que pueden representarse por una función trigonométrica senoidal o cosenoidal. Se debe proponer una cimentación que soporte dichos esfuerzos con seis grados de libertad. Los principales aspectos a considerar son las amplitudes de vibración del sistema y la revisión del fenómeno de resonancia. A continuación, son presentados algunos conceptos básicos de la física en relación a la teoría de vibraciones:

1.4.1- Vibraciones.

Cualquier movimiento que se repite con respecto a una posición de equilibrio después de un intervalo de tiempo se llama vibración u oscilación, por ejemplo, el vaivén de un péndulo y el movimiento de una cuerda pulsada son ejemplos muy comunes de vibración. La teoría de la vibración tiene que ver con el estudio de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas asociadas con ellos (Saavedra, Álvarez, 2015).

1.4.2- Período.

Es el intervalo de tiempo que se requiere para completar un ciclo de movimiento y se mide en unidades de tiempo (segundo). Si un movimiento se repite en el mismo intervalo de tiempo a este se le llama movimiento periódico (Álvarez, 2015).

$$T = \frac{1}{\text{frecuencia}} = \frac{1}{f} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

1.4.3- Frecuencia.

Es una magnitud que mide el número de ciclos que se dan en un determinado tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico (Álvarez, 2015).

Para calcular la frecuencia se contabilizan un número de ocurrencias de este teniendo en cuenta un intervalo temporal, después estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido.

$$f = \frac{1}{\text{periodo}} = \frac{1}{T} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

1.4.4- Frecuencia Natural.

Es la frecuencia con la que vibra determinado sistema oscilatorio bajo la acción de las fuerzas inherentes al sistema sin la acción de fuerzas externas. Es una frecuencia permanente dentro del sistema cuya magnitud depende del comportamiento propio del sistema. Ciclos por segundo de un sistema lineal en oscilación libre (Álvarez, 2015).

1.4.5- Amplitud del movimiento.

Es la distancia máxima que alcanza un cuerpo durante las vibraciones desde su posición en reposo. Es una medida de la variación máxima del desplazamiento que varía de forma periódica en el tiempo. Se expresa también como la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio (Álvarez, 2015).

1.4.6- Grado de Libertad.

Como concepto físico se expresa como el número de tipos de movimiento que puede tener un objeto, el máximo es seis: tres traslaciones y tres rotaciones. Además indica el número de coordenadas independientes necesarias para definir el movimiento de un sistema (Álvarez, 2015, Castañeda, 2018).

1.4.7- Resonancia.

A medida que la frecuencia de funcionamiento se aproxima a la frecuencia de la cimentación, se produce una ampliación de la respuesta estática. A este efecto se le conoce como resonancia, caracterizado por generar grandes desplazamientos en las estructuras, e incluso su colapso. Estas deformaciones o desplazamientos generados pueden dañar la máquina que soportan y/o causar molestias a los operadores, por lo que el objetivo del diseño de cada cimentación es que no se manifiesten estos efectos (Castro, 2015, Álvarez, 2015).

Evitar la resonancia es uno de los factores críticos para lograr un diseño exitoso donde las vibraciones generadas por la máquina están presentes, a menos que el sistema sea altamente amortiguado (Castro, 2015).

1.4.8- Amortiguamiento.

El amortiguamiento está relacionado a la disipación de energía y absorber la respuesta de un sistema mecánico, se opone a las vibraciones libres de dicho sistema. Si la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad de vibración se denomina amortiguamiento viscoso, si por el contrario, esta fuerza es constante se conoce como amortiguamiento de Coulomb (Álvarez, 2015).

1.5- Importancia del estudio de las vibraciones en las construcciones.

El estudio de las vibraciones tiene gran importancia en las estructuras diseñadas para soportar máquinas centrífugas pesadas como motores de vapor y turbinas que pueden generar el aumento de los esfuerzos y tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales y daños por fatiga de los materiales y deformaciones que se pueden generar en estas estructuras. Entre los factores más importantes a tener en cuenta se encuentran la frecuencia, la amplitud, frecuencia de excitación y resonancia. Además del efecto provocado sobre las estructuras, se analizan los efectos que las vibraciones pueden originar en las personas que permanentemente trabajan cerca de la fuente vibracional. Es posible que, sin ser de gran magnitud, produzca una sensación de incomodidad que afecte el normal rendimiento laboral. Todas estas invariantes son de especial importancia a la hora

del diseño y construcción de este tipo de estructuras (LLeonart, 2013, Saavedra, Rao, 2012, Flores Gómez, 2012, Castañeda, 2018).

1.5.1- Tipos de vibraciones.

La vibración se puede clasificar de varias maneras de acuerdo al criterio que se emplee. Algunas de las clasificaciones consultadas 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(Rao, 2012).

- **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 diésel es un ejemplo de vibración forzada (Castañeda, 2018, Castro, 2015, Alvarado, 1998, Rao, 2012).

- **Vibración determinística y vibración no determinística:**

Si el valor o magnitud de la fuerza o movimiento que actúa en un sistema vibratorio se conoce en cualquier tiempo dado, la excitación se llama determinística. La vibración resultante se conoce como vibración 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 (Castañeda, 2018, Castro, 2015, Alvarado, 1998, Rao, 2012).

- **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 (Castañeda, 2018, Castro, 2015, Alvarado, 1998, Rao, 2012).

- **Vibración no amortiguada y amortiguada:**

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. 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 (Castañeda, 2018, Castro, 2015, Alvarado, 1998, Rao, 2012).

- **Elementos de amortiguamiento:**

En muchos sistemas prácticos, la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido. Debido a la reducción de energía, la respuesta, como el desplazamiento del sistema, se reduce gradualmente. El mecanismo mediante el cual la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido se conoce como amortiguamiento. Aun cuando la cantidad de energía convertida en calor o en sonido es relativamente pequeña, la consideración del amortiguamiento llega a ser importante para predecir con exactitud la respuesta a la vibración de un sistema. Se supone que un amortiguador no tiene masa ni elasticidad, y que la fuerza de amortiguamiento existe sólo si hay una velocidad relativa entre los dos extremos del amortiguador. Es difícil determinar las causas del amortiguamiento en sistemas prácticos (Castañeda, 2018, Castro, 2015, Alvarado, 1998, Rao, 2012).

1.5.2- Aislamiento de las vibraciones.

Si una máquina es rígidamente atornillada al piso, el movimiento vibratorio de la máquina en sí mismo puede ser reducido, pero la vibración transmitida al piso será grande. Esto puede producir efectos perjudiciales incluso a largas distancias. Por otro lado, si se proporciona bajo la máquina o su cimentación un soporte flexible esto puede causar movimiento significativo de la máquina durante su operación normal o durante el arranque y el apagado de la misma. Para obtener una solución intermedia entre ambos extremos, es necesario elegir una adecuada frecuencia natural para la cimentación de la máquina (Alvarado, 1998, Peña Carrera, 2016).

Según Peña Carrera (2016), para evitar vibraciones excesivas debido al trabajo de la máquina, se deberán considerar en el diseño los siguientes puntos:

1. Selección del sitio: La vibración causada por la maquinaria tal como: prensas de forja, martillos, compresores, etc., debe ser localizada lo más lejos posible de la zona donde se efectúen trabajos de precisión como el torneado, por ejemplo.
2. Balanceo de cargas dinámicas: La máquina debe estar dinámicamente balanceada para limitar las fuerzas desbalanceadas generadas por su operación.
3. Adoptar la cimentación adecuada: La cimentación para la maquinaria debe ser diseñada usando criterios aceptados y no mediante recetas. Los parámetros necesarios de diseño tales como constantes del suelo deben ser evaluadas en el sitio donde la cimentación de la máquina será localizada. Esto es especialmente necesario en casos donde la vibración será causada por maquinaria tal como martillos, compresores y similares.
4. Proporcionando aislamiento: Las cimentaciones de las máquinas deben estar completamente separadas de pisos y componentes de edificios adyacentes, mediante capas adecuadas de aislante.

1.5.3- Criterios Estructurales.

Las vibraciones producidas por las maquinarias pueden causar deformaciones, así como pequeñas o grandes afectaciones a los elementos estructurales o no estructurales que los constituyen. Algunas de estas incidencias son:

- Rotura, agrietamiento o fisuración de paredes o forjados del edificio.
- Empeoramiento de patologías existentes por otras causas de elementos estructurales o no estructurales.
- Caídas de equipos o maquinaria de trabajo con los consecuentes daños en equipos o personas.

Las vibraciones continuadas, además de los efectos descritos anteriormente, pueden producir en las estructuras problemas de fatiga, incremento de tensiones o sobreesfuerzos en los elementos resistentes principales de la estructura. Los criterios de aceptación de los valores de las vibraciones

deben tener en cuenta los siguientes factores entre otros: calidad y características de los materiales de construcción (especialmente la ductilidad), tipología, propiedades de la cimentación de la estructura, dimensiones de los principales elementos resistentes, edad de la construcción, duración de los efectos de las vibraciones, caracterización de la oscilación, entre otros. Aunque los criterios de aceptación se toman de manera independiente de la frecuencia, los valores más convenientes como indicadores varían en función del rango de frecuencia; mientras que el límite para las vibraciones lo marca la velocidad para frecuencias bajas, para frecuencias altas, debemos atender a las aceleraciones pico. A pesar de esto, la mayoría de los criterios se basan en valores de velocidades (Saavedra).

1.5.4- Causas más frecuentes de vibraciones en los Turbogenerador.

Cuando ocurre un cambio en forma de permanente de las vibraciones que usualmente mantiene un equipo en explotación, es síntoma inequívoco de que ha ocurrido una alteración en la instalación que puede ser el inicio de una avería mayor (LLeonart, 2013).

Para tener una panorámica de factores que influyen en el nivel de vibraciones, a continuación, se relacionan las que aparecen con mayor frecuencia como causa aislada o combinación con otras, agrupándolos en distintos aspectos:

Construcción o diseño inadecuado de la instalación:

- ✓ Cimientos, placas de base, anclajes.
- ✓ Cojines y pedestales de apoyos.
- ✓ Rotores.

Cualquiera de estos conjuntos puede causar deficiencias en su sincronización de frecuencia y producir estados de resonancia.

Calidad insatisfactoria del montaje o de trabajos de mantenimiento:

- ✓ Cambios en el estado de balance de los rotores.
- ✓ Alineamiento incorrecto.
- ✓ Defectos en acoplamientos.
- ✓ Ajuste inadecuado de los cojines.
- ✓ Ajuste incorrecto de apertura de válvulas de regulación.
- ✓ Defectos en el sistema de drenaje.
- ✓ Defectos en las guías de dilatación térmica.

- ✓ Desajustes de transmisiones dentadas.

Defectos que surgen o se manifiestan 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.

1.8- Estándares o Normas.

Los estándares o normas son criterios establecidos por autoridades en el tema a través de un amplio consenso y opinión de los usuarios, y, por consiguiente, son ampliamente aceptados y aplicados. Para este estudio fue empleada la norma ISO de la INDIA 10816-2: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min and 3 600 r/min (Saavedra).

1.10.1- Estándares ISO para el monitoreo operacional de las máquinas.

ISO (International Organization for Standardization) es una federación a lo largo del mundo en el que participan Institutos de estandarización de más de 145 países. Los estándares ISO son desarrollados por comités técnicos compuestos por expertos que vienen del campo industrial, técnico y de servicios. De la gran variedad de estándares de severidad vibratoria que publica ISO, los estándares básicos son dos series de normas, serie 10816 y serie 7919. Para la evaluación de las vibraciones medidas en partes no rotatorias de la máquina, se utiliza la serie de normas ISO 10816, pero hay varios tipos de máquinas y no todas las mediciones realizadas en las partes no-rotatorias de los equipos, caracterizarán de forma correcta el funcionamiento en que se encuentra la carga, aunque dichas mediciones sean útiles. Para estos casos se encuentran la mayoría de las máquinas montadas en descansos hidrodinámicos o cojinetes, como ocurre en las turbinas de gas, motores eléctricos, turbinas de vapor y turbocompresores (Saavedra, Indian Standard, 2007).

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

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

Tabla N°1 resume las diferentes partes que contienen las normas ISO 7919 e ISO 10816 respectivamente. Estas normas son discutidas en las cuatro categorías de los cursos de capacitación, cada vez con mayor profundidad y más cantidad de ejemplos.

Tabla 1.1 Estándares ISO para la evaluación de la severidad vibratoria.

SERIES ISO 7919: “Vibración mecánica de máquinas no – reciprocas. Mediciones realizadas en los ejes rotatorios”	
7919-1	Parte1: Guías generales
7919-2	Parte2: Turbinas a vapor y generadores fijos a la tierra sobre 50 MW con velocidades de rotación de 1500, 1800, 3000 y 3600 cpm.
7919-3	Parte3: Máquinas industriales acopladas
7919-4	Parte4: Conjuntos de turbinas a gas
7919-5	Parte5: 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”	
10816-1	Parte1: Guías generales
10816-2	Parte2: Turbinas a vapor y generadores fijos a la tierra sobre 50 MW con velocidades de rotación de 1500, 1800, 3000 y 3600 cpm.
10816-3	Parte3: Máquinas industriales con potencia nominal sobre 15 kW y velocidades nominales entre 120 y 15.000 cpm cuando se mide en terreno.
10816-4	Parte4: Conjuntos de turbina a gas excluyendo las aeronaves
10816-5	Parte5: Conjuntos de máquinas hidráulicas que generan potencia y bombean fluido.
10816-6	Parte6: Máquinas recíprocas con potencia nominal sobre 100 kW
10816-7	Parte7: Bombas roto-dinámicas para aplicación industrial

Fuente:(Saavedra).

1.10.3- Estándares para el monitoreo operacional de las máquinas.

Para la correcta evaluación de las condiciones en las que se encuentran las máquinas, existen los estándares que establecen niveles vibratorios para el monitoreo de las mismas, es decir, es utilizado el valor de la vibración como un indicador de la condición de la máquina. Estos estándares indican niveles vibratorios que permiten una evaluación cualitativa de la condición de las máquinas (Saavedra, Indian Standard, 2007).

En el caso de las normas ISO, ver figura 1.5, establecen cuatro zonas de evaluación de la condición de la máquina:

- ZONA A: Valor que indica condición de la máquina **Buena**. La vibración de las máquinas nuevas o recientemente reacondicionadas deberían estar dentro de esta zona.
- ZONA B: Máquinas con valores dentro de esta zona son normalmente considerados **aceptables** para una operación a largo plazo sin restricciones
- ZONA C: Máquinas con valores dentro de esta zona son normalmente considerados como **insatisfactorias** para una operación continua a largo plazo. Generalmente la máquina puede ser operada por un periodo limitado de tiempo en esta condición hasta que llegue una oportunidad apropiada para su reparación
- ZONA D: Los valores de vibración dentro de esta zona son considerados normalmente como de suficiente severidad como para causar daño a la máquina.

Estos estándares, al igual que los estándares de aceptación de máquinas, establecen, además:

- Procedimientos.
- Ubicación de los puntos de medición.
- Condiciones de operación bajo las cuales se realiza la medición.
- Técnica para procesar la medición.

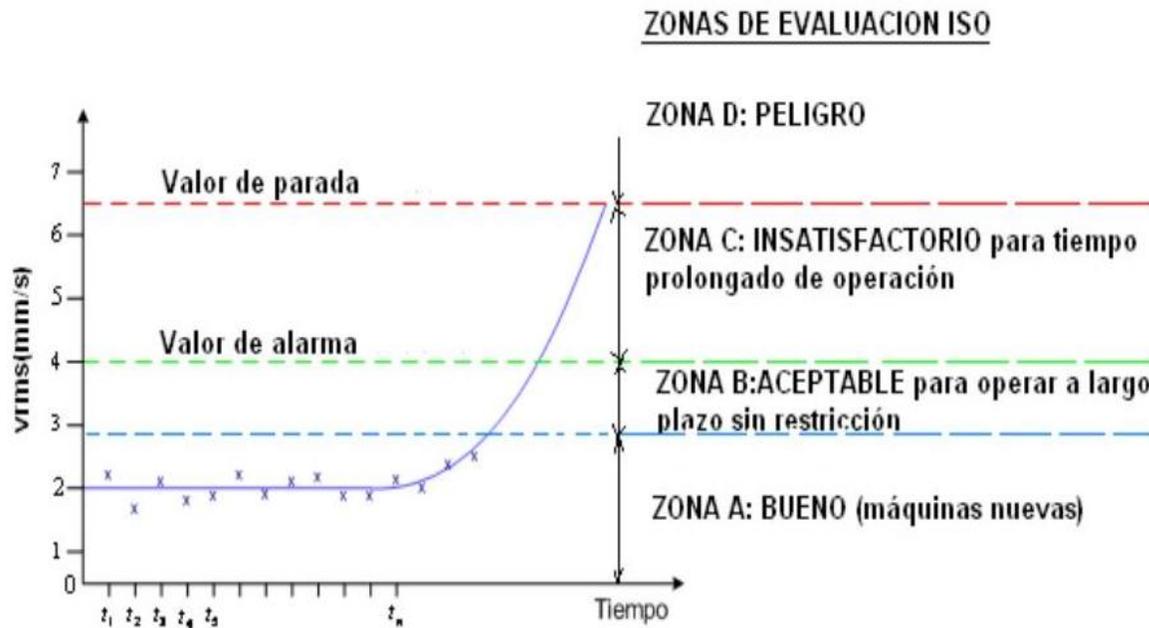


Figura 1.5. Zonas de evaluación de normas ISO para el monitoreo operacional de las máquinas.

Fuente:(Saavedra)

1.9- Diseño en el SAP 2000 V20.

El SAP 2000 es un programa desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, Inc. En Berkeley, California, EEUU. Esta herramienta informática lleva en constante desarrollo más de 30 años para brindarles a los ingenieros un programa de trabajo, confiable, sofisticado y fácil de usar. 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. El uso del SAP 2000 para este trabajo es de suma importancia porque permite obtener las respuestas en términos de fuerza, esfuerzos y deformadas en los elementos de área y sólidos a través del uso del método de elementos finitos empleado por dicho programa, presentando una salida gráfica y por tablas, haciéndolo una herramienta muy versátil para ingenieros estructurales dedicados a la investigación, desarrollo de proyectos y construcción (Castañeda, 2018).

1.9.1- Método de elementos finitos.

Las estructuras continuas son muy frecuentes en ingeniería, como, por ejemplo: bastidores de máquinas, carrocerías de vehículos, losas de cimentación, vasijas de reactores, elementos de máquinas y para su análisis es necesario disponer de un método que tenga en cuenta su naturaleza

continua. Hasta la llegada del Método de los Elementos Finitos (MEF), los sistemas continuos se abordaban analíticamente, pero por esa vía sólo es posible obtener solución para sistemas con geometría muy sencilla, y/o con condiciones de contorno simples. También se han utilizado técnicas de diferencias finitas, pero éstas plantean problemas cuando los contornos son complicados. El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales (S.A. Halkude, 2017, Castañeda, 2018, Valero, 2004, Lizarza, 2011, Abou Elsaoud, 2012).

1.9.2- Análisis Modal.

El Análisis Modal es un proceso empleado por el SAP 2000 que permite la determinación de las características dinámicas inherentes a un sistema mecánico y es necesario para la posterior formulación de un modelo matemático del comportamiento dinámico de dicho sistema. Estos parámetros modales son propios del sistema y dependen de la distribución de sus características de masa, rigidez y amortiguamiento (Reyes, 2009).

El Análisis Modal parte de la hipótesis lineal de considerar que la respuesta en vibración de un sistema puede ser expresada como una combinación de una serie de movimientos o modos naturales de vibración, intrínsecos al sistema y armónicos simples determinados por el valor y distribución de su masa, rigidez y amortiguamiento. Cada modo se define a partir de sus parámetros modales: frecuencia natural, amortiguamiento modal y forma característica de desplazamiento. El grado de participación de cada modo en el total de la 17 vibración viene determinado por las características de la excitación que actúa sobre el sistema y por las formas de los modos (Reyes, 2009).

Conclusiones parciales

- Como resultado del estudio del arte sobre el análisis estático y dinámico de las estructuras de cimentación de los turbogeneradores, se comprobó la alta complejidad de este proyecto.
- El análisis dinámico para estos elementos de soporte como las cimentaciones de los turbogeneradores, requieren un amplio estudio y conocimiento producto a todos los parámetros que inciden en su comportamiento.

- La modelación de estas estructuras de cimentación mediante software de elementos finitos permite caracterizar el comportamiento del suelo sobre la estructura.
- El software SAP 2000 cuenta con las características y prestaciones necesarias para la modelación de la estructura de cimentación de los turbogeneradores.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1- Propósito del capítulo.

El objetivo principal del presente capítulo es definir los parámetros que contribuyen a la modelación de la estructura de cimentación del turbogenerador de la CTE de Mariel, a través del software SAP 2000 para realizar un análisis de la influencia del suelo sobre la estructura mediante la variación de la rigidez del mismo. Se tratan de manera general todos los aspectos necesarios, donde se detalla el caso de estudio tratado, se define la geometría del modelo, las características del suelo de cimentación, la modelación de las cargas y el suelo y la comprobación del dimensionamiento de la cimentación del turbogenerador.

2.2- Planteamiento del problema.

La estructura de cimentación del TG de la CTE de Mariel ha mantenido un régimen de trabajo por aproximadamente 45 años, presentando síntomas de capacidad dinámica reducida. Es una estructura que ha sufrido el deterioro propio de la explotación y el envejecimiento, aumentando así la incertidumbre acerca de la capacidad resistente de la estructura para el uso de un nuevo equipo, que poseerá las mismas características que la máquina que estuvo tantos años en funcionamiento. El modelo computacional de dicha estructura permitirá realizar una evaluación del estado actual de la estructura a partir de la comparación de los mismos, con los obtenidos de las pruebas experimentales. Para estos análisis es necesario conocer todas las características geométricas de la estructura de cimentación y las características de la nueva máquina.

2.3- Datos generales de la estructura.

- La mesa de turbina del TG en la CTE Mariel fue fabricada como un armazón monolítico de hormigón armado y está formada por columnas prefabricadas, ancladas a la placa base y la placa superior de la estructura por medio de abrazaderas y refuerzos atornillados. (ver figura 2.1)
- La mesa de cimentación sobre la cual está apoyada el turbogenerador, es de tipo pórtico, compuesta por una bolsa apoyada sobre el suelo de 29.3 x 8.8 x 2m.

- La estructura de soporte de la mesa de turbina consta de la placa base existente de 2m de espesor.
- La posición de la losa superior está diseñada con los agujeros para el anclaje de la turbina y del generador
- Consta con un total de doce columnas de hormigón armado de 1m x 1m con la instalación en el nivel de -2,20 m hasta + 6,00 m, + 6.32 m y +6,60 m.
- La placa, en estado actual es de hormigón C25-30 con barra de refuerzo y un límite elástico de 325 MPa del acero y la carga de rotura de 551 MPa.
- Para la concepción del modelo de la cimentación, se emplea el método de elementos finitos, incorporado en el software SAP2000.

Se distinguen en la construcción de la placa las vigas longitudinales que se encuentran encima de las columnas y las transversales que conectan de forma transversal las vigas longitudinales y, sirven para ubicar los bastidores con cojinetes del dispositivo. Los parámetros geométricos de las vigas longitudinales y transversales pasan de las zonas relativamente sutiles a aquellas más sólidas de la parte de alta presión del dispositivo en la zona del generador. Dicha base del turbogenerador descrita representa una estructura convencional que se utiliza para ubicar dispositivos con una potencia de 100 MW. En este sentido, es normal usar la terminología asociada con la tecnología instalada en la descripción de la parte civil. (Ján Benčat, julio,2017)

28474-3120

platform of the foundation
ted by the tolerances
relative position of its semi-couplings

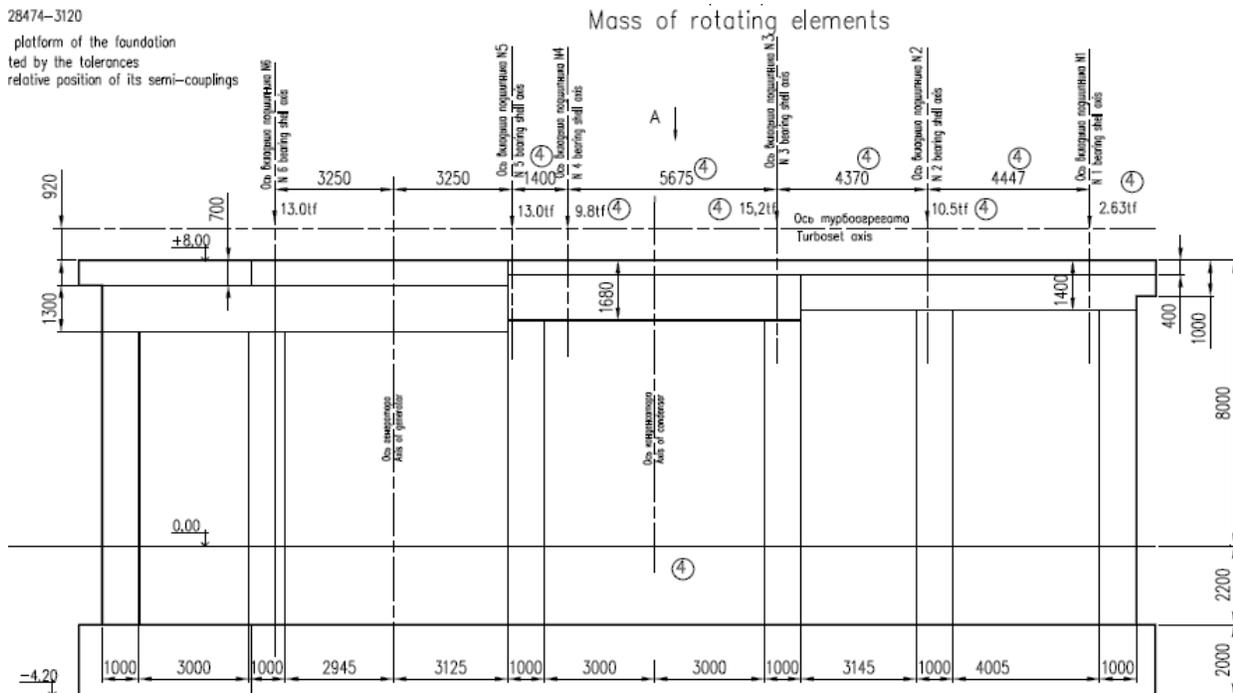


Figura 2.1 Losa de cimentación de la CTE de Mariel

2.4- Características de la máquina.

Las características necesarias de la máquina para su modelación, se muestran a continuación

Tabla 2.1 Datos del fabricante

Tipo de Máquina	Peso en (t / kN)	Velocidad angular en (rpm)
Turbo-grupo No.6	64.13 / 641.3	3600

Fuente: (elaboración propia)

2.5- Estudio de suelo.

En el año 2002 fue realizada una exploración geológica de la zona donde se obtuvieron como resultado la composición del subsuelo de 4 capas geológicas distintivas formadas por arcillas y suelos de arena/grava (clases de mantos arcillosos con un contenido de grava y arena del 15%). El nivel del agua subterránea está por debajo de la junta de la placa base. Las perforaciones geológicas realizadas in-situ también muestran una baja permeabilidad del agua y aumento de la agresividad debido al alto contenido de CO₂. No obstante, en la zona geológica no se presentan fenómenos

físicos-geológicos que requerirían un método de cimentación más complicado y costoso en comparación con los implementados en dicha zona. (Ján Benčat, julio,2017)

En relación con la conversión y compactación en los cálculos fue empleado por (Michal Tomko, 2016) el valor de rigidez del suelo de cimentación $C_z=30\text{MN.m}^{-3}$ en dirección vertical y $C_{xy}=15\text{MN.m}^{-3}$ en direcciones horizontales. Con respecto al uso de la mesa de turbina por largo tiempo (45 años) se determinaron también con el suelo estabilizado con valores de la rigidez del suelo de cimentación:

- $C_z = 60\text{MN/m}^3$ - en dirección vertical
- $C_y = 30\text{MN/m}^3$ - en direcciones horizontales
- $C_x = 30\text{MN/m}^3$ - en direcciones horizontales

Tabla 2.2 Valores del coeficiente de elasticidad del suelo k_s en MN.m^{-3}

Renglón	Tipo del suelo de fundación ¹⁾	Esfuerzo derivado normado del suelo de fundación kPa	Coeficiente k_s MN.m^{-3}
1.	Limos, arcillas y suelos arenoso-limosos de consistencia blanda hasta rígida, arenas ligeras y mediamente sentadas, suelos con capas de barro o turba	< 150 15.3 t	< 30
2.	Suelos limosos, arcillosos y arenoso-limosos de consistencia sólida, arenas sentadas	de 150 a 400	de 30 a 60
3.	Limos, arcillas y suelos arenoso-limosos de consistencia dura, grava sentada y grava con arena, rocas descompuestas	de 400 a 600	de 60 a 100
4.	Rocas y semirocas	> 600	> 100
¹⁾ Ver Norma ČSN 73 0036			

Fuente:(Michal Tomko, 2018)

2.5.1- Modelo del suelo.

Para la modelación, este será modelado elásticamente sobre un número infinito de resortes elásticos a través del software SAP 2000. Para simular la rigidez del mismo fue escogido el modelo de Winkler al considerarse este suelo con un comportamiento lineal-elástico. El modelo de Winkler es uno de los métodos más utilizados a nivel mundial, permitiendo una fácil asimilación de la interacción suelo-estructura por los métodos matriciales de cálculo.(Castañeda, 2018)

2.6- Cargas.

2.6.1- Cargas estáticas.

Para modelar la estructura se utilizarán dos tipos de cargas: cargas estáticas y dinámicas. Dentro de las cargas estáticas se necesita tener en cuenta:

- Instalaciones
- Condensador
- Elementos de soporte
- Generador
- Turbina de alta frecuencia
- Turbina de media frecuencia
- Turbina de baja frecuencia

Como peso total de la combinación de todos estos elementos se obtiene una magnitud de 64,13t.

A continuación, se muestran las cargas estáticas (P) que actúan sobre la estructura por acción de la máquina.

Tabla 2.3 Cargas estáticas

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

Fuente: (elaboración propia)

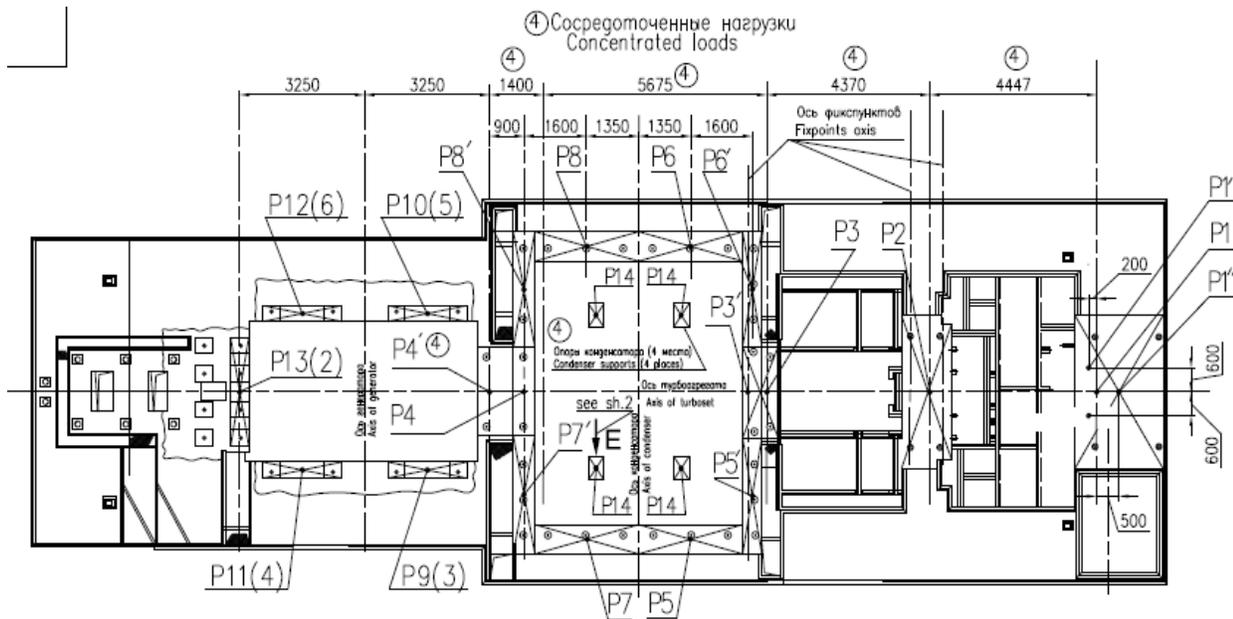


Figura 2.2 Posición de las cargas estáticas.

Fuente:(Michal Tomko, 2018)

2.6.2- Cargas dinámicas.

Las cargas dinámicas generadas por maquinaria se producen principalmente cuando esta sufre desbalanceo en su mecanismo, por lo que deben ser determinadas de la manera más exacta posible. Se necesita acumular la mayor cantidad de información disponible para este efecto y determinar dichas fuerzas. El fabricante del equipo a sustentar es quien debe proporcionar la información completa de las cargas dinámicas que su máquina genera en la estructura de cimentación (Álvarez, 2015).

Las cargas mostradas a continuación son las que generan vibraciones sobre la mesa:

Tabla 2.4 Cargas dinámicas.

Peso	Toneladas
P1	-13
P2	-13
P3	-9.8
P4	-15.2
P5	-10.5

P6	-2.63
----	-------

Fuente: (elaboración propia)

2.7- Revisión del dimensionamiento.

Mediante este análisis de revisión del dimensionamiento de la estructura, se pretende comprobar el diseño de la misma con los parámetros establecidos por la norma ISO de la INDIA 10816-2.

1. Las dimensiones de la losa superior, debe considerar las dimensiones de la máquina, así como los espacios requeridos para su operación y mantenimiento. (Figura 2.3)

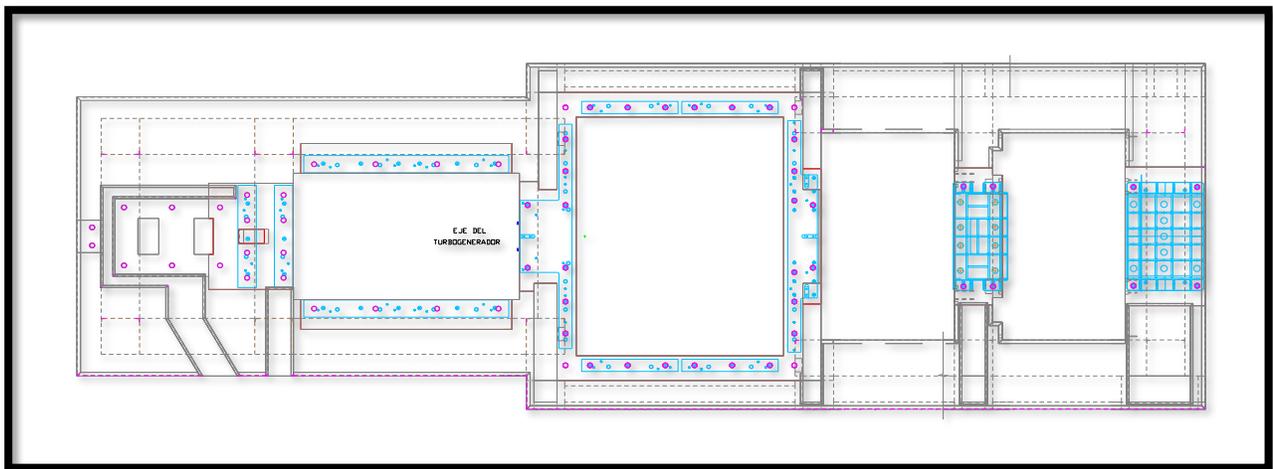


Figura 2.3 Espacios para la colocación de la maquinaria.

Fuente: (elaboración propia)

Se debe considerar los espacios para:

- Turbogenerador.
- Condensador.
- Trabajo de mantenimiento y funcionamiento de los operadores.
- Turbina de altas frecuencias.
- Turbina de medias frecuencias.
- Turbina de bajas frecuencia.
- Elementos auxiliares.

2. Las columnas deben ser dimensionadas de tal manera que se encuentren sometidas a aproximadamente las mismas cargas verticales. (Figura 2.4 y 2.5)

Se procederá al cálculo del peso que llega a cada una de las columnas, para ello tendremos en cuenta dos elementos:

1. Peso de la mesa.

$$P = \gamma h * A_t * e \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde, γh : densidad del material

A_t : Área que se le atribuye a cada columna respectivamente como se muestra en la figura 2.4.

e : espesor de la losa. (Figura 2.5)

2. Peso del turbogenerador. (Figura 2.5)

Por tanto: (Peso mesa + Peso Equipo) * A_t = Peso total sobre la columna

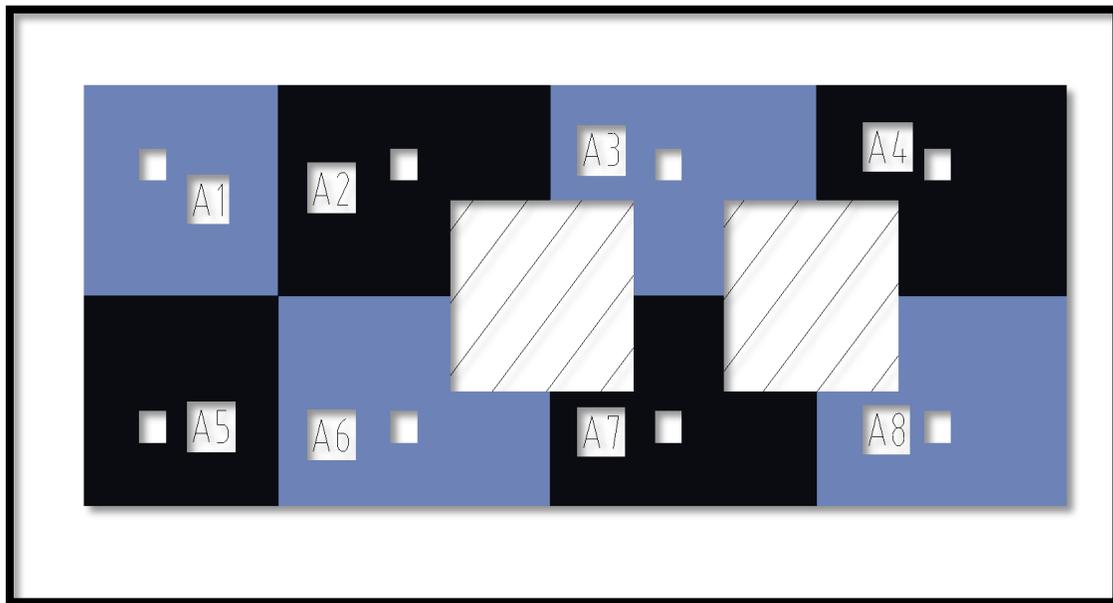


Figura 2.4 Área de la losa que tributa a cada columna.

Fuente: (elaboración propia)

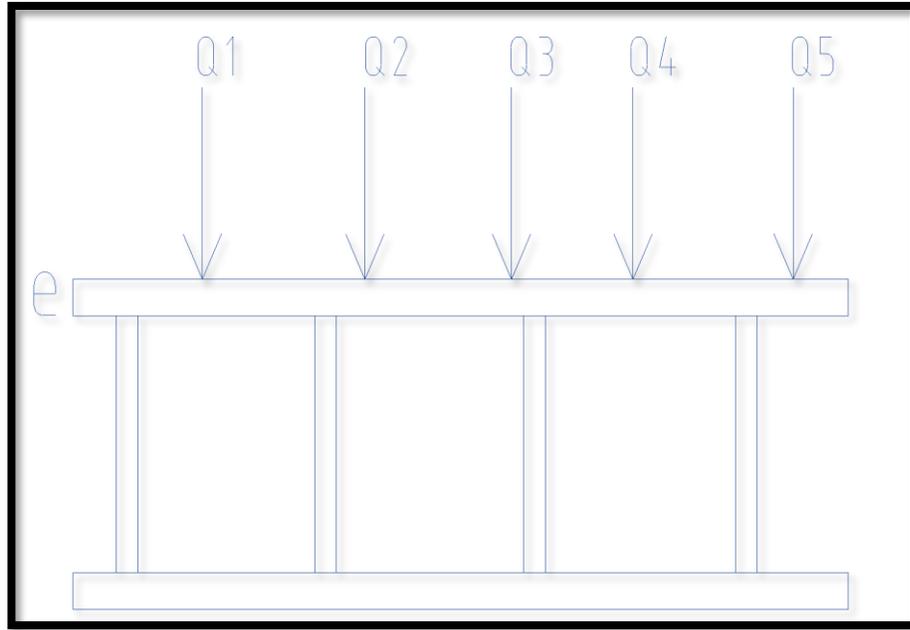


Figura 2.5 Cargas del equipo.

Fuente: (elaboración propia)

3. Como regla general, las columnas serán sometidas a aproximadamente 6 veces la carga vertical actual y estar espaciadas a no menos de 3.6 metros de centro a centro. (Figura 2.6)

Luego de conocer el peso que llega a cada columna se calculará la tensión que tendrán que soportar.

$$R = \frac{W}{A} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

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.

$$R^* = \frac{R_{hor}}{6} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

R*: Resistencia minorada.

Luego debe cumplirse que $R < R^*$

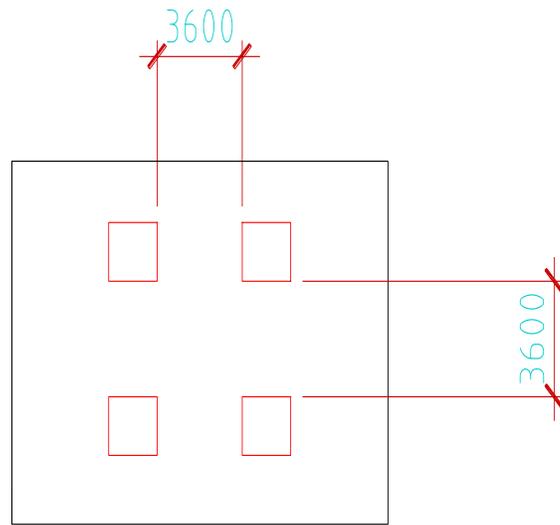


Figura 2.6 Espacios entre columnas.

Fuente: (elaboración propia).

4. Un quinto del tramo de cara a cara de las columnas tanto transversales como longitudinales debe ser menor que el espesor de la losa. (Figura 2.7)

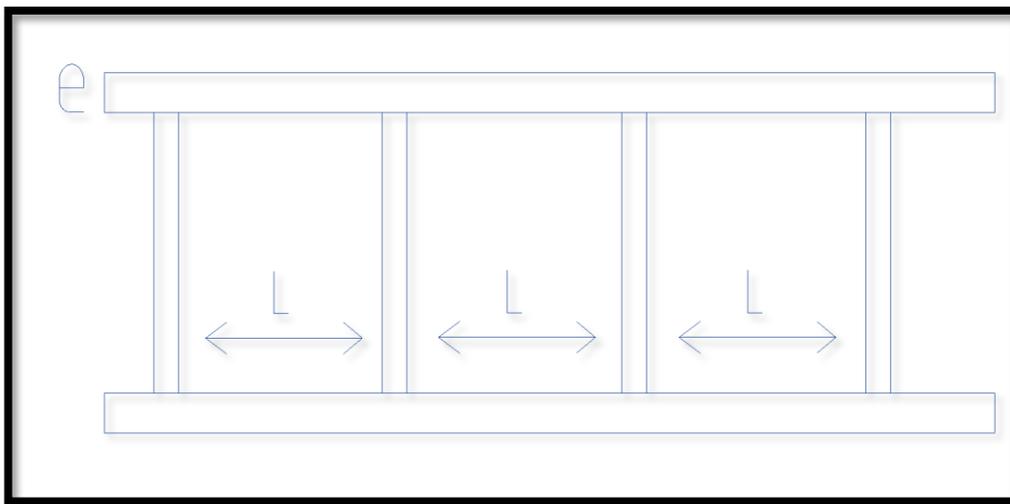


Figura 2.7 Distancia entre columnas y espesor de la losa.

Fuente: (elaboración propia).

Debe de cumplirse que:

$$\frac{L}{5} < e \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde, L: distancia de cara a cara entre columnas

E: espesor de la losa.

5. La estructura de la turbina 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. (Figura 2.8)

Se procederá al cálculo de la rigidez axial de las columnas.

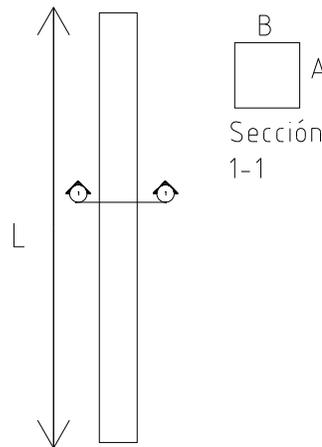


Figura 2.8 Columnas.

Fuente: (elaboración propia).

$$Kc = \frac{EA}{L} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde, K: rigidez axial

E: Módulo de elasticidad

A: Área transversal de la sección

L: Longitud de la columna

Para el cálculo de la rigidez de las vigas se tomarán franjas de dos veces la longitud de las caras de las columnas.

$$Kv = \frac{12 * E * Iz}{L^3} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde, K: rigidez a cortante
 E: Módulo de elasticidad
 Iz: Inercia dela viga Debe de cumplirse que: $Kv \geq 2Kc$
 L: Longitud de la viga

6. La balsa será emplazada en el suelo, donde el espesor de la misma no será menor que:

$$0.07L_3^4 \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

L: distancia media entre columnas. (Figura 2.9)

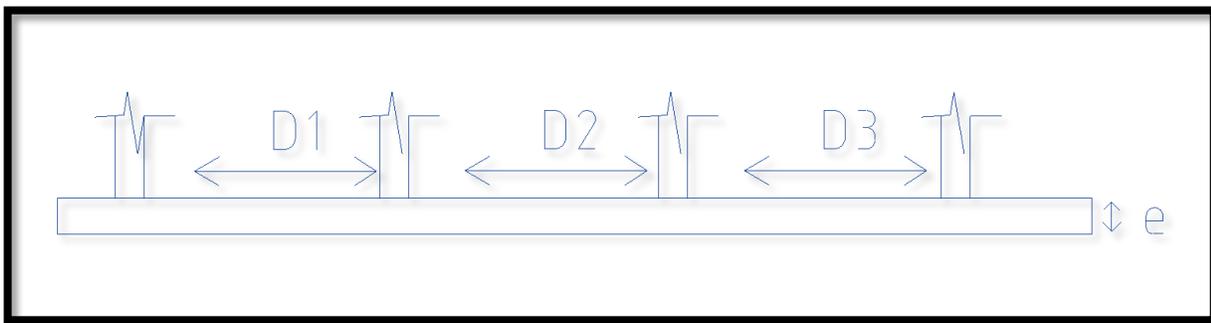


Figura 2.9 Distancia entre columnas.

Fuente: (elaboración propia).

$$e < 0.07L_3^4 \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

$$L = \frac{D1+D2+D3+\dots+Dn}{n} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Donde, L: distancia promedio entre columnas

e: espesor de la balsa

n: Número de espacios entre columnas

D: Distancia entre columnas.

7. El peso de la mitad de las columnas más el de la losa superior debe ser mayor que el peso de la turbina y sus elementos auxiliares. (Figura 2.10)

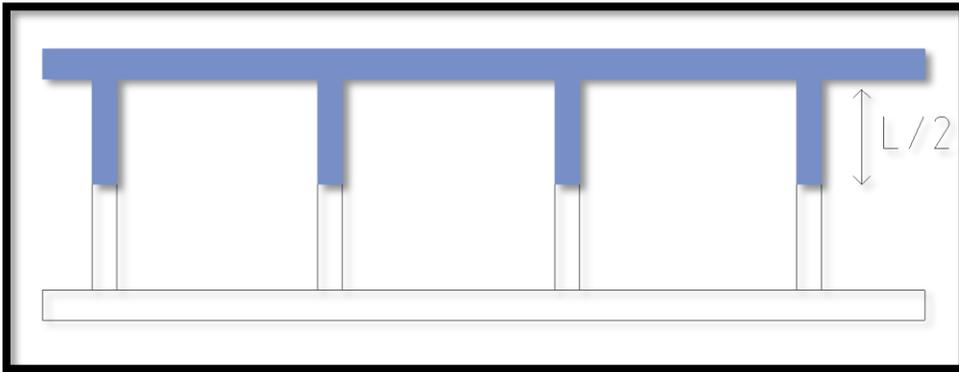


Figura 2.10 Mitad de las columnas.

Fuente: (elaboración propia).

$$\text{(Peso de la mesa)} \quad P = \gamma h * A_t * e \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Donde, γh : densidad del material

A_t : Área que se le atribuye a cada columna.

E : Espesor de la losa

$$\text{(Peso de la mitad de las columnas)} \quad P = \gamma h * A_t * L/2 \quad \text{(Ecuación 2.10)}$$

Donde, γh : densidad del material

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

L : Longitud 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:

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

8. El peso total de la estructura más el peso de la balsa, no será menor que tres veces el peso de la máquina. (Figura 2.11)

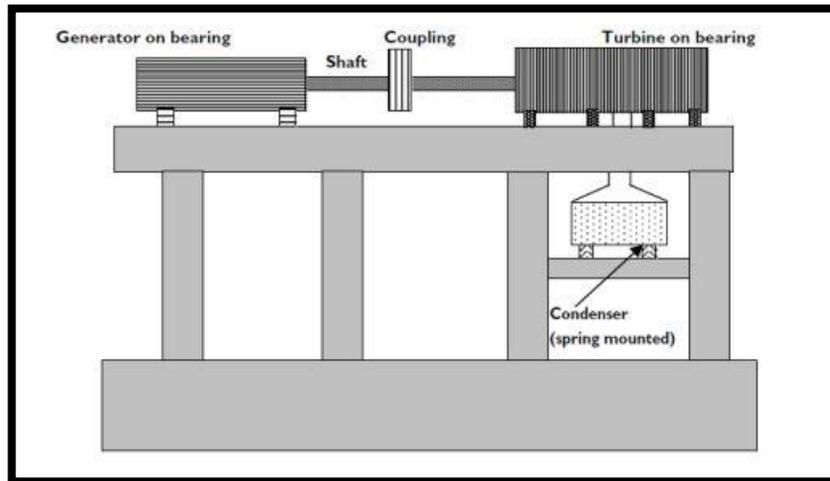


Figura 2.11 Máquina sobre la mesa de cimentación.

Fuente: (elaboración propia).

$$P_{losa} + P_{columnas} + P_{balsa} > 3 * P_{maquina} \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

9. La tensión producida en el suelo no excederá 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.

$$\frac{P_{losa} + P_{columnas} + P_{balsa} + P_{maquina}}{A_{balsa}} < 50\% * R_{suelo} \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

10. El centro de rigidez de las columnas coincidirá con el CG del equipo más la carga de la parte superior de la estructura, tanto en la longitud transversal como longitudinal. Se procede al cálculo de los centros de masas, tanto de las cargas como de las columnas, definiendo en un principio los ejes de referencia para la ubicación de las posiciones de ambos centros de gravedad. (Figura 2.12)

Se aplicará la siguiente fórmula: $\sum \frac{A_i * X_i}{A_i}$ (Ecuación 2.13) para el caso de las columnas; y $\sum \frac{P_i * X_i}{A_i}$

(Ecuación 2.14) para el caso de las cargas, donde:

A_i : área de la sección transversal de las columnas.

P_i : Valor de la carga.

X_i : 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.

$$\frac{X_{carga} - X_{columna}}{L_{total}} \leq 3\% \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

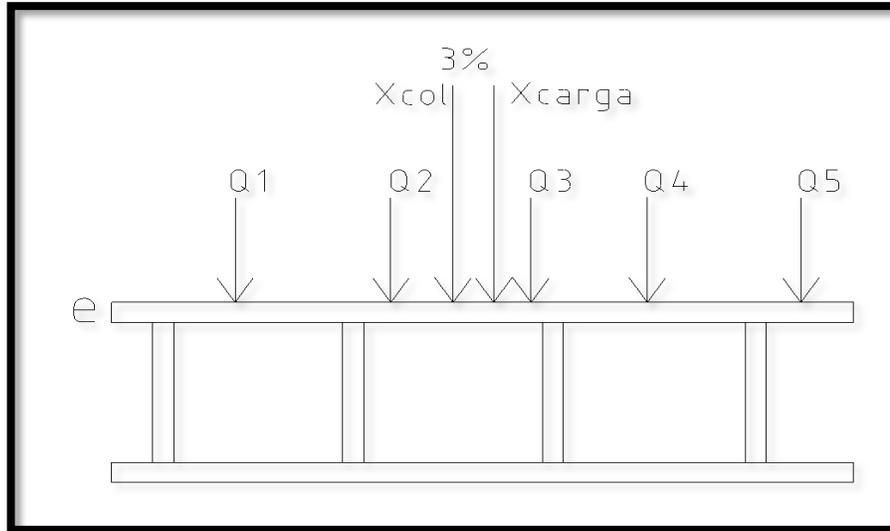


Figura 2.12 Centros de gravedad.

Fuente: (elaboración propia).

2.8- Modelo en SAP 2000.

Fue realizada la modelación en SAP 2000 de la estructura de cimentación del turbogenerador de la CTE de Mariel con las características geométricas reales de la misma. Para este modelo fue empleado el elemento Shell (Figura 2.13) y la herramienta Steady State. Este análisis Steady State o Estado estable, tiene como objetivo la determinación de la respuesta de la estructura debido a cargas cíclicas para una determinada gama de frecuencias y además puede utilizarse para medir los efectos de varios equipos funcionando a diferentes frecuencias, considerando una combinación de resultados de varios análisis en el mismo modelo. (Castañeda, 2018, Álvarez, 2015)

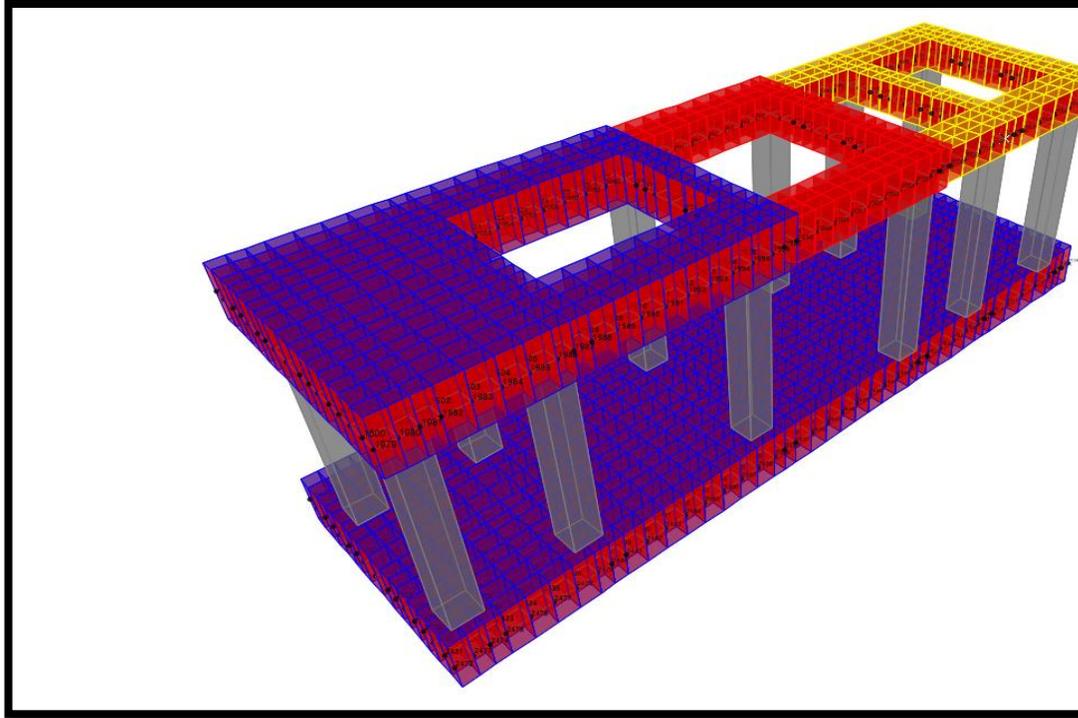


Figura 2.13 Modelo en SAP 2000 con elementos Shell.

Fuente: (elaboración propia).

2.9- Mallado del modelo en SAP.

Para realizar el ajuste del mallado del modelo de cimentación se fueron cambiando el número de elementos Shell para determinar el comportamiento de las tensiones y obtener el mallado más cercano a la realidad. A continuación, son mostrados los distintos modelos que se realizaron para el ajuste del mallado.

Mallado 1

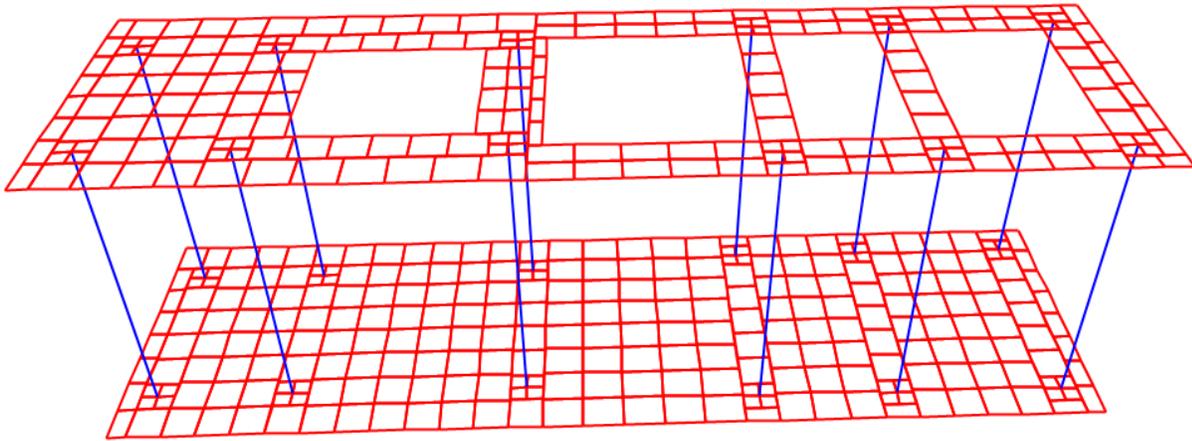


Figura 2.14 Mallado 1

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 481

Losa superior: 210 elementos

Balsa: 271 elementos

Mallado 2

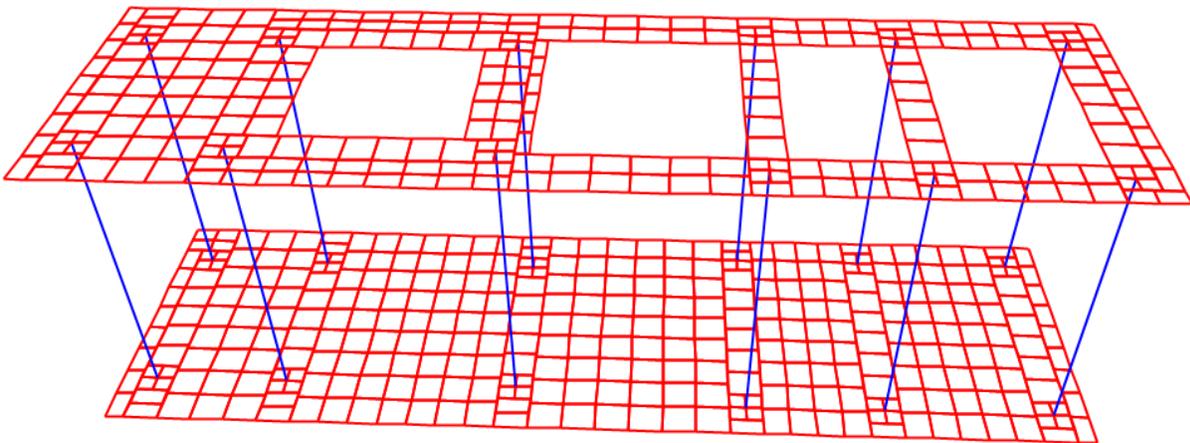


Figura 2.15 Mallado 2

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 606

Losa superior: 263 elementos

Balsa: 343 elementos

Mallado 3

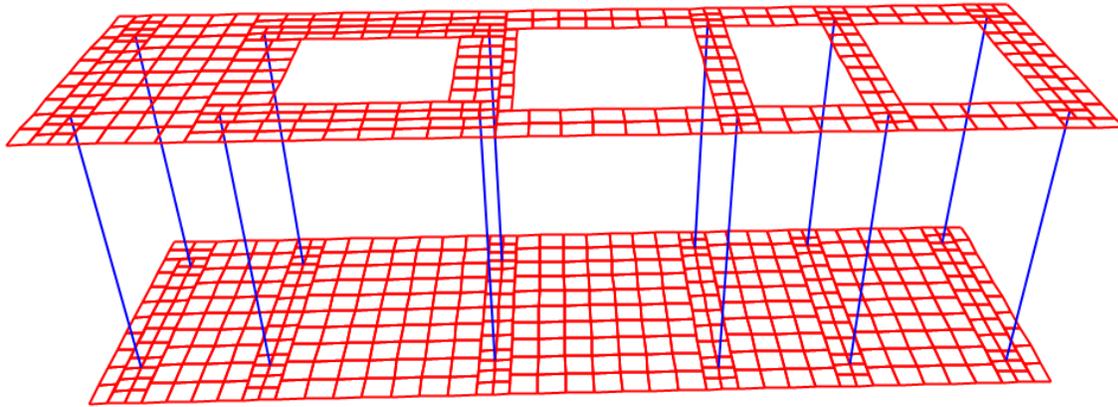


Figura 2.16 Mallado 3

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 798

Losa superior: 341 elementos

Balsa: 457 elementos

Mallado 4

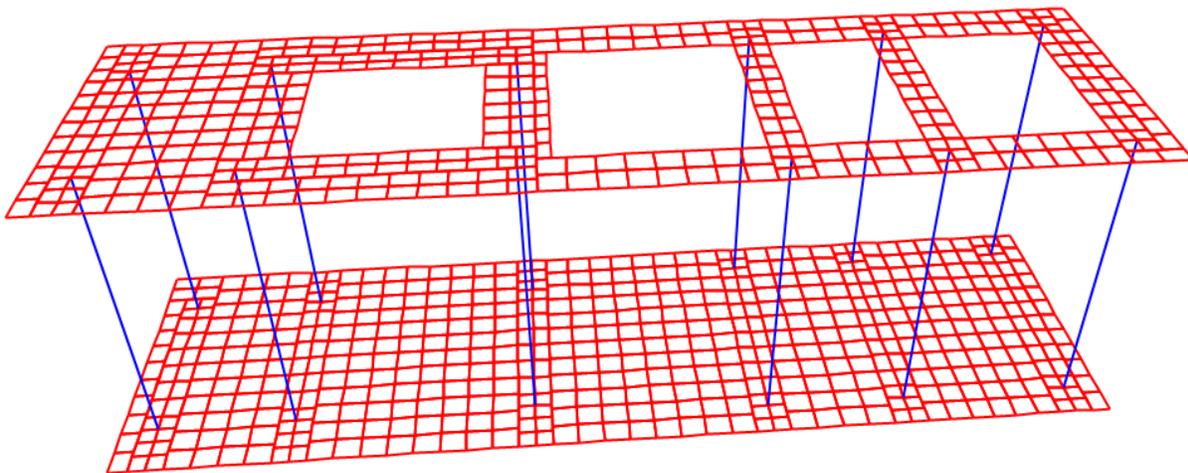


Figura 2.17 Mallado 4

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 935

Losa superior: 385 elementos

Balsa: 550 elementos

Mallado 5

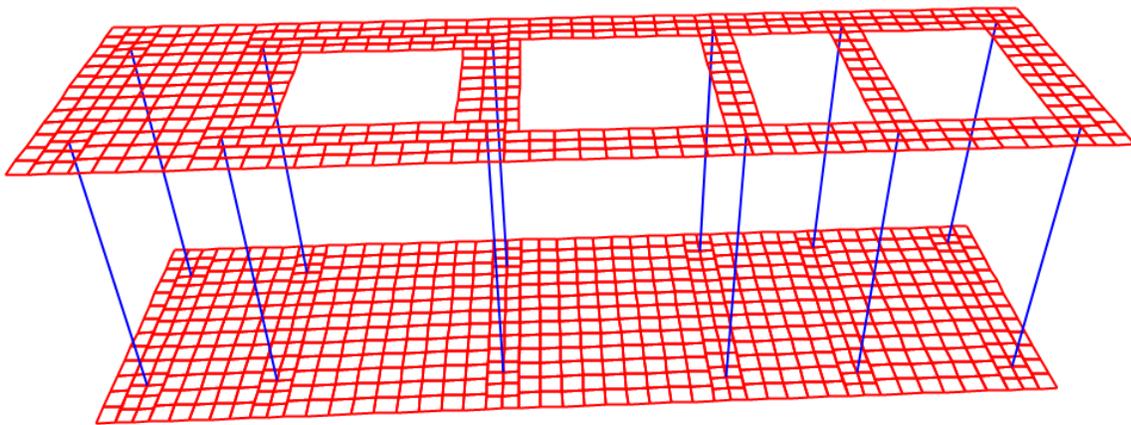


Figura 2.18 Mallado 5

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 1123

Losa superior: 475 elementos

Balsa: 648 elementos

Mallado 6

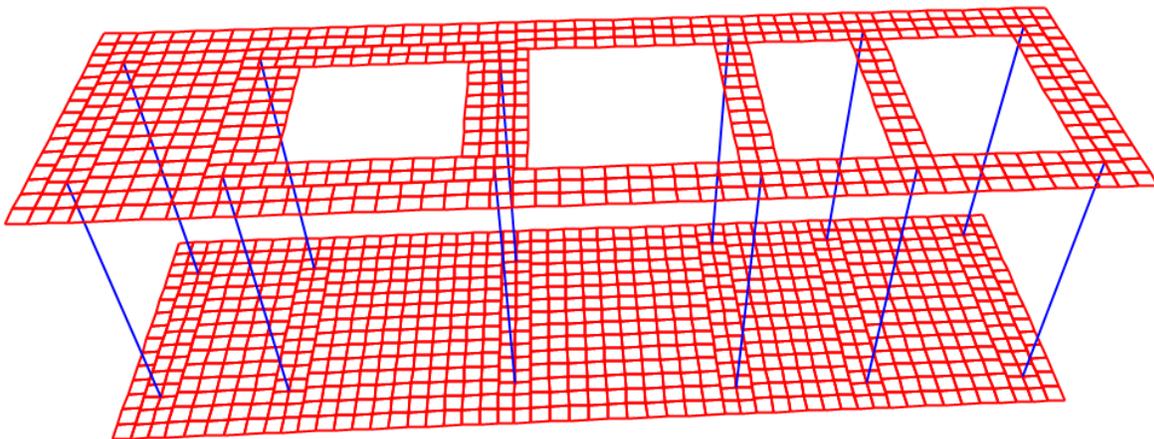


Figura 2.19 Mallado 6

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 1990

Losa superior: 824 elementos

Balsa: 1166 elementos

Mallado 7

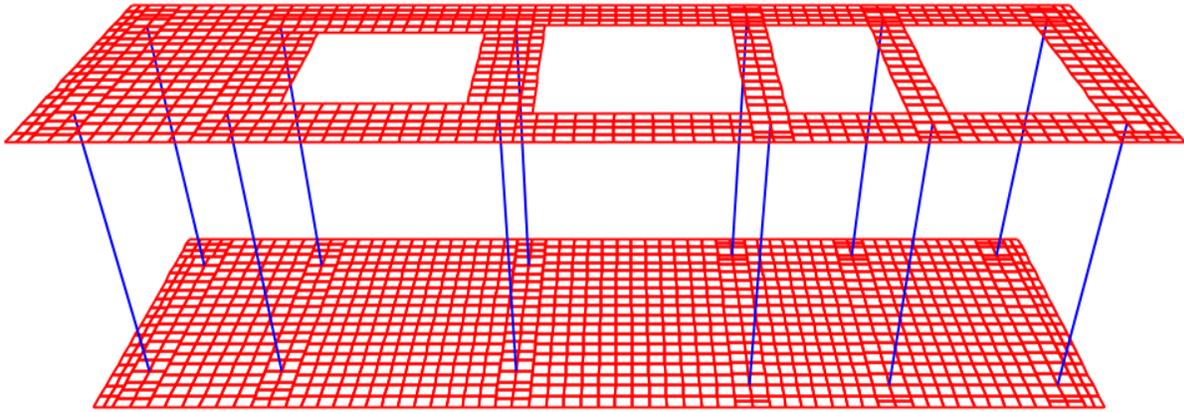


Figura 2.20 Mallado 7

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 3256

Losa superior: 1308 elementos

Balsa: 1948 elementos

Mallado 8

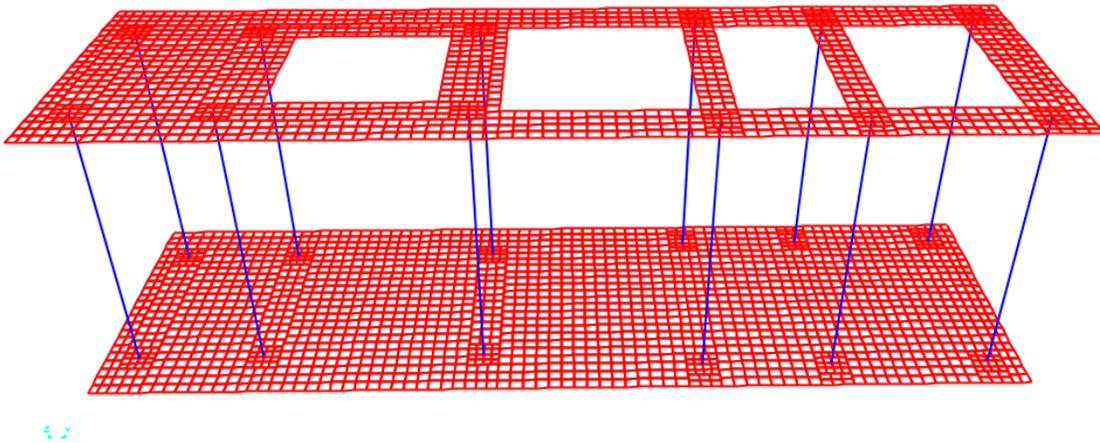


Figura 2.21 Mallado 8

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 5304

Losa superior: 2136 elementos

Balsa: 3168 elementos

Mallado 9

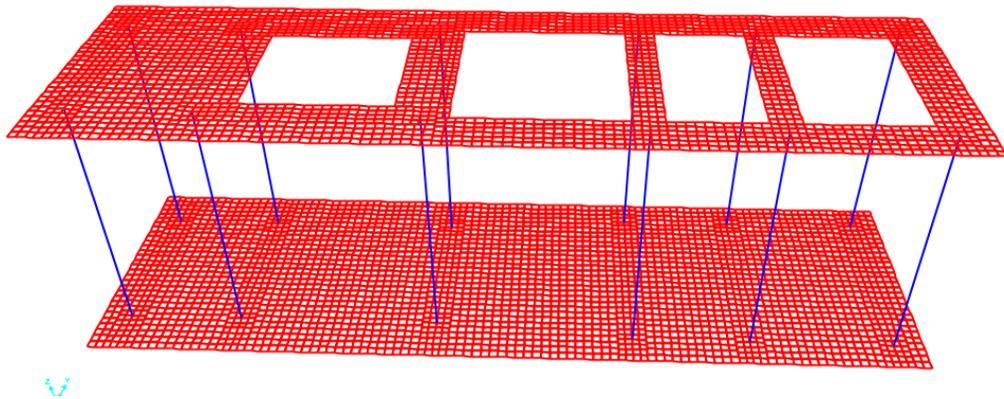


Figura 2.22 Mallado 9

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 11214

Losa superior: 4377 elementos

Balsa: 6837 elementos

Mallado 10

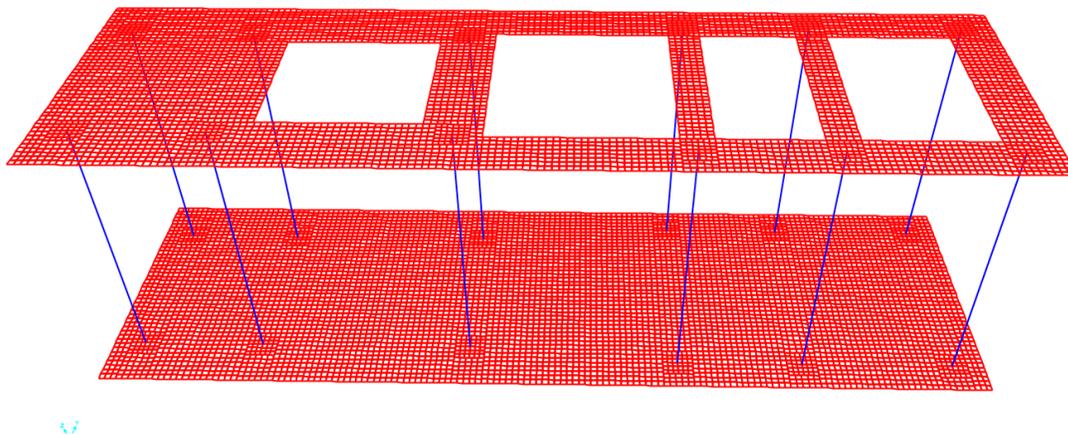


Figura 2.23 Mallado 10

Fuente: elaboración propia.

Número de elementos: 22036

Losa superior: 8607 elementos

Balsa: 13429 elementos

Tabla 2.5 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
807	-0,36	0,11	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
824	0,11	-0,33	-0,49
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.

El mallado número 8 fue el seleccionado para realizar las pruebas de interacción suelo-estructura porque mostraba más estabilidad en las tensiones, este consta de un total de 5304 elementos tipo Shell, distribuidos entre la losa superior (2136) y la base de la estructura (3168).

2.10- Interacción suelo-estructura.

Para el análisis de la interacción suelo-estructura se parte de un primer análisis con el suelo real que se encuentra bajo la estructura de cimentación con valores de $C_z = 60\,000\text{KN/m}^3$ y $C_x = 30\,000\text{KN/m}^3$; estos valores fueron simulados por resortes colocados bajo la cimentación en el modelo realizado en el SAP 2000. Fue realizado el análisis modal de la estructura, permitiendo determinar las frecuencias naturales y modos de vibrar de la misma durante la vibración libre bajo estas características del suelo y se determinaron las velocidades máximas de vibración de la estructura bajo las cargas dinámicas. Estos resultados obtenidos serán comparados con los valores del diseño de los checoslovacos. Para conocer la influencia del suelo en la estructura, fueron tomados nuevos valores de rigidez del mismo; con la mitad de la rigidez del suelo original y con el doble del mismo para analizar su influencia sobre la cimentación. Estos nuevos valores son mostrados a continuación en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Rigidez del suelo

Dirección de la carga	Suelo Real KN/m^3	Suelo de mayor rigidez KN/m^3	Suelo con menor rigidez KN/m^3
VERTICAL	30 000	60 000	15 000
HORIZONTAL	60 000	120 000	30 000

Fuente: (elaboración propia).

Conclusiones parciales

- Se definen las características de la mesa de cimentación del turbogenerador, las propiedades de la máquina y las características del suelo para el análisis de la interacción de estos elementos.

- Se definen las cargas estáticas sobre la estructura de cimentación producto del peso propio del equipo y las cargas dinámicas producidas por el movimiento ondulatorio de la máquina.
- Se emplea el software Excel para la revisión del dimensionamiento de la cuna de apoyo del turbogenerador.
- Se realizó el ajuste del mallado para determinar el comportamiento de las tensiones y seleccionar el mallado más estable.
- Se emplea el software SAP 2000 para la modelación de la cimentación de la CTE “Máximo Gómez Báez” de Mariel para el análisis dinámico del comportamiento suelo-estructura.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS

El presente capítulo tiene como objetivo principal analizar los resultados obtenidos a través del diseño en SAP 2000 de la cimentación del turbogenerador de la central termoeléctrica “Máximo Gómez Báez” de Mariel. Será analizada la influencia del suelo en la estructura de cimentación al variar los valores de rigidez del mismo. Además, se llevará a cabo el análisis modal de la estructura para obtener las formas propias de la misma con cada una de sus frecuencias y se determinarán las vibraciones máximas generadas sobre la estructura para comparar los resultados obtenidos con los brindados por los checoslovacos a partir de su propio análisis.

3.1- Revisión del dimensionamiento de la cimentación

Mediante este análisis de revisión del dimensionamiento de la estructura, conoceremos si cumple con los parámetros establecidos por la norma ISO de la INDIA 10816-2.

1. 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 posee la mesa de cimentación del TG de la CTE de Mariel y las características geométricas del nuevo turbogenerador junto a sus componentes, la losa superior cumple para la colocación del equipo.

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

Las columnas cumplen con el planteamiento establecido, gracias a la simetría que posee la estructura, con una losa simétrica tomando como eje su sentido longitudinal y las columnas se encuentran alineadas en dicho sentido.

3. Como regla general, las columnas serán sometidas a aproximadamente 6 veces la carga vertical actual y estar espaciadas a no menos de 3.6 metros de centro a centro.

Para este paso fueron analizadas las cotas de las columnas cumpliendo con este planteamiento. Las columnas en ambas direcciones están espaciadas a no menos de 3.6m. A continuación, es mostrada

la tabla 3.1 con los resultados obtenidos de las tensiones producidas en cada una de las columnas que serán menores que la resistencia del hormigón minorada.

Tabla 3.1 Comparación de resistencias.

Tensión Hormigón Real (W/A) (KN/cm2)	Resist. Hormigón (KN/cm2)	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)

- Un quinto del tramo de cara a cara de las columnas tanto transversales como longitudinales debe ser menor que el espesor de la losa. (ver Tabla 3.2)

L: Distancia de cara a cara de las columnas

$L/5 < \text{Espesor de la losa}$

Tabla 3.2 Comparación con el espesor de losa.

Columnas	Distancia L	L/5	Espesor	Observación
1;2	3	0.6	1.68	Cumple
2;3	6.07	1.214	1.68	Cumple

3;4	6	1.2	1.68	Cumple
4;5	3.145	0.629	1.68	Cumple
5;6	4.005	0.801	1.68	Cumple
1;1'	4.55	0.91	1.68	Cumple
5;5'	5.75	1.15	1.68	Cumple

Fuente: (elaboración propia).

5. La estructura de la turbina debe en un principio actuar como un elemento rígido, donde la rigidez de las vigas debe ser mayor que el doble de la rigidez de las columnas. (ver tabla 3.3 y tabla 3.4)

Tabla 3.3 Rigidez de la viga.

# de vigas	Longitud vigas (m)	Módulo de elasticidad (E)	b (m)	h (m)	$I_z = \frac{b * h^3}{12}$	$K_v = \frac{12 * E * I_z}{L^3}$
1;2	4	74313.525	2	2	1.33333333	18578.3813

Fuente: (elaboración propia)

Tabla 3.4 Rigidez de la columna.

# de columnas	Longitud columnas (m)	Módulo de elasticidad (E)	Área (m ²)	$K_c = \frac{EA}{L}$
1	8.2	74313.525	1	9062.625

Fuente: (elaboración propia)

$$K_c * 2 = 18\ 125.85 \text{ KN/m}$$

$$K_v = 18\ 578.3813 \text{ KN/m} \quad 18\ 125.85 \text{ KN/m} < 18\ 578.3813 \text{ KN/m} \text{ Cumple}$$

6. La balsa será emplazada en el suelo, donde el espesor de la misma no será menor que $0.07L/3$.

En la tabla 3.5 mostrada a continuación, se observa la distancia entre columnas (L) y se determina el promedio de todas estas distancias (4829.0909mm) para emplearlo en la fórmula $0.07 * L^{4/3}$ y compararlo con el espesor de la balsa de la estructura.

Tabla 3.5 Distancia entre columnas.

Columnas	Distancia L	
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	$0.07L_3^4$
Promedio	4829.09091	5713.7147

Fuente: (elaboración propia)

5713.7mm > 2000mm (Cumple)

- El peso de la mitad de las columnas más el de la losa superior debe ser mayor que el peso de la turbina y sus elementos auxiliares. (Tabla 3.6)

Se determina el peso que existe desde la mitad de las columnas hacia arriba incluyendo el peso de la losa para ser comparado con el peso del turbogenerador. Para ello se determina primero el peso de la mitad de cada una de las columnas y se le suma el peso del área de la losa que se le atribuye. Se determina el peso total y se compara con el de la máquina.

Tabla 3.6. Resultados de la comparación del peso.

Densidad (KN/m ³)	Área (m ²)	Longitud (m)	Mitad de Longitud (m)	Peso de la mitad de la columna	Peso (Masa-losa) KN	Peso (total media estructura) KN	Peso - Turbo KN	
24	1	8.2	4.1	98.4	580.8	679.2	0	Cumple

24	1	8.2	4.1	98.4	773.76	872.16	65	Cumple
24	1	8.52	4.26	102.24	737.6832	839.9232	114	Cumple
24	1	8.52	4.26	102.24	470.8704	573.1104	76	Cumple
24	1	8.8	4.4	105.6	395.472	501.072	52.5	Cumple
24	1	8.8	4.4	105.6	425.712	531.312	13.15	Cumple
24	1	8.2	4.1	98.4	580.8	679.2	0	Cumple
24	1	8.2	4.1	98.4	773.76	872.16	65	Cumple
24	1	8.52	4.26	102.24	737.6832	839.9232	114	Cumple
24	1	8.52	4.26	102.24	470.8704	573.1104	76	Cumple
24	1	8.8	4.4	105.6	395.472	501.072	52.5	Cumple
24	1	8.8	4.4	105.6	425.712	531.312	13.15	Cumple
TOTAL						7993.5552	641.3	Cumple

Fuente: (elaboración propia).

8. El peso total de la estructura más el peso de la balsa, no será menor que tres veces el peso de la máquina (Tabla 3.7)

Para el cumplimiento de este planteamiento se determina: el peso de la losa, el peso total de las columnas y el peso de la balsa para ser sumados y comprarlos con, tres veces el peso total del turbogenerador.

Tabla 3.7 Pesos en la estructura.

No. Columnas	Densidad (KN/m ³)	Área (m ²)	Longitud (m)	Peso (Masa-columna) KN	Peso (Masa-losa) KN	Peso (total estructura) KN	Peso-Turbo KN
1	24	1	8.2	196.8	580.8	777.6	0
2	24	1	8.2	196.8	773.76	970.56	65
3	24	1	8.52	204.48	737.6832	942.1632	114
4	24	1	8.52	204.48	470.8704	675.3504	76
5	24	1	8.8	211.2	395.472	606.672	52.5
6	24	1	8.8	211.2	425.712	636.912	13.15
1'	24	1	8.2	196.8	580.8	777.6	0
2'	24	1	8.2	196.8	773.76	970.56	65
3'	24	1	8.52	204.48	737.6832	942.1632	114

4'	24	1	8.52	204.48	470.8704	675.3504	76
5'	24	1	8.8	211.2	395.472	606.672	52.5
6'	24	1	8.8	211.2	425.712	636.912	13.15
					TOTAL	9218.5152	641.3

Fuente: (elaboración propia)

Tabla 3.8 Peso de la balsa.

	Densidad (KN/m ³)	Espesor (m)	Área (m ²)	Peso (KN)
Balsa	24	2	260.49	12503.52

Fuente: (elaboración propia)

Tabla 3.9 Peso de la estructura.

Peso estructura	21722.0352	Cumple
3* Peso de la máquina	1923.9	

Fuente: (elaboración propia)

9. La tensión producida en el suelo no excederá 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

Tabla 3.10 Pesos de los elementos.

Peso estructura (KN)	21722.0352
Peso de la máquina (KN)	641.3
Área Balsa (m ²)	260.49

Fuente: (elaboración propia)

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

$$85.85103 \text{ KN/m}^2 < 400 \text{ KN/m}^2$$

10. El centro de rigidez de las columnas coincidirá con el centro de gravedad del equipo más la carga de la parte superior de la estructura, tanto en la longitud transversal como longitudinal.

Tabla 3.9 Centro de rigidez de las columnas.

Columna	Posición	Área (m ²)	A _i *X _i	Cota (mm)
No.	X _i			
1	0	1	0	0
2	4	1	4	4000
3	11.07	1	11.07	7070
4	18.07	1	18.07	7000
5	22.215	1	22.215	4145
6	27.22	1	27.22	5005
Suma		6	82.575	
Y _c	13.7625			

Fuente: (elaboración propia)

Tabla 3.10 Centro de rigidez de las vigas.

Carga	Posición	Carga (tf.)	P _i *X _i	Cota
No.	X _i			
1	4.195	13	54.535	4195
2	10.695	13	139.035	6500
3	12.095	9.8	118.531	1400
4	17.77	15.2	270.104	5675
5	22.14	10.5	232.47	4370
6	26.587	2.63	69.92381	4447
Suma		64.13	884.59881	
Y _c	13.7938377			

Fuente: (elaboración propia)

Tabla 3.11 Comprobación del centro de gravedad.

Longitud Total	29.39	Cumple
%	0.10662699	

Fuente: (elaboración propia)

$$\frac{X_{carga} - X_{columna}}{L_{total}} \leq 3\%$$

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

3.2- Resultados del análisis dinámico.

Durante el análisis dinámico realizado se determinaron las formas propias de la estructura con el suelo original para ser comparado con el resultado de los checos y se determinaron las mayores velocidades de vibración generadas por el conjunto máquina-estructura que dieron cumplimiento con la norma (Indian Standard, 2007) para el nuevo turbogenerador. Los valores obtenidos se encuentran por debajo de 3.8mm/s, lo normado para máquinas de 3600 r/min (ver figura 3.1). A continuación, es mostrada la tabla que establece los valores de velocidades vibratorias para evaluar el funcionamiento de este conjunto, máquina-estructura.

Tabla 3.1 Valores recomendados en presencia de velocidades de vibración para turbogeneradores.

Zone boundary	Shaft rotational speed	
	r/min	
	1 500 or 1 800	3 000 or 3 600
	R.m.s. vibration velocity	
	mm/s	
A/B	2,8	3,8
B/C	5,3	7,5
C/D	8,5	11,8

Fuente: (Indian Standard, 2007)

3.3- Análisis Modal.

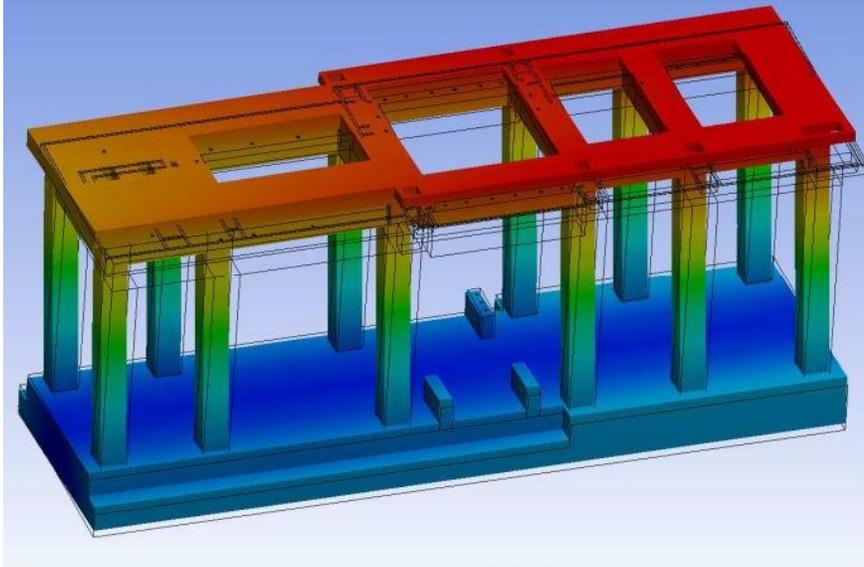
A continuación, se muestran los resultados del análisis modal de las estructuras con las distintas propiedades del suelo y los valores obtenidos en el modelo de los checos.

Tabla 3.2. Comparación del análisis modal

	Rigidez del Suelo			Resultados del modelo de los checos
	Cxy=15 000 KN/m ³ Cz=30 000 KN/m ³	Cxy=30000 KN/m ³ Cz=60 000 KN/m ³	Cxy=60000 KN/m ³ Cz=120000 KN/m ³	
Formas en las que varía la estructura bajo las vibraciones libres	Análisis Modal Frecuencias (Hz)			
	2.01	2.20	2.4	2.095
	2.7	2.83	2.92	2.92
	3.47	3.60	3.74	3.69
	8.02	8.26	8.6	8.52
	57.17	59.81	59.73	58.17

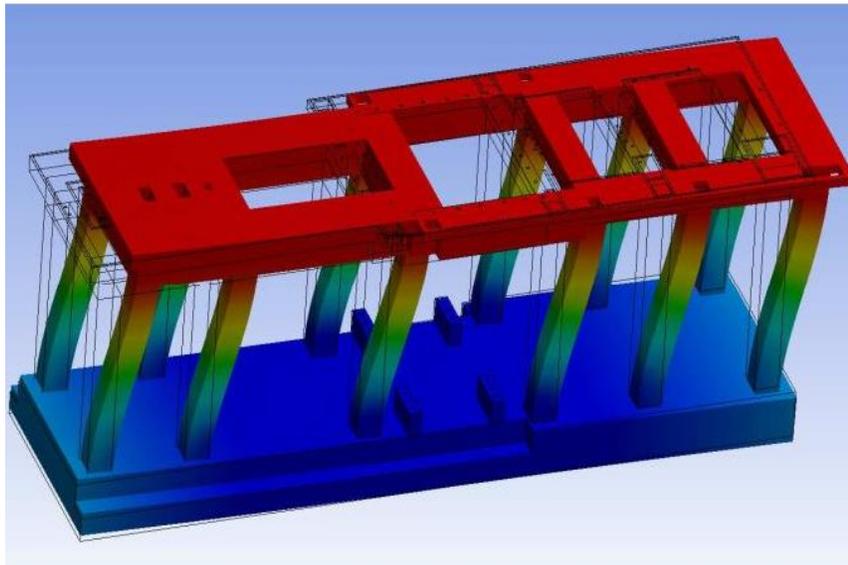
Fuente: (elaboración propia)

Como se observa en la tabla las frecuencias modales de la estructura con el suelo original se asemejan a las obtenidas en el modelo de los checos y en comparación con los otros suelos no poseen variación significativa. A continuación, se muestran las imágenes del modelo realizado por los checos



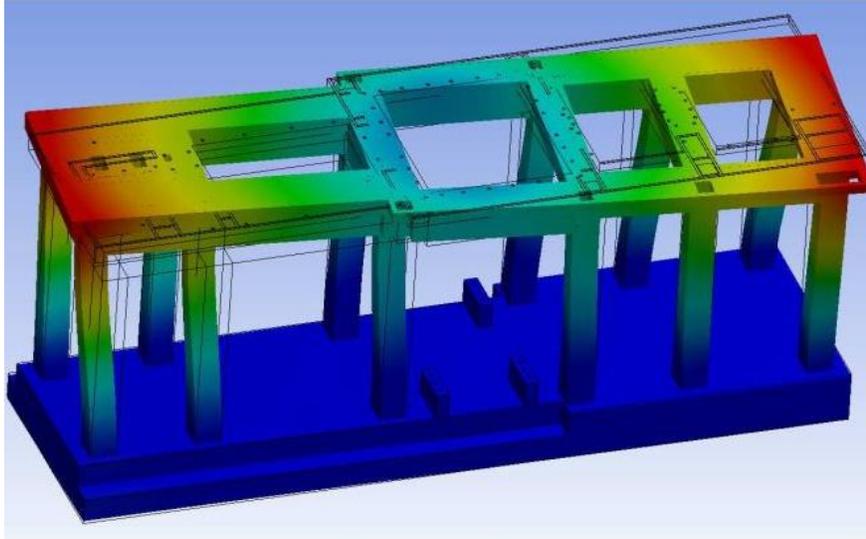
1. Forma propia 2,095 Hz

Figura 3.1 Fuente: (Michal Tomko, 2016)



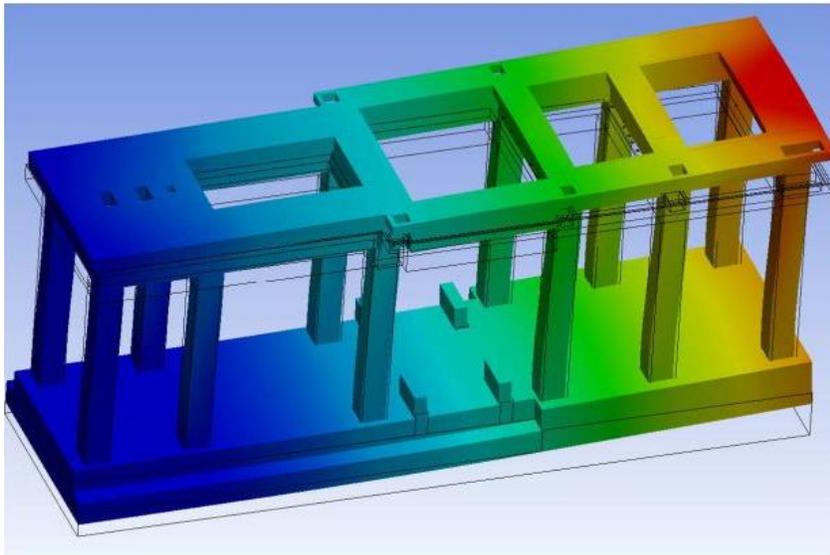
2. Forma propia 2,92 Hz

Figura 3.2 Fuente: (Michal Tomko, 2016)



3. Forma propia 3,69 Hz

Figura 3.3 Fuente:(Michal Tomko, 2016)



4. Forma propia 8,52 Hz

Figura 3.4 Fuente:(Michal Tomko, 2016)

3.2.1.2- Vibraciones máximas

En la siguiente tabla se muestran los valores de velocidades máximas de las vibraciones provocadas por la interacción máquina-estructura obtenidos a través del análisis en SAP 2000 para cada uno de los suelos.

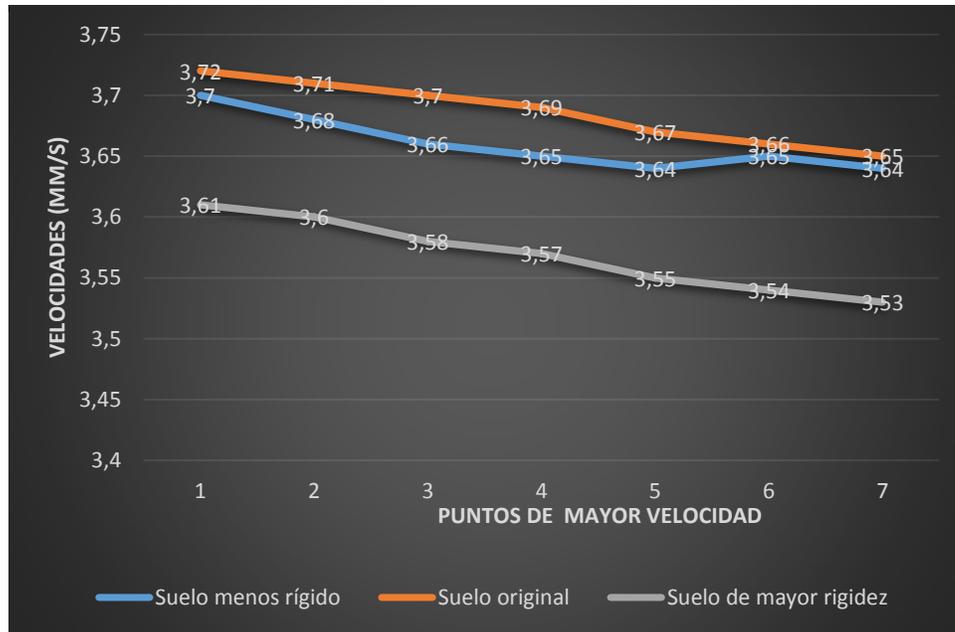
Tabla # 5. Comparación de velocidades.

	Rigidez del Suelo		
	$C_{xy}=15\ 000\ \text{KN/m}^3$ $C_z=30\ 000\ \text{KN/m}^3$	$C_{xy}=30\ 000\ \text{KN/m}^3$ $C_z=60\ 000\ \text{KN/m}^3$	$C_{xy}=60\ 000\ \text{KN/m}^3$ $C_z=120\ 000\ \text{KN/m}^3$
Mayores velocidades de vibración sobre la estructura	Velocidades (mm/s)		
	3.7	3.72	3.61
	3.68	3.71	3.60
	3.56	3.7	3.58
	3.65	3.69	3.57
	3.64	3.67	3.55
	3.65	3.66	3.54
	3.64	3.65	3.53

Fuente: (elaboración propia)

A partir del análisis realizado se puede observar que el suelo no tiene influencia significativa en las velocidades de vibración producidas sobre la estructura.

Tabla # 5. Comparación de velocidades.



Fuente: (elaboración propia)

CONCLUSIONES.

1. Investigaciones realizadas demuestran que en los últimos años se ha profundizado en el análisis dinámico de este tipo de estructuras y en su interacción suelo-estructura.
2. A partir de los análisis de revisión del dimensionamiento, la estructura de cimentación cumplió con lo establecido para la Norma India, ISO 10816-2.
3. Se logró modelar la estructura de cimentación en el software SAP 2000 para realizar el análisis de la interacción suelo-estructura.
4. A partir de los análisis realizados con el modelo en SAP 2000 se define que el análisis dinámico genera solicitaciones más desfavorables para este tipo de estructuras que el análisis estático.
5. Como resultado del análisis modal y de las velocidades de vibración sobre la estructura de cimentación para el suelo real, la cimentación cumple con los requerimientos de la Norma India, ISO 10816-2 y los mismos fueron cercanos a los alcanzados por los checos en su modelo.
6. En el análisis de la interacción suelo estructura, no se mostró variación significativa en las velocidades de vibración, por lo que se puede concluir que el suelo no tiene gran influencia en el comportamiento de la estructura.

RECOMENDACIONES

1. Se le recomienda a la EMPAI seguir profundizando sobre el estudio de estas estructuras y su interacción con el suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abou Elsaoud, A. M. (2012). "Finite element dynamic study on large framed foundation of steam turbine generator."
2. Alvarado, C. A. J. (1998). Estudio analítico de los efectos causados por el aislamiento de las vibraciones en cimentaciones para maquinaria industrial.
3. Álvarez, L. M. L. (2015). Estudio dinámico y estático de cimentaciones que soportan equipo petrolero e industrial, católica del ecuador.
4. Benčat, J. and M. Lukáč, Turbo-generator foundation dynamic analysis.
5. Bhatia, K. (2008). "Foundations for industrial machines and earthquake effects." ISET Journal of Earthquake Technology, Paper(495): 1-2.
6. Bharathi, M., D. Raj, and D.R. Dubey. Codal Provisions for Design of Machine Foundations. in International Symposium Geohazards: Science, Engineering and Management. 2014.
7. C. Zanuy, L. A., P. de la Fuente (2011). "The fatigue process of concrete and its structural influence." 61: 385-399.
8. Castañeda, C. Y. V. (2018). Modelación numérica de base para maquinaria tipo cuchilla del central mario muñoz, Camilo Cienfuegos.
9. Castro, K. A. T. (2015). Análisis y diseño de cimentaciones de equipos dinámicos, en plantas de generación eléctrica, ESPE Universidad de las fuerzas armadas.
10. Fleischer, P. S. and P. Trombik (2008). Turbo generator machine foundations subjected to earthquake loadings. 14th world conference on earthquake engineering, China.
11. Flores Gómez, J. E. (2012). "Análisis dinámico de cimentaciones Parque Industrial-Ica."
12. Francisca, F. M. and P. A. Arrúac (2007). "Rigidez y resistencia de suelos limosos con propiedades mecánicas aleatorias." Mecánica Computacional **26**: 2513-2532.

13. Garrido, S. G. (2011). "Turbinas de Vapor." Energiza.
14. Indian Standard, I.-. (2007). Mechanical vibration - evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
15. Ján Benčat, P. (abril,2017). "Diagnóstico por vibraciones de la Unidad base TG 6 CTE MARIEL."
16. Ján Benčat, P. (julio,2017). Informe sobre los resultados del vibrodiagnóstico del bloque de cimentación del TG 6 CTE Mariel, Cuba.
17. Jayarajan P., K. K. M. (August, 2014). "Dynamic Analysis of Turbo-generator Machine Foundations." Journal of Civil Engineering and Environmental Technology 1(4): 30 – 35.
18. Lizarza, J. T. C. (2011). Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural.
19. LLeonart, F. A. P. (2013). "Las causas más frecuentes de vibraciones en Turbogenerador y Máquinas Rotatorias similares."
20. Madhu Priya M, J. D. (2017). "Dynamic analysis and structural design of turbo generator foundation." International Journal of Advances in Engineering Research 13(III, March): 9.
21. Michal Tomko, P. (2016). "Proyecto de reconstrucción del bloque No. 6 (1x100 MW)."
22. Michal Tomko, P. (2018). "Cálculo dinámico de la losa de turbina Informe técnico."
23. Ming, F., W. Tao and L. Hui (2008). Dynamic behaviour of turbine foundation considering full interaction among facility, structure and soil. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
24. Nawrotzki, P., G. Hüffmann and T. Uzunoglu (2008). "Static and dynamic analysis of concrete turbine foundations." Structural Engineering International 18(3): 265-270.
25. Peña Carrera, P. F. (2016). "Cimentaciones de maquinaria."
26. Prakash, S. and V. K. Puri (2006). "Foundations for vibrating machines." Journal of structural Engineering 33(1): 13-29.

27. Rao, S. S. (2012). Vibraciones Mecánicas.
28. Robichaud, J.M. and P. Eng, Reference standards for vibration monitoring and analysis. Bretech Engineering Ltd, 2009
29. S.A. Halkude*, M. G. K. a. Y. N. B. (2017). "Effect of Braces on Framed Machine Foundation for Turbo Generator." International Journal of Current Engineering and Technology **7**: 1143-1150.
30. Reyes, I. M. 2009. Identificación de las causas de vibraciones excesivas presentes en una estructura portante y propuesta para la solución del problema. Master, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”
31. Saavedra, D. P. N. Tutorial severidad vibratoria. Parte i. u. d. concepcion.
32. Valero, E. F. (2004). Aportaciones al estudio de las maquinarias eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos