



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**TEMA: ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES DE  
EQUIPOS DINÁMICOS, EN PLANTAS DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA**

**AUTOR: TELLO CASTRO, KAMILO ADOLFO**

**DIRECTOR: ING. PRO, ERNESTO**

**CODIRECTOR: DR. AGUIAR, ROBERTO**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

## CERTIFICACIÓN

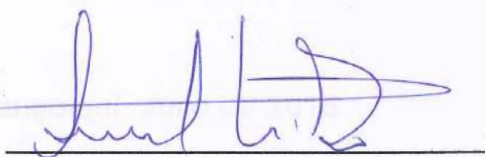
**Ing. Ernesto Pro**

**Dr. Roberto Aguiar**

Certifican que el trabajo titulado: "ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES DE EQUIPOS DINÁMICOS, EN PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA" realizado en su totalidad por el Sr. Kamilo Adolfo Tello Castro, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.


El mencionado trabajo consta de (un) documento empastado y (un) disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Se autoriza a Kamilo Tello Castro que lo entregue al Dr. PABLO CAIZA SÁNCHEZ en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, Julio de 2015



**Ing. Ernesto Pro**

**DIRECTOR DEL PROYECTO**



**Dr. Roberto Aguiar**

**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

Kamilo Adolfo Tello Castro

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

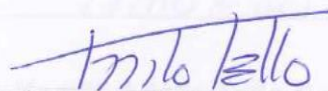
Yo, Kamilo Adolfo Tello Castro

Declaro que:

El proyecto de grado denominado "ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES DE EQUIPOS DINÁMICOS, EN PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA", ha sido desarrollado en base a una investigación amplia, respetando los derechos intelectuales de terceros, conforme a las referencias que constan en el texto cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Julio de 2015



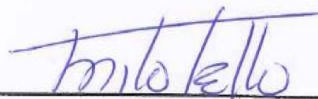
Kamilo Adolfo Tello Castro

## AUTORIZACIÓN

Yo, Kamilo Adolfo Tello Castro,

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" la publicación en la biblioteca virtual de la Institución, del proyecto de grado titulado: **ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES DE EQUIPOS DINÁMICOS, EN PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**; cuyo contenido, ideas y criterios son exclusivamente de mi autoría.

Sangolquí, Julio de 2015



Kamilo Adolfo Tello Castro

## DEDICATORIA

*A toda mi familia, en especial a mis padres Blanca y Adolfo, por su apoyo y ayuda incondicional durante mi carrera. A mi hermana Krystell por su amor.*

***Kamilo Adolfo Tello Castro***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente a Dios y a todas las manifestaciones de él en mi vida, por guiarme y estar conmigo a lo largo de la carrera, por poner en mí camino a tantos docentes y amigos que en los últimos años fueron luz y apoyo.

Al Ingeniero Ernesto Pro, por su enseñanza y confianza en el proceso de elaboración del presente proyecto de grado, de igual manera al Doctor Roberto Aguiar por compartir su conocimiento y junto con el Ingeniero Ernesto criticar constructivamente mi trabajo.

A mis amigos más cercanos, por siempre estar presentes y atentos, a Luis Medrano por su invaluable ayuda, a Pablo Rodríguez por su tiempo y orientación. A Oliver por su fiel compañía en las noches de trabajo, por darme una excusa para pensar y concentrarme.

***Kamilo Adolfo Tello Castro***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	¡Error! Marcador no definido.
AUTORIZACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi

### CAPÍTULO I

#### GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	2
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5 METODOLOGÍA.....	5

### CAPÍTULO II

#### GENERACIÓN ELÉCTRICA

2.1 INTRODUCCIÓN.....	8
2.2 TIPOS DE CENTRALES.....	9
2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES.....	17
2.4 CLASIFICACIÓN DE LA MAQUINARIA.....	19
2.5 EQUIPOS COMÚNMENTE USADOS.....	23
2.6 CIMENTACIONES USADAS PARA EQUIPOS DINÁMICOS.....	25

## **CAPÍTULO III**

### **VIBRACIONES TRANSMITIDAS A LA CIMENTACIÓN**

3.1 INTRODUCCIÓN.....	27
3.2 TEORÍA DE UN GRADO DE LIBERTAD .....	29
3.3 VIBRACIONES VERTICALES .....	42
3.4 ESTADO LÍMITE DE SERVICIO POR VIBRACIÓN DE MAQUINARIA.....	43
3.5 RESONANCIA .....	46
3.6 PROPIEDADES DEL SUELO.....	49
3.7 ESFUERZOS EN EL SUELO.....	51
3.8 CARGAS TRANSMITIDAS A LA CIMENTACIÓN .....	55
3.9 ESTABILIDAD AL VOLCAMIENTO Y DESLIZAMIENTO .....	59

## **CAPÍTULO IV**

### **GUÍA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS DINÁMICOS**

4.1 INTRODUCCIÓN.....	61
4.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	62
4.2.1 REQUERIMIENTOS DE LA MAQUINARIA.....	62
4.2.2 PREDISEÑO DE LA CIMENTACIÓN.....	63
4.2.4 CARGAS DE DISEÑO .....	66
4.2.5 COMBINACIONES DE CARGA .....	66
4.2.6 MODELAMIENTO DE EQUIPOS, SUELO Y CIMENTACIÓN.....	68
4.3 DISEÑO ESTRUCTURAL.....	68
4.3.1 INTRODUCCIÓN .....	68
4.3.2 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA EN PLANTA DE LA CIMENTACIÓN .....	68
4.3.3 DISEÑO A FLEXIÓN .....	69
4.3.4 DISEÑO A CORTE .....	69
4.4 DETALLE DE ARMADO .....	69



## **CAPÍTULO V**

### **DISEÑO DE UNA CIMENTACION PARA EL TURBO GENERADOR MARCA SOLAR**

5.1 INTRODUCCIÓN.....	70
5.2 CRITERIOS DE DISEÑO.....	71
5.3 CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR .....	72
5.4 DIMENSIONES DEL EQUIPO .....	74
5.5 PREDISEÑO DE LA CIMENTACIÓN.....	74
5.6 ANALISIS DE CARGAS.....	78
5.7 VIBRACIONES TRANSMITIDAS A LA CIMENTACIÓN.....	83
5.8 ANALISIS COMPUTACIONAL.....	90

## **CAPÍTULO VI**

### **ANALISIS DE RESULTADOS**

6.1 INTRODUCCIÓN.....	96
6.2 ESFUERZOS EN EL SUELO.....	96
6.3 COMPROBACIÓN AL VOLTEO Y DESLIZAMIENTO.....	97
6.4 MOMENTOS Y CORTANTES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA CIMENTACIÓN.....	99
6.5 ANALISIS MODAL Y RESONANCIA .....	104
6.5 ANALISIS DE VIBRACIONES .....	106
6.6 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN .....	110

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	115
7.2 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....	117
7.2 ANEXOS.....	118

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relaciones para un sistema de un grado de libertad .....	41
Tabla 2. Amplitudes permisibles para equipos dinámicos .....	45
Tabla 3. Módulo de Poisson recomendado según el tipo de suelo.....	49
Tabla 4. Constantes equivalentes de resortes, para cimentaciones circulares o rectangulares.....	52
Tabla 5. Coeficientes para cimentaciones embebidas .....	53
Tabla 6. Formulación para la determinación de $K_x = K_y$ .....	54
Tabla 7. Cálculo de centro de gravedad del turbogruppo .....	77
Tabla 8. Cálculo de centro de gravedad de la cimentación .....	77
Tabla 9. Carga estática debido al peso de los equipos.....	79
Tabla 10. Carga viva tomada de la Norma NEC_SE_CG .....	79
Tabla 11. Carga producida por el viento .....	80
Tabla 12. Carga debido a acciones sísmicas.....	81
Tabla 13. Cargas dinámicas producidas por componentes dinámicos.....	82
Tabla 14. Frecuencia producida por el compresor.....	83
Tabla 15. Frecuencia producida por la turbina.....	85
Tabla 16. Frecuencia producida por el generador .....	87
Tabla 17. Estados de carga por ángulo de fase entre turbina y generador .....	89
Tabla 18. Máximo y mínimo esfuerzo actuante.....	96
Tabla 19. Cargas actuantes en el sentido transversal.....	97
Tabla 20. Estabilidad ante el volteo y deslizamiento para las combinaciones de servicio.....	98
Tabla 21. Momentos máximos y mínimos de la cimentación .....	99
Tabla 22. Cortantes máximos y mínimos de la cimentación.....	100
Tabla 23. Factores de participación modal.....	104
Tabla 24. Frecuencias y periodos modales .....	105
Tabla 25. Frecuencias y periodos modales .....	105
Tabla 26. Cálculo de $V_{RMS}$ , asociado a desplazamientos en X, Y, Z.....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición alternador .....	8
Figura 2: Esquema de la central térmica.....	10
Figura 3: Esquema presa hidroeléctrica.....	11
Figura 4. Método de aprovechamiento de aguas marinas.....	12
Figura 5. Esquema central mareomotriz .....	12
Figura 6. Esquema central geotérmica. ....	13
Figura 7. Parque eólico.....	14
Figura 8. Parque solar. ....	15
Figura 9. Esquema de una central nuclear.....	16
Figura 10. Martillo de forja. ....	22
Figura 11. Esquema Turbina de gas.....	23
Figura 12. Cimentación tipo bloque.....	25
Figura 13. Cimentación tipo cajón.....	26
Figura 14. Cimentación tipo pórtico.....	26
Figura 15. Sistema de una grado de libertad. ....	29
Figura 16. Respuesta del sistema de un grado de libertad ante una fuerza de excitación constante. ....	37
Figura 17. Respuesta del sistema de un grado de libertad ante una fuerza de excitación causada por una masa rotatoria.....	40
Figura 18. Límites de amplitud del desplazamiento en función de la frecuencia. ....	44
Figura 19. Fundación altamente y bajamente sintonizada. ....	47
Figura 20. Presencia de resonancia.....	48
Figura 21. Mecanismo de manivela. ....	58
Figura 22. Turbogruppo Titan 250, Solar Turbines.....	70
Figura 23. División de áreas para el cálculo del coeficiente de balasto.....	72
Figura 24. Skid del turbogruppo Solar.....	74
Figura 25. Dimensiones de la cimentación.....	74
Figura 26. Esquema general de centros de gravedad de maquina y cimentacion...78	
Figura 27. Función por carga dinámica (SAgp).....	84
Figura 28. Función por carga dinámica (SAgp).....	86
Figura 29. Función por carga dinámica (SAgen).....	88
Figura 30. Excitación debida al generador y turbina .....	88
Figura 31. Disposiciones de desfase entre turbina y generador.....	89

Figura 32. Vista en planta y ubicación pads.....	90
Figura 33. Vista isométrica del bloque de hormigón.....	90
Figura 34. Definición de propiedades para la cimentación. ....	91
Figura 35. Asignación de cargas permanentes (CP).....	92
Figura 36. Asignación de carga viva (CV).....	92
Figura 37. Asignación de sobrecarga de operación SAgp.....	93
Figura 38. Asignación de sobrecarga de operación SApt.....	93
Figura 39. Asignación de sobrecarga de operación SAgen.....	94
Figura 40. Asignación de carga por sismo $E_y$ .....	94
Figura 41. Asignación de carga por sismo $E_z$ .....	95
Figura 42. Asignación de carga por viento $W$ .....	95
Figura 43. Desplazamientos de cimentación ante $R_{ai1}$ .....	97
Figura 44. Esquema de análisis.....	99
Figura 45. Momento máximo actuante alrededor del eje Y $M_{11} = 161$ (kN/m) .....	100
Figura 46. Momento máximo que actúa alrededor de eje X: $M_{22} = 89.65$ (kN-m).101	
Figura 47. Momento mínimo que actúa alrededor del eje Y: $M_{11} = -51.06$ (kN-m)101	
Figura 48. Momento mínimo que actúa alrededor de eje X: $M_{22} = -73.92$ (kN-m) 102	
Figura 49. Cortante máximo que actúa en el plano X-Z: $V_{13} = 255.63$ (kN) .....	102
Figura 50. Cortante máximo que actúa en el plano Y-Z: $V_{23} = 198.77$ (kN) .....	103
Figura 51. Cortante mínimo que actúa en el plano X-Z: $V_{13} = -213.79$ (kN) .....	103
Figura 52. Cortante mínimo que actúa en el plano Y-Z: $V_{23} = -198.77$ (kN) .....	104

## **EXTRACTO**

El presente documento muestra al lector los pasos necesarios para diseñar una cimentación que soportará un equipo usado en la generación de energía eléctrica, principalmente mostrando los diferentes equipos dinámicos que existen, en el caso puntual de la generación eléctrica la máquina, por sus propiedades mecánicas presenta e impone solicitaciones poco comunes a la sub estructura que lo sustentará. Es por esto que es de suma importancia conocer los diferentes conceptos y factores que intervienen a la hora de diseñar una cimentación con estos escenarios.

Se presenta la forma en la que se genera energía en la actualidad, haciendo notar que el movimiento rotativo, esencial para la generación, es el causante de los esfuerzos de interés. Añadiendo teoría dinámica que sustenta los modelos de análisis. Convergiendo esto en herramientas de cálculo y criterios de diseño, esperando que el lector tome toda esta información como base y ayuda al diseñar, no como un obligatorio y único método de diseño.

**Palabras clave:**

**CIMENTACIÓN**

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**MOVIMIENTO ROTATIVO**

**MODELOS DE ANÁLISIS**

**CRITERIOS DE DISEÑO**

## **ABSTRACT**

This document shows the reader the necessary steps to design a foundation that will support equipment used in power generation, mainly showing the different dynamic teams that exist in the specific case of electricity generation machine for mechanical properties presents and imposes unusual to sustain sub structure that stresses. This is why it is important to know the different concepts and factors involved in designing a foundation with these scenarios.

The way in which energy is generated today is presented, noting that, essential for the generation, rotary motion is the cause of the efforts of interest. Adding theory behind dynamic analysis models. Converging in this calculation tools and design criteria, expecting the reader to take all this information as a basis and helps the design, not a mandatory and unique design method.

### **Key Words:**

**FOUNDATION**

**POWER GENERATION**

**ROTARY MOTION**

**ANALYSIS MODELS**

**DESIGN CRITERIA**

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 INTRODUCCIÓN**

En la actualidad el hombre hace uso diario de la electricidad, ya que desde hace mucho tiempo está familiarizado con ella, al punto de volverla cotidiana e indispensable. Sin embargo no está consciente de todo el proceso que conlleva la obtención de energía eléctrica; con el paso del tiempo el hombre ha elaborado e implementado equipos y máquinas que realizan procesos mecánicos y físicos necesarios para obtener energía eléctrica. Un generador es el responsable propiamente de convertir un movimiento rotatorio en energía eléctrica.

La Ingeniería Civil está involucrada en estos procesos de generación, debido a que los equipos usados deben estar correctamente soportados por una subestructura, la cimentación, que es la encargada de sustentar el equipo y transmitir la fuerza generada por este al suelo de una forma segura, así mismo asegurar que el equipo en pleno funcionamiento se encuentre seguro y que no presenta ningún riesgo para el entorno.

El presente documento brinda al lector el entendimiento de la generación de energía, centrándose propiamente en centrales térmicas. Así también, de cuáles son los parámetros que se debe tener en cuenta para llegar a un diseño óptimo de la cimentación.

## 1.2 ESTADO DEL ARTE

El diseño de estructuras y fundaciones que apoyan cargas dinámicas ha evolucionado gradualmente durante las últimas décadas. En la década de 1960, el diseño se basó en relaciones empíricas directas entre la masa de la base y la masa de la máquina, sin tomar en cuenta la respuesta dinámica. En la década de 1970, estos enfoques empíricos fueron sustituidos en gran medida con las técnicas basadas en la teoría de la vibración estructural y conceptos de la elasticidad del suelo, donde la respuesta de vibración depende directamente de las propiedades del suelo y los modos de flexión.

Estas técnicas todavía se utilizan debido a su facilidad de uso y el nivel razonable de precisión. Desde los años 80 se han utilizado programas informáticos para analizar y diseñar fundaciones de máquinas, empleados normalmente cuando se dispone de una gran cantidad de datos del suelo, cuando se busca la respuesta del suelo/estructura, y/o cuando los modelos de análisis simples no son válidos.

El estado del arte permite a los ingenieros diseñar de forma fiable las estructuras que soportan máquinas. Uniendo los avances recientes en las diferentes disciplinas ingenieriles con una base bien establecida de conocimientos teóricos, dando lugar a procedimientos definidos para el análisis y diseño de estructuras con carga dinámica.



## 1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

### **Objetivo general del proyecto**

Generar una guía que contemple criterios, parámetros y normativa necesaria, para el diseño de cimentaciones para los equipos y maquinaria usados en la generación de energía eléctrica.

### **Objetivos específicos del proyecto**

- Definir modelos matemáticos que permitan comprender el comportamiento de equipos dinámicos como turbinas o generadores.
- Establecer características de los generadores eléctricos, que son comúnmente usados, para identificar los parámetros al diseñar la cimentación.
- Presentar ejemplos de equipos de generación eléctrica con ayuda de las herramientas creadas.
- Presentar un informe técnico, donde se detalle cálculos realizados y planos; de la cimentación de diferentes equipos.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

La constante demanda de proyectos de generación de energía eléctrica alrededor del mundo, ha requerido de grandes retos en el diseño y fabricación de equipos electrógenos, que generen dicha energía para diferentes comunidades e industrias, los fabricantes de equipos a su vez requieren de la asistencia de empresas que desarrollen ingeniería, gestión de compras o de suministros, de la construcción para montaje e instalación y puesta en servicio de dichos equipos.

En el momento que una empresa se ve en la necesidad de generar energía eléctrica, requiere de grupos de trabajo para cumplir este objetivo, la Ingeniería Civil juega un papel importante y claro; calculando dimensiones de losas, fundaciones de hormigón para los equipos, cuantía de armado y demás especificaciones de una cimentación para las facilidades necesarias y equipos en la obra montada.

Ante dicho requerimiento en la industria de generación de energía Eléctrica, el calculista debe tener claro las condiciones del proyecto. Por lo que es importante generar una guía que le permita al diseñador practicidad y eficiencia a la hora de realizar el diseño de este tipo de obras civiles. Sin pasar por alto criterios que se deban hacer específicamente por condiciones particulares de un proyecto o limitantes que se generen.

## 1.5 METODOLOGÍA

La metodología que maneja el presente documento es explicar inicialmente todos aquellos conceptos y procedimientos para el diseño de estructuras de carga dinámica. En base a diseños de cimentaciones ya construidas se procederá a identificar inicialmente los equipos o máquinas generalmente usadas en proyectos en generación eléctrica. Se recopilará para esto, información sobre proyectos realizados en países como Ecuador, Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, Nicaragua, entre otros.

Paralelamente se tomará en cuenta los diversos factores particulares e independientes de cada proyecto, se presentara así escenarios, los cuales serán la base para definir las guías y criterios de diseño para la estandarización de Cimentaciones para Equipos Dinámicos; lo cual deberá ser sustentado mediante normas y cálculos para el aseguramiento del comportamiento satisfactorio de dichos diseños.

De acuerdo con lo anterior, se resume a continuación la metodología a utilizar para el desarrollo del proyecto de tesis:

- Con la información técnica de equipos y el estudio de suelos obtenido del sitio a desarrollarse el proyecto de referencia, se procederá a diseñar las cimentaciones de estructuras.
- Con la información de los equipos, se procederá a estandarizar según su comportamiento dinámico, así también se diferenciaran datos de cada proyecto, ya que no es recomendable generalizar.

- Se ampliará el estudio en las facilidades e infraestructuras relacionadas con las obras civiles de un proyecto de generación eléctrica a partir de equipos dinámicos.

Se tendrá en cuenta la participación teórica que está involucrada en esta investigación, por ende:

- Se debe trabajar con modelos matemáticos, que representen el comportamiento de las diferentes fuerzas que se generan por equipos.
- Se diferenciarán y filtrarán los datos de entrada. Se diseñará, programará y comprobará las herramientas de cálculo y diseño de cimentaciones para equipos dinámicos.
- Posteriormente se realizarán las combinaciones críticas establecidas en el código de diseño y se determinarán las máximas solicitaciones. Para finalmente realizar el diseño estructural de los diferentes elementos, estableciendo el modelo matemático que más se aproxime a su comportamiento real.
- Se realizarán los planos a partir de especificaciones técnicas, memorias de cálculo, procedimientos constructivos y cantidades de materiales.

Normativas a considerar:

**Hormigón:**

- American Concrete Institute ACI

**Materiales:**

- American Society of Testing Materials ASTM

**Cálculo de cargas laterales de sismo y/o viento:**

- Uniform Building Code UBC
- International Building Code IBC
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11(V. 2015)

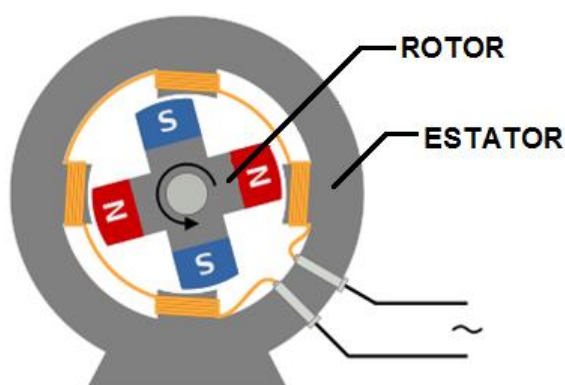
## CAPÍTULO II

### GENERACIÓN ELÉCTRICA

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo trata de las formas empleadas para generar energía eléctrica, que no difieren en esencia, ya que todas ellas parten del principio físico llamado inducción electromagnética. Se hablara también de los tipos de centrales eléctricas, equipos usados y sus clasificaciones con el propósito de determinar las maquinas dinámicas que son de interés.

La inducción electromagnética ocurre en el generador o alternador. Como se muestra en la figura 2.1, el alternador está compuesto por una parte que rota en el centro, respecto a otra sección de diámetro mayor.



**Figura 1.** Composición alternador

**Fuente:** (<https://es.wikipedia.org/wiki/Alternador>, n.d.)

La pieza que rota es llamada rotor, conformada por un número par de bobinas y un cableado enrollando a estas, usualmente se usa cobre, cargado eléctricamente, que al girar a altas velocidades respecto a la parte estática, conocida como estator; produce un campo electromagnético. Posteriormente unos cables llamados escobillas recuperan esta corriente y la transporta a los diferentes equipos como un transformador o baterías.

## **2.2 TIPOS DE CENTRALES**

Para conseguir el movimiento rotacional se hace uso de la turbina, la cual esta acoplada al mismo eje del alternador. La turbina gira gracias a un sistema de presiones, temperaturas y de disposición de alabes o paletas; las cuales reciben el vapor producido por algún proceso químico o físico en etapas anteriores.

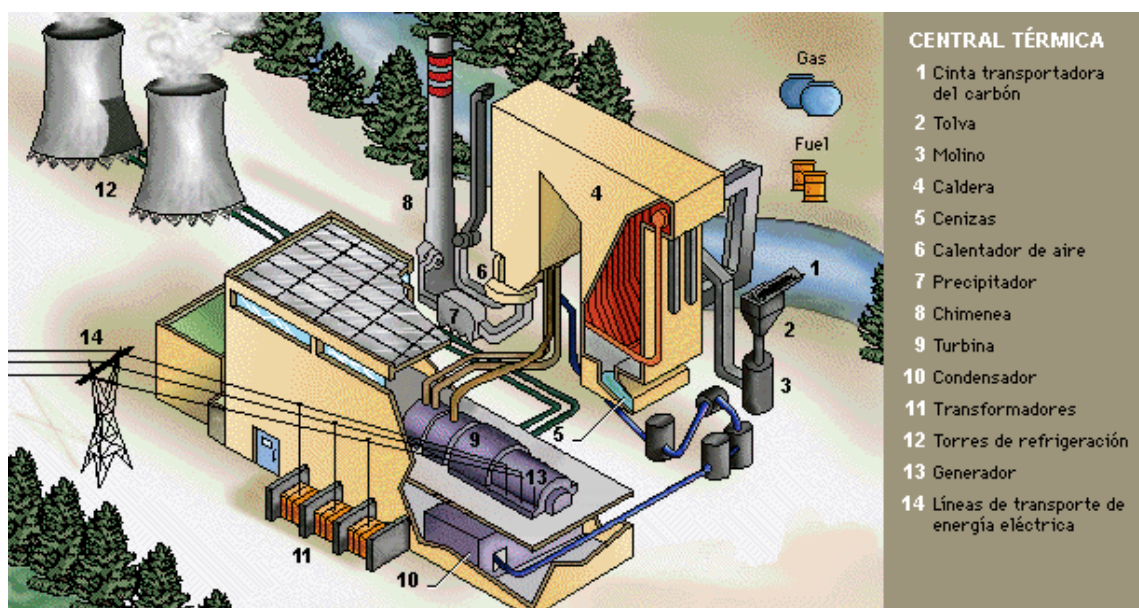
Dichos procesos definen el tipo de generación eléctrica que se tiene, dependiendo de materias primas empleadas para obtener la energía eléctrica. Se tiene:

### **CENTRALES TÉRMICAS**

Consta esencialmente de calderas, las cuales producen vapor y es inyectado a presión a la turbina. Se combustionan distintos combustibles no renovables; solidos como el carbón mineral, líquidos como lo son el gas-oil y fuel-oil, originados en la refinación del crudo y combustibles gaseosos como el gas natural.

Las centrales térmicas suelen construirse cerca de diversos proyectos como explotaciones petroleras, para aprovechar los combustibles fósiles. O de minas de carbón para evitar el transporte de combustible. El rendimiento de las turbinas aumenta con el aprovechamiento mediante la refrigeración del vapor, la cual demanda grandes cantidades de agua.

Las centrales térmicas ofrecen la ventaja de ajustarse a la necesidad y pueden construirse cerca de las zonas de consumo. A modo de vista del autor, son las más perjudiciales con el medio ambiente, por lo que se necesita emplear métodos limpios para producir la energía eléctrica. La figura 2.2 muestra el esquema de este tipo de centrales



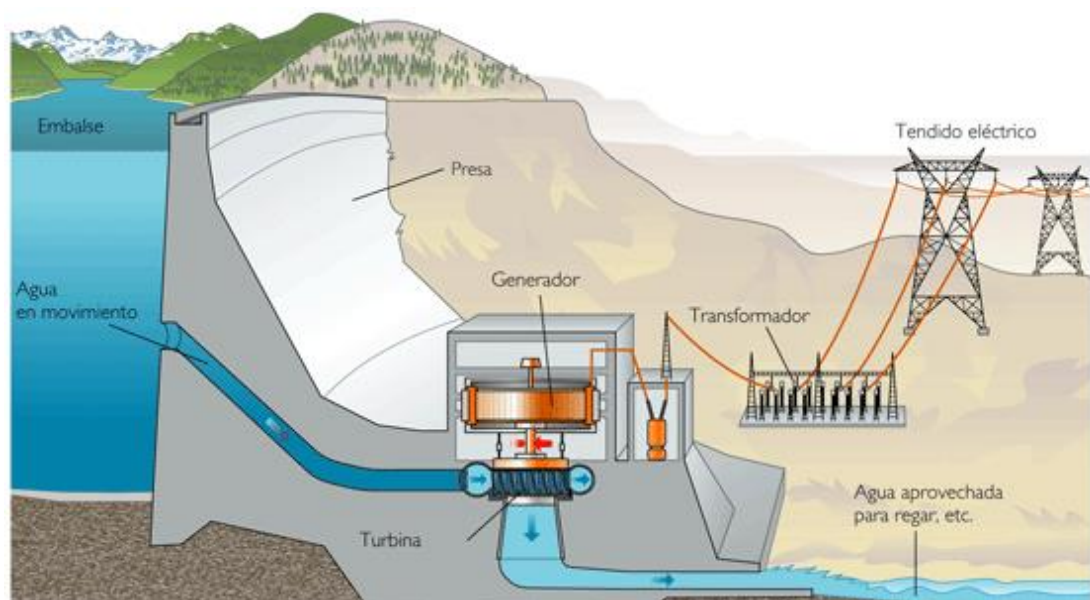
**Figura 2:** Esquema de la central térmica.

**Fuente:** (<http://www.imagenesi.net/centrales-termicas/central-termica/>, n.d.)



## CENTRALES HIDRÁULICAS O HIDROELÉCTRICAS

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones que permiten aprovechar la energía potencial gravitatoria, donde la masa del agua es contenida en embalses. Las turbinas hidráulicas son accionadas por la presión que causa el agua. Así que mientras sea mayor la caída, se tendrá mayor energía potencial.



**Figura 3:** Esquema presa hidroeléctrica

**Fuente:** (<http://www.iae.org.ar/archivos/educ6.pdf>, n.d.)

Las centrales hidráulicas son las más rentables, ya que si bien el costo de construcción es elevado, se compensa con los bajos gastos de explotación y mantenimiento luego la puesta en marcha de las mismas.

Estas centrales suelen ubicarse lejos de los grandes centros de consumo y condicionadas por las características del terreno. Las turbinas más relevantes son las: Pelton, Francis, Kaplan y de hélice.

## CENTRALES MAREOMOTRICES

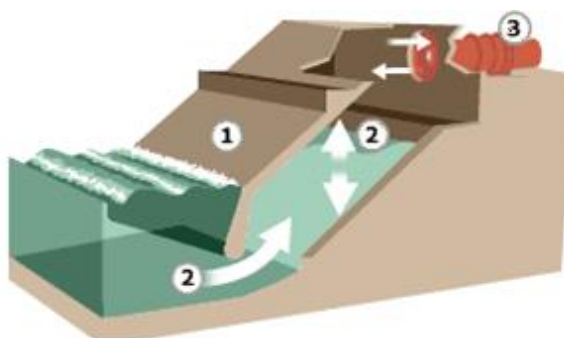
Una manera de conseguir el movimiento rotatorio es mediante el paso del agua por una hélice sumergida, como lo muestra la figura 2.4. La energía eléctrica es consecuencia del movimiento de las mareas, partiendo del cambio de nivel y corrientes de agua de mares, océanos, lagos, etc.



**Figura 4.** Método de aprovechamiento de aguas marinas.

**Fuente:** (<http://sedientosdesaber.blogspot.com/2013/01/el-agua-como-fuente-de-energia.html>, n.d.)

La figura 2.5 muestra otro método empleado, el cual consta de una obra civil (1), que aprovecha el cambio de las mareas, así cuando la marea está alta se retiene en la zona de embalse (2); al bajar la marea, el agua retorna al mar a través de las máquinas (3), haciendo funcionar las mismas.



**Figura 5.** Esquema central mareomotriz

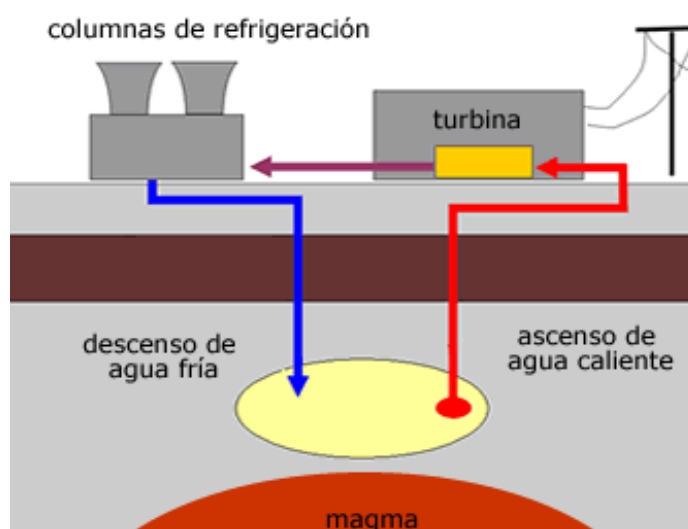
**Fuente:** (<http://sedientosdesaber.blogspot.com/2013/01/el-agua-como-fuente-de-energia.html>, n.d.)

El conjunto de "máquina motriz – generador" se denomina grupo-bulbo y en su interior se ubican un generador, los equipos correspondientes y una hélice (turbina eléctrica del tipo Kaplan de eje horizontal o inclinado).

## CENTRALES GEOTÉRMICAS

Las centrales geotérmicas son poco usadas debido a que involucran una perforación complicada, se perfora hasta encontrar altas temperaturas que producen un vapor natural de 200°C aproximadamente.

Esta energía térmica acciona directamente las turbinas de vapor de las centrales geotérmicas. La figura 2.6 muestra el ingreso de agua fría hasta un nivel donde se calienta y asciende en estado gaseoso, para ser aprovechada por la turbina, luego pasa a unas columnas de refrigeración para proceder a ser inyectada nuevamente.



**Figura 6.** Esquema central geotérmica.

**Fuente:** (<http://heliosolar.es/>, n.d.)

## CENTRALES EÓLICAS

El principal medio para obtener energía mediante estas centrales es por medio de los aerogeneradores, que utilizan la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire.

Como se muestra en la figura 2.7, los aerogeneradores pueden ser de tamaño variable, y transforman con sus aspas los vientos o corrientes de aire para generar un movimiento rotacional. El viento puede ser aprovechado a partir de ciertas velocidades (mínima 6 m/s).



**Figura 7.** Parque eólico.

**Fuente:** (<http://energiasostenible.info/energias-renovables/energia-eolica/>, n.d.)

## CENTRALES SOLARES

Conocidas también como central térmica solar o central termosolar, son centrales industriales donde en una primera instancia, la energía luminosa y térmica proveniente del sol, en forma de radiación electromagnética es transformada en energía eléctrica.

Como se aprecia en la figura 2.8 se emplean paneles con celdas, que son las que recuperan esta energía para luego mediante calentar un fluido, produciendo una potencia necesaria para mover un alternador.



**Figura 8.** Parque solar.

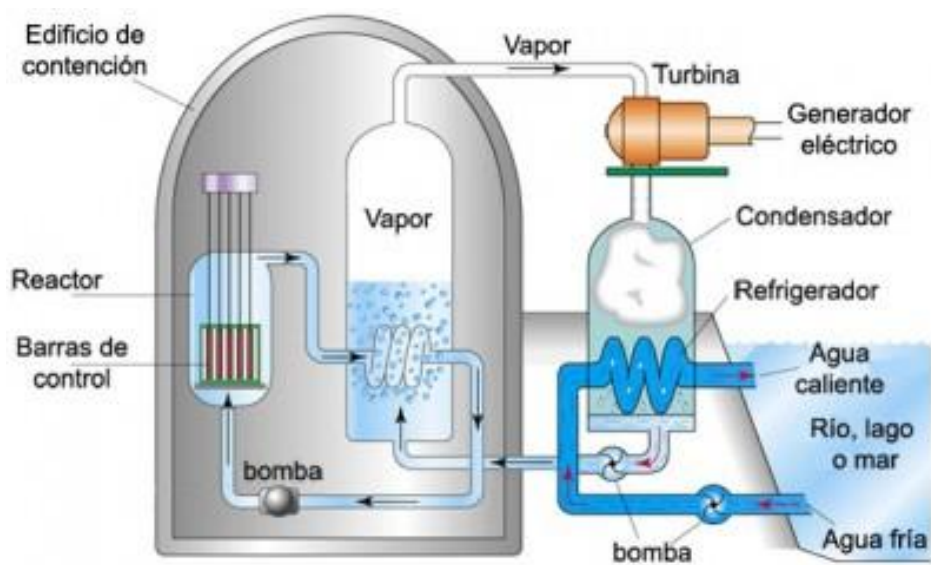
**Fuente:** (<http://heliosolar.es/>, n.d.)

La obtención de este tipo de energía es muy irregular, debido a que depende de las variaciones horarias y estacionales y de las modificaciones en la nubosidad.

## CENTRALES NUCLEARES

El principio básico del funcionamiento de una central nuclear se basa en la fisión nuclear, comúnmente se usa el uranio. Se induce una rotura en cadena de los núcleos de los átomos de este elemento químico.

El reactor es el encargado de provocar y controlar estas fisiones atómicas que generaran una gran cantidad de calor que es usado para calentar agua y convertirla en vapor a alta presión y temperatura. El reactor y los sistemas de instalación deben ser sometidos a una continua refrigeración, por lo tanto, la localización de estas centrales depende de la disponibilidad de caudales de agua de valor determinado y regular.



**Figura 9.** Esquema de una central nuclear.

**Fuente:** ([http://energia-nuclear.net/como\\_funciona\\_la\\_energia\\_nuclear.html](http://energia-nuclear.net/como_funciona_la_energia_nuclear.html), n.d.)

## **2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES**

Las Centrales Eléctricas pueden clasificarse dependiendo del servicio que brinden:

### **CENTRALES DE BASE O CENTRALES PRINCIPALES**

Este tipo de centrales se caracterizan por su alta potencia, y generalmente, se trata de centrales nucleares, térmicas e hidráulicas.

Su función es suministrar energía eléctrica en forma permanente; la instalación suele estar en marcha durante largos períodos de tiempo y no debe sufrir interrupciones de la instalación.

### **CENTRALES DE PUNTA**

Estas centrales tienen como principal función cubrir la demanda de energía eléctrica cuando existen picos de consumo, o sea horas punta. Trabajan en espacios cortos de tiempo durante determinadas horas, su funcionamiento es periódico.

Debido a la capacidad de respuesta necesaria, generalmente suelen ser centrales hidráulicas o térmicas. Las centrales de punta sirven de apoyo a las centrales de base.

## **CENTRALES DE RESERVA**

El concepto de reserva económica implica la disponibilidad de instalaciones capaces de sustituir, total o parcialmente, a las centrales de base en las siguientes situaciones: escasez o falta de materias primas (agua, carbón, fuel-oil, etc.).

El concepto de reserva técnica comprende la programación de determinadas centrales para reemplazar a las centrales de producción elevada en el caso de fallas en sus maquinarias. Las centrales a las que se suele recurrir en esos casos son las hidráulicas o con turbinas de gas debido a la rápida capacidad de respuesta.

## **CENTRALES DE SOCORRO**

Si bien tienen el mismo propósito que las centrales anteriores, se diferencian en que estas son pequeñas centrales autónomas y transportables en camiones, trenes o barcos. Suelen ser accionadas por motores Diésel.



## **2.4 CLASIFICACIÓN DE LA MAQUINARIA**

La clasificación de las maquinas desde el punto de vista del Ingeniero calculista es de acuerdo al tipo de vibración que éstas generan, teniendo tres casos. Maquinaria recíproca, maquinaria centrífuga y maquinaria de impacto, las cuales se explican a continuación:

### **2.4.1 MÁQUINAS RECÍPROCAS**

Estas máquinas trabajan logrando la expansión violenta de un gas mediante la combinación de émbolos, bielas y manivelas. El movimiento alternativo del émbolo (de tipo armónico o cíclico) se transforma por la acción de la biela en un movimiento circular de la manivela.

Por lo general son máquinas de baja velocidad. A este grupo pertenecen las máquinas de combustión interna, compresoras de pistón y todas aquellas que involucren mecanismos de manivela. La velocidad de operación de este tipo de máquinas es menor a 600 rev/min (RPM). Distinguiéndose los siguientes tipos:

#### **2.4.1.1 MÁQUINAS DE VAPOR**

Este tipo de equipos, por lo general, consta de uno o dos cilindros, los cuales pueden ser horizontales o verticales. El vapor generado en una caldera impulsa el émbolo de cada cilindro.

### **2.4.1.2 BOMBAS Y COMPRESORES DE ÉMBOLO**

Generalmente las bombas constan de uno o varios pasos de compresión y están asociados a motores diésel o de gasolina. Los compresores pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de la posición de los cilindros, además pueden ser de acción sencilla o doble.

### **2.4.1.3 MOTORES DIÉSEL Y DE GASOLINA**

Por lo general los motores constan de más de tres cilindros, pueden ser de dos o cuatro tiempos. Se le denomina “Ciclo diésel” al ciclo básico presión–volumen de los motores a base de diésel y “Ciclo de Otto” a los motores a base de gasolina. El impulso se debe a la expansión de gases producto de la explosión de una mezcla de combustible y aire.

### **2.4.2 MÁQUINAS CENTRÍFUGAS**

La característica principal de estas máquinas es que sus partes móviles describen un desplazamiento de trayectoria circular. Su movimiento está regido por la ley de acción y reacción, al desplazar un fluido entre los alabes de una o más ruedas, en otros casos se debe a la existencia de un conductor en un campo magnético variable. Este tipo de maquinaria por lo general trabaja a velocidad constante y son: turbinas, (utilizadas en las termoeléctricas), bombas centrífugas, compresores centrífugos, ventiladores y turbogeneradores.

La velocidad de operación de estas máquinas está entre 3000 RPM a 10000 RPM e incluso pueden sobrepasar este valor, por lo general son de alta velocidad. Podemos distinguir los siguientes tipos:

#### **2.4.2.1 BOMBAS Y COMPRESORES CENTRÍFUGOS**

En estas máquinas las partes móviles (generalmente accionadas por un motor externo) impulsan un fluido (agua, aceite, aire, etc.) que circula entre los alabes y se desplaza en determinada dirección. En algunos casos estas máquinas pueden operar indistintamente como turbinas o como bombas, invirtiéndose el sentido del flujo del fluido.

#### **2.4.2.2 TURBOGENERADORES**

En este tipo de máquinas el agua o el vapor, al desplazarse entre los alabes, impulsan la turbina, misma que está acoplada con el campo móvil (rotor) de un generador eléctrico.

#### **2.4.2.3 MOTORES ELÉCTRICOS**

En este tipo de máquinas, un campo magnético variable hace que los conductores del rotor se desplacen, produciéndose un movimiento circular.

### 2.4.3 MÁQUINAS DE IMPACTO

Como su nombre lo indica, este tipo de máquinas producen cargas de impacto, y encontramos maquinas tales como: martillo de forja, cizallas de impacto, máquinas punzadoras, martillos neumáticos o estampadoras.



**Figura 10.** Martillo de forja.

**Fuente:** [http://www.hellopro.es/Automator\\_Groupe\\_Automator-882-noprofil-2010532-5173-0-1-1-fr-societe.html](http://www.hellopro.es/Automator_Groupe_Automator-882-noprofil-2010532-5173-0-1-1-fr-societe.html)

La característica principal de estas máquinas, es que sus cargas pueden considerarse como impulsos singulares, dado que su efecto termina antes que ocurra la siguiente carga, lo que provoca una vibración de tipo transitoria. Para evaluar la respuesta de una cimentación sujeta a éste tipo de cargas se requiere conocer la información de fuerza-tiempo para cada impulso, normalmente esta información la da el proveedor del equipo.

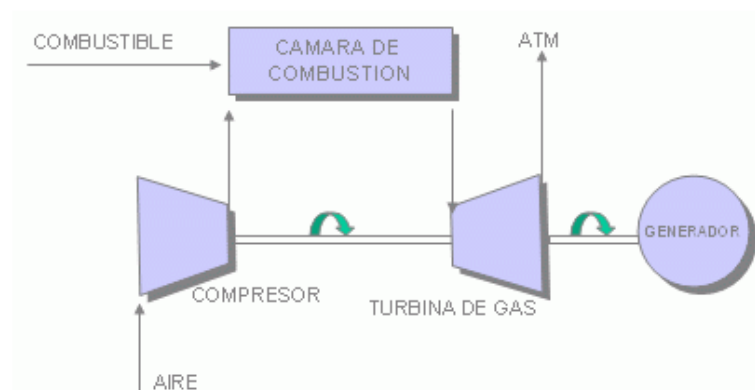
## 2.5 EQUIPOS COMÚNMENTE USADOS

Como se mencionó, en las centrales de generación eléctrica son empleadas esencialmente los turbo grupos. Turbinas que son accionadas por gas proveniente de la combustión del gas natural, gas de altos hornos o aceite de petróleo destilado. Y otras que funcionan en base al vapor resultante de las turbinas a gas.

### TURBINAS A GAS

La turbina a gas ha adquirido importancia gracias a avances utilizados en los procesos, iniciando en el compresor donde el aire es comprimido hasta la presión de combustión, usándose luego en la cámara para quemar combustible (gas o líquido).

Una porción del aire es utilizado para enfriamiento y control de la temperatura. Las modernas turbinas de gas se basan en el siguiente esquema:



**Figura 11.** Esquema Turbina de gas

**Fuente:** [http://www.hellopro.es/Automator\\_Groupe\\_Automator-882-noprofil-2010532-5173-0-1-1-fr-societe.html](http://www.hellopro.es/Automator_Groupe_Automator-882-noprofil-2010532-5173-0-1-1-fr-societe.html)

Los gases que se generan por la combustión son distribuidos por la totalidad de la primera fila de paletas y difundidos a lo largo de la turbina, a esta primera etapa se le conoce como turbina de alta presión; obteniéndose a través de las mismas el trabajo necesario para accionar el compresor. La siguiente etapa, llamada turbina de potencia, acciona el generador eléctrico. Las unidades TG contienen como característica sobresaliente el tiempo de arranque, llegando a alcanzar la carga plena en 10-20 minutos.

## **TURBINA DE VAPOR**

En la turbina de vapor la energía potencial del vapor de alta presión se convierte en energía mecánica, al enviar la corriente de vapor a los álabes curvados. El rendimiento de la conversión de energía obedece a la relación entre la velocidad periférica de los álabes y la velocidad de la corriente de vapor. Si se busca eficiencia se debe elegir una velocidad moderada.

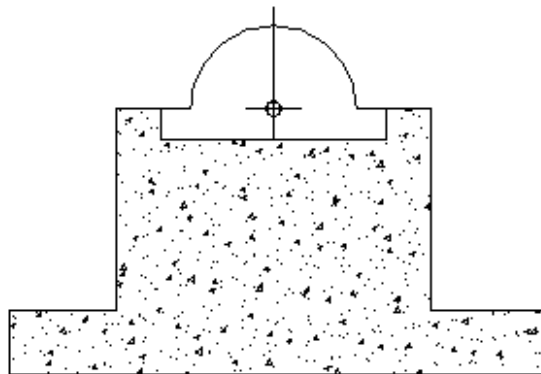
La presión que existe en el vapor se debe disminuir escalonadamente, teniendo diferentes secciones para aprovechar las diferentes presiones del vapor. Algunas turbinas se construyen con varias carcasas para las distintas partes del árbol, las cuales son estrictamente acopladas.

El vapor al expandirse incrementa su volumen, por lo cual la longitud de los álabes es cada vez más larga en el sentido del flujo de vapor.

## 2.6 CIMENTACIONES USADAS PARA EQUIPOS DINÁMICOS

### TIPO BLOQUE

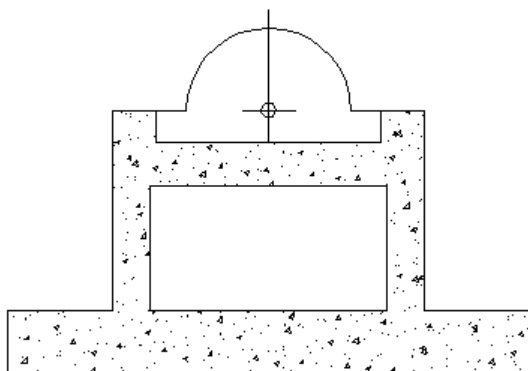
Consiste en un bloque macizo o con huecos generalmente de hormigón reforzado que soporta a la máquina en su parte superior, figura 2.11. Para fines de análisis puede ser considerado como un cuerpo rígido.



**Figura 12.** Cimentación tipo bloque.

### TIPO CAJÓN

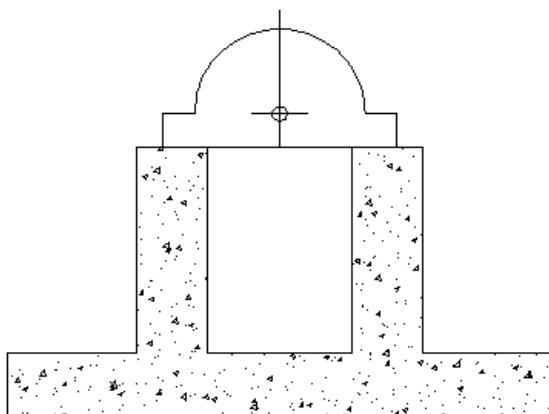
Consiste en un bloque hueco de hormigón armado que soporta a la máquina en su parte superior, figura 2.12.



**Figura 13.** Cimentación tipo cajón.

### TIPO MURO

Consiste en un par de muros de hormigón armado que aloja a la máquina en su parte superior, figura 2.13.



**Figura 14.** Cimentación tipo pórtico.



## CAPÍTULO III

### VIBRACIONES TRANSMITIDAS A LA CIMENTACIÓN

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Con el propósito de que el lector comprenda la naturaleza de las vibraciones que son transferidas a la cimentación se presenta conceptos teóricos, que son la base del análisis para las cimentaciones a diseñar.

Las cargas al ser de tipo periódico se representan mediante una función armónica senoidal o cosenoidal.

##### 3.1.1 DEFINICIONES

#### VIBRACIÓN

Es el movimiento periódico de un cuerpo o sistema de cuerpos interconectados que se desplazan desde una posición de equilibrio.

#### AMPLITUD

La amplitud ( $a_d$ ), es la distancia máxima entre la separación de un punto específico con su posición de equilibrio, causada por una fuerza aplicada.

## FRECUENCIA

Se entiende como la magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo, se define como

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3.1a)$$

## PERÍODO

Tiempo que tarda en repetirse un movimiento completamente, se mide en unidades de tiempo (segundo). Se define como:

$$T = \frac{2 \pi}{w_n} \quad (3.1b)$$

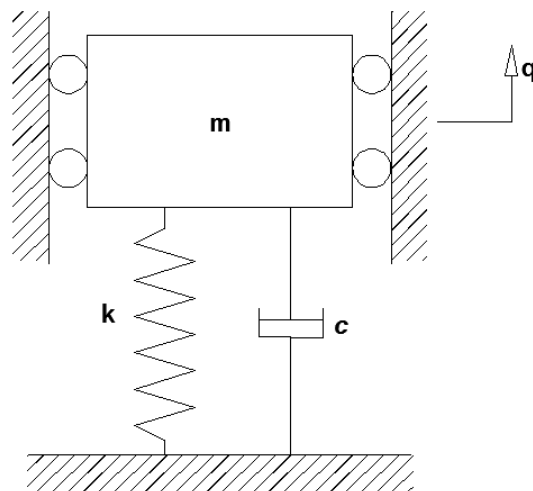
## AMORTIGUAMIENTO

Capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía, el coeficiente de amortiguamiento denominando Ceda ( $\xi$ ), es expresado como:

$$\xi = \frac{c}{2 \sqrt{K m}} \quad (3.1c)$$

### 3.2 TEORÍA DE UN GRADO DE LIBERTAD

Se dice que un sistema es de un solo grado de libertad cuando tiene limitado su movimiento en una sola dirección (Fig. 3,1). Formado por una masa rígida  $m$  que descansa sobre un resorte de rigidez  $k$  y un amortiguador viscoso con coeficiente de amortiguación  $c$ .



**Figura 15.** Sistema de una grado de libertad.

**Fuente:** Design of Structures & Foundations for Vibrating Machines

Al permitir que el sistema se ponga en movimiento, con una velocidad inicial  $V$  de la masa. La ecuación del movimiento de la vibración libre del sistema será:

$$m \ddot{q} + c \dot{q} + K q = 0 \quad (3.2)$$

Fuerza	+	fuerza de	+	fuerza
inercial		amortiguamiento		en el
				resorte

En la ecuación 3.2,  $q$  representa el desplazamiento, su primera derivada ( $\dot{q}$ ) la velocidad y la segunda derivada ( $\ddot{q}$ ), la aceleración de la masa. El resultado es cero ya que no hay fuerza externa en el sistema durante la vibración. (Aguiar Falconi)

Otra manera de presentar la ecuación diferencial en 3.2, se logra mediante:

1.- Se sabe que:

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3.1a) \quad ; \quad T = \frac{2\pi}{w_n} \quad (3.1b) \quad ; \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{K m}} \quad (3.1c)$$

2.- Si a la ecuación 3.2, se le divide para  $m$  y se simplifica

$$\ddot{q} + \frac{c}{m} \dot{q} + \frac{K}{m} q = 0 \quad (3.3)$$

3.- Para el segundo término de ecuación 3.3, se le multiplica y divide para el mismo valor se tiene:

$$\frac{c}{m} * \frac{2\sqrt{K m}}{2\sqrt{K m}} \quad (3.4)$$

$$2 * \frac{c}{2\sqrt{K m}} * \frac{\sqrt{K m}}{m} \quad (3.5)$$

$$2 \xi \sqrt{\frac{K m}{m^2}} \quad (3.6)$$

$$2 \xi \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3.7)$$

$$2 \xi w_n \quad (3.8)$$

Para el tercer término se sabe que:

$$(w_n)^2 = \frac{K}{m} \quad (3.9)$$

4.- Reemplazando (3.8) y (3.9) en (3.3), se obtiene:

$$\ddot{q} + 2 \xi w_n \dot{q} + w_n^2 q = 0 \quad (3.10)$$

Se plantea la solución de la ecuación diferencial (3.10) de la siguiente forma:

$$q(t) = A e^{\lambda t} \quad (3.11)$$

Donde  $A$  es una constante de integración y  $\lambda$  es una variable a determinar.

Su primera derivada es:

$$\dot{q}(t) = A \lambda e^{\lambda t} \quad (3.12)$$

La segunda derivada es:

$$\ddot{q}(t) = A \lambda^2 e^{\lambda t} \quad (3.13)$$

Reemplazando (3.11), (3.12), (3.13) en (3.10):

$$A \lambda^2 e^{\lambda t} + 2 \xi w_n A \lambda e^{\lambda t} + w_n^2 A e^{\lambda t} = 0 \quad (3.14)$$

Tomando como factor común  $A e^{\lambda t}$ :

$$A e^{\lambda t} (\lambda^2 + 2 \xi w_n \lambda + w_n^2) = 0 \quad (3.15)$$

$$\lambda^2 + 2 \xi w_n \lambda + w_n^2 = 0 \quad (3.16)$$

$$\lambda = \frac{- (2 \xi w_n) \pm \sqrt{(2 \xi w_n)^2 - 4(1)(w_n^2)}}{2} \quad (3.17)$$

$$\lambda = \frac{- 2 \xi w_n \pm \sqrt{4 \xi^2 w_n^2 - 4 w_n^2}}{2} \quad (3.18)$$

$$\lambda = \frac{- 2 \xi w_n \pm 2 w_n \sqrt{\xi^2 - 1}}{2} \quad (3.19)$$

$$\lambda = - \xi w_n \pm w_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (3.20)$$

Se le conoce a la ecuación 3.20 como polinomio característico, donde las raíces de  $\lambda$ , dependen del valor del amortiguamiento ( $\xi$ ).

## VIBRACIONES LIBRES

Para el caso propuesto de vibración libre, donde no existe una fuerza externa, se conocen cuatro posibles soluciones que definen los casos de vibración, ya que el radical puede ser positivo, cero o negativo.

### VIBRACIÓN LIBRE SIN AMORTIGUAMIENTO

En este caso:

$$\xi = 0 \quad (3.21)$$

Teniendo:

$$\lambda = \pm w_n \sqrt{-1} \quad (3.22)$$

### VIBRACIÓN LIBRE SUB-AMORTIGUADA

Corresponde al caso real en el cual vibran las estructuras, donde:

$$0 < \xi \leq 1 \quad (3.23)$$

Obteniendo las raíces:

$$\lambda = -\xi \omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (3.24)$$

### **VIBRACIÓN LIBRE SOBRE-AMORTIGUADA**

Se obtienen raíces reales, ya que:

$$\xi > 1 \quad (3.25)$$

### **VIBRACIÓN LIBRE CRÍTICAMENTE AMORTIGUADA**

Se presenta cuando:

$$\xi = 1 \quad (3.26)$$

Obteniendo en el radical de (3.20) cero (0).



## VIBRACIONES FORZADAS

Como se mencionó inicialmente las cargas aplicadas por los equipos dinámicos son representadas por cargas senoidales. Si el sistema mostrado en la figura 3.1 estuviese sujeto a una excitación armónica, representada mediante una fuerza  $P_0 \sin w_m t$ . Se consideran dos casos.

### 1. FUERZA EXCITADORA CONSTANTE

La amplitud de la fuerza excitadora ( $P_0$ ) es constante, teniendo como ecuación de movimiento la ecuación:

$$m\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = P_0 \sin w_m t \quad (3.27)$$

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Fuerza} & & \text{Fuerza de} & & \text{Fuerza} & = & \text{Fuerza} \\ \text{inercial} & + & \text{amortiguamiento} & + & \text{en el} & & \text{Excitadora} \\ & & & & \text{resorte} & & \end{array}$$

En estado forzado de excitación constante, el sistema tiene una tendencia a vibrar en la frecuencia de operación  $w_m$ . La solución de la ecuación 3.27 bajo las condiciones de equilibrio (despreciando la parte transitoria correspondiente a la vibración libre) puede ser expresada como:

$$z = a_d \sin(w_m t + \alpha) \quad (3.28)$$

Dónde:

$\alpha$  es la diferencia de fases entre la fuerza excitadora y el desplazamiento.

Sustituyendo en la ecuación 3.28 en la ecuación 3.27 y resolviendo, se obtendrán las siguientes expresiones para  $a_d$  y  $\alpha$ :

$$a_d = \frac{P_o}{\sqrt{(K - m\omega_m^2)^2 + C^2\omega_m^2}} \quad (3.28)$$

$$\tan \alpha = \frac{C \omega_m}{K - m\omega_m^2} \quad (3.29)$$

Sustituyendo

$$\omega_n^2 = \frac{K}{m}, \quad \xi = \frac{C}{2\sqrt{Km}}, \quad \eta = \frac{\omega_m}{\omega_n}$$

Las ecuaciones 3.28 y 3.29, pueden ser reducidas a:

$$a_d = \frac{P_o}{K\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\eta\xi)^2}} \quad (3.30)$$

$$\tan \alpha = \frac{2\eta\xi}{1 - \eta^2} \quad (3.31)$$

Sustituyendo  $\frac{P}{K} = Z_{st}$ . Siendo  $Z_{st}$  el desplazamiento estático.

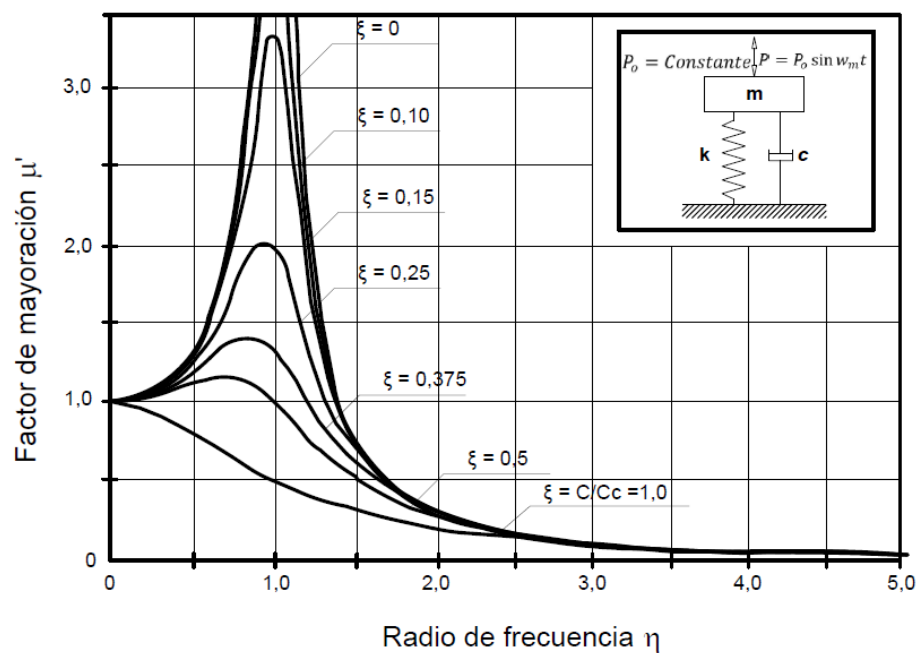
La ecuación 3.30 puede ser escrita como:

$$Z = Z_{st}\mu \quad (3.32)$$

Donde:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\eta\xi)^2}} \quad (3.33)$$

Aquí  $\eta$  es llamado “factor de mayoración dinámico”. La figura 3.2 muestra la variación de  $\mu$  con respecto a  $\eta$  (Ecuación 3.33), para diferentes valores de  $\xi$ .



**Figura 16.** Respuesta del sistema de un grado de libertad ante una fuerza de excitación constante.

**Fuente:** (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1976)

## 2. EXCITACIÓN DE UNA MASA ROTATORIA.

La fuerza excitadora  $P$  en el caso de rotación recíprocante o desbalanceado, es de la forma:

$$P = P_o \sin w_m t \quad (3.34)$$

$$P_o = \text{Constante} \quad (3.35)$$

$$P_o = m_e e w_m^2 \quad (3.35)$$

Donde:

$m_e$  = Masa recíprocante o desbalanceada.

$e$  = Desplazamiento en el caso de ser recíprocante, o la excentricidad de la masa desbalanceada en el caso de mecanismos de tipo rotatorio.

$w_m$  = Frecuencia del movimiento.

La amplitud de la fuerza excitadora en este caso es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de operación ( $w_m$ ).

La ecuación de movimiento para un solo grado de libertad sujeta a este tipo de fuerza excitadora se puede escribir como:

$$m\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = (m_e e w_m^2) \sin w_m t \quad (3.36)$$

Sustituyendo por  $P_o = m_e e w_m^2$  en la ecuación 3.30, la solución se convierte a:

$$a_d = \frac{m_e e w_m^2}{\sqrt{(K - m w_m^2)^2 + C^2 w_m t}} \quad (3.37)$$

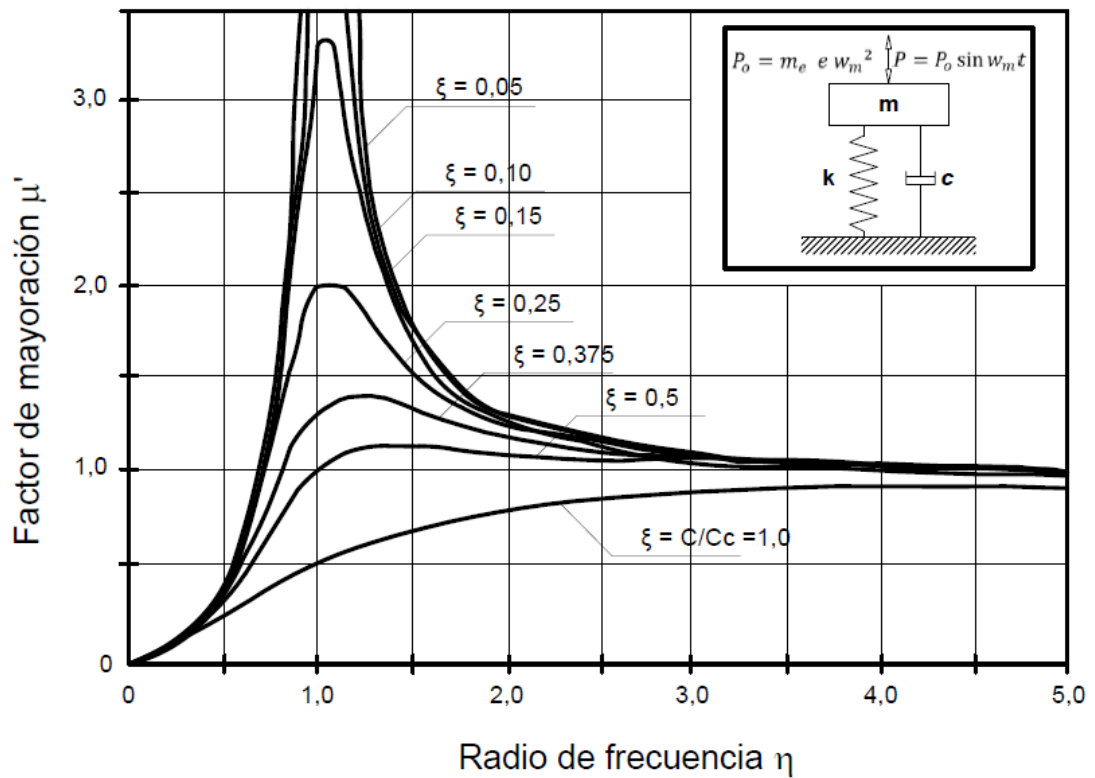
Sustituyendo  $w_n^2 = \frac{K}{m}$  ,  $\xi = \frac{C}{2\sqrt{Km}}$  ,  $\eta = \frac{w_m}{w_n}$  , la ecuación 3.37 queda:

$$\frac{a_d}{\frac{m_e e}{m}} = \eta^2 \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2 \eta \xi)^2}} \quad (3.38)$$

$$\mu' = \eta^2 \mu \quad (3.39)$$

Donde  $\mu'$  es el factor de mayoración,  $\mu$  es el factor de aumento para el correspondiente caso de fuerza excitadora constante (ecuación 3.33).

La figura 3.3 muestra la variación de  $\mu'$  con  $\eta$ , para varios valores de  $\xi$ .



**Figura 17.** Respuesta del sistema de un grado de libertad ante una fuerza de excitación causada por una masa rotatoria.

**Fuente:** (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1976)

La expresión para  $\alpha$  es la misma que la dada en la ecuación 3.31. Cuando la amortiguación es despreciada en el sistema,  $\xi=0$ , así:

$$\mu = \frac{1}{1 - \eta^2} \quad \text{Para una fuerza constante de excitación} \quad (3.40)$$

$$\mu = \frac{\eta^2}{1 - \eta^2} \quad \text{Para una excitación de masa rotatoria} \quad (3.41)$$

Cuando  $\eta = 1$ , tanto  $\mu_1$  y  $\mu_2$  tienden a infinito. Esto marca la etapa de la "resonancia". La amplitud en la resonancia será finita debido a la amortiguación que está presente en cualquier sistema físico. Es deseable entonces asegurar en el diseño de cualquier estructura cargada dinámicamente que el valor de la relación de frecuencia  $\eta$ , sea lo más alejado a la unidad.

Como se puede ver en las figuras 3.2 y 3.3, las curvas para los dos casos son similares en apariencia. Sin embargo, puede notarse que los picos de resonancia para los valores de amortiguación gradualmente se alejan de la ordenada en  $\eta = 1$ . Los picos se producen en los valores de  $\eta$  menos de uno en el caso de fuerza de excitación constante y a valores de  $\eta$  mayor que uno en el caso de la rotación de tipo masa excitación.

Las expresiones para la frecuencia de resonancia y amplitudes para un sistema de libertad de un solo grado, viscosamente amortiguado para los dos casos se dan en la tabla 1.

**Tabla 1.**

Relaciones para un sistema de un grado de libertad.

	Fuerza excitadora constante	Excitación de tipo masa rotatoria
	$P_0 = \text{constante}$	$P_0 = m_o e (w_m)^2$
Frecuencia de resonancia	$f_n \sqrt{1 - 2\xi^2}$	$f_n \frac{1}{\sqrt{1 - 2\xi^2}}$
Amplitud para una frecuencia $f$	$\frac{P_0}{K} \left[ \frac{1}{(1 - \eta^2)^2 + (2\eta\xi)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$	$\frac{m_o e}{m} \eta^2 \left[ \frac{1}{(1 - \eta^2)^2 + (2\eta\xi)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$
Máxima amplitud de vibración	$\frac{P_0}{K} \frac{1}{2\xi} \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}}$	$\frac{m_o e}{m} \frac{1}{2\xi \sqrt{1 - \xi^2}}$

**Fuente:** (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1976)

Donde:

$$f_n = \text{Frecuencia natural sin amortiguamiento} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

$$\xi = \text{Coeficiente de amortiguación} = \frac{c}{c_c}$$

$$\frac{c}{c_c} = \text{Amortiguamiento critico} = 2\sqrt{K m}$$

### 3.3 VIBRACIONES VERTICALES

Las vibraciones que una máquina en operación induce a la cimentación son transmitidas al suelo en forma de ondas que se propagan a su alrededor, su magnitud depende del tipo de máquina y movimiento que genere, de cómo se dé la interacción entre la máquina cimentación y de la cimentación con el suelo.

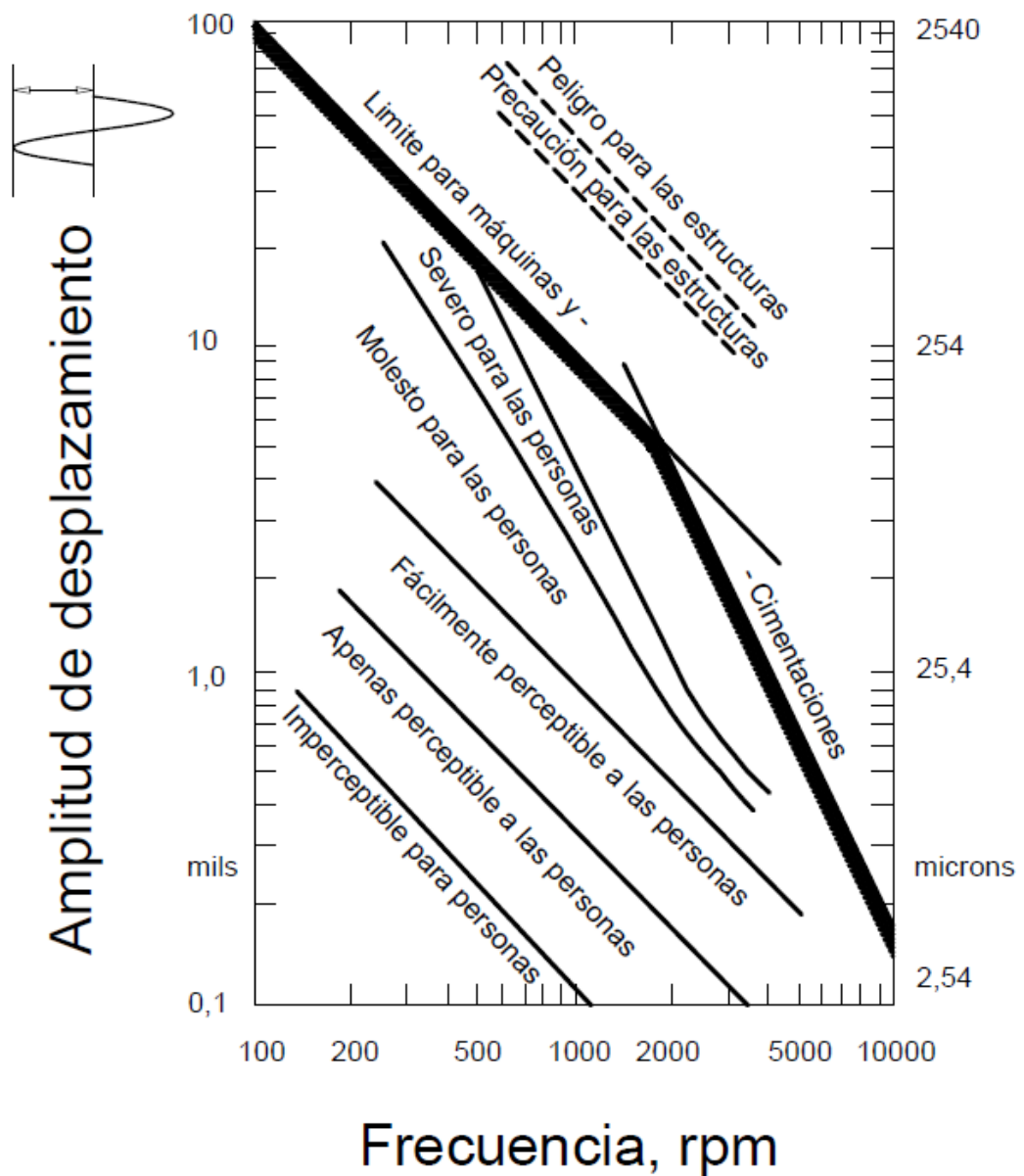
Entre los tipos de movimientos que se presentan en el terreno, los movimientos verticales de la superficie producidos por vibraciones verticales de la cimentación resultan ser los más importantes. En la práctica se utiliza un dispositivo elástico absorbente, cuya frecuencia propia sea netamente diferente de la de las vibraciones a controlar (como mínimo el 30% aproximadamente).



### 3.4 ESTADO LÍMITE DE SERVICIO POR VIBRACIÓN DE MAQUINARIA

El fabricante del equipo habitualmente define las condiciones en que el equipo opera, esto se traduce en los cálculos civiles a un control de la amplitud, límites de desplazamientos por las vibraciones causadas. Se recomienda el uso de los siguientes criterios:

1. Para máquinas alternantes o giratorias sobre cimentación tipo bloque, las amplitudes verticales máximas permisibles en el equipo se muestran en la figura 18. Se aprecian las curvas que limitan los niveles de percepción de vibraciones por los seres humanos, desde “no percibido por las personas” hasta “severo”.
2. Para maquinaria con velocidad de operación baja, alrededor de 500 rpm, la amplitud permisible está comprendida entre 0,20 mm a 0,25 mm.
3. La amplitud vertical permisible en la cimentación de martillos mecánicos sobre cimentación de bloque, cuando en los alrededores no se aceptan vibraciones excesivas, está comprendida entre 1.0 mm a 1,2 mm.



**Figura 18.** Límites de amplitud del desplazamiento en función de la frecuencia.

**Fuente:** (ACI Committee 351.3R04, 2004)

- Para máquinas giratorias de alta velocidad desplantadas sobre cimentaciones tipo pórtico. Barkan, D. D. en el texto Dynamic of Bases and Foundations, propuso las amplitudes permisibles que se encuentran en la tabla 2.

**Tabla 2.**

Amplitudes permisibles para equipos dinámicos.

<b>Velocidad de operación</b>	<b>Amplitudes Permisibles (mm)</b>	
3000 rpm	Vibración vertical	0,02 a 0,03
	Vibración horizontal	0,04 a 0,05
1500 rpm	Vibración vertical	0,04 a 0,06
	Vibración horizontal	0,07 a 0,09
< 750 rpm	Vibración vertical	0,08 a 0,12
<b>Velocidad de operación</b>	<b>Comportamiento de balanceo</b>	<b>Amplitudes Permisibles (mm)</b>
3000 rpm	Excelente	0,01
	Bueno	0,02
	Regular	0,03
1500 rpm	Excelente	0,02
	Bueno	0,025
	Regular	0,05

**Fuente:** (Srinivasulu & Vaidyanathan, 1976)

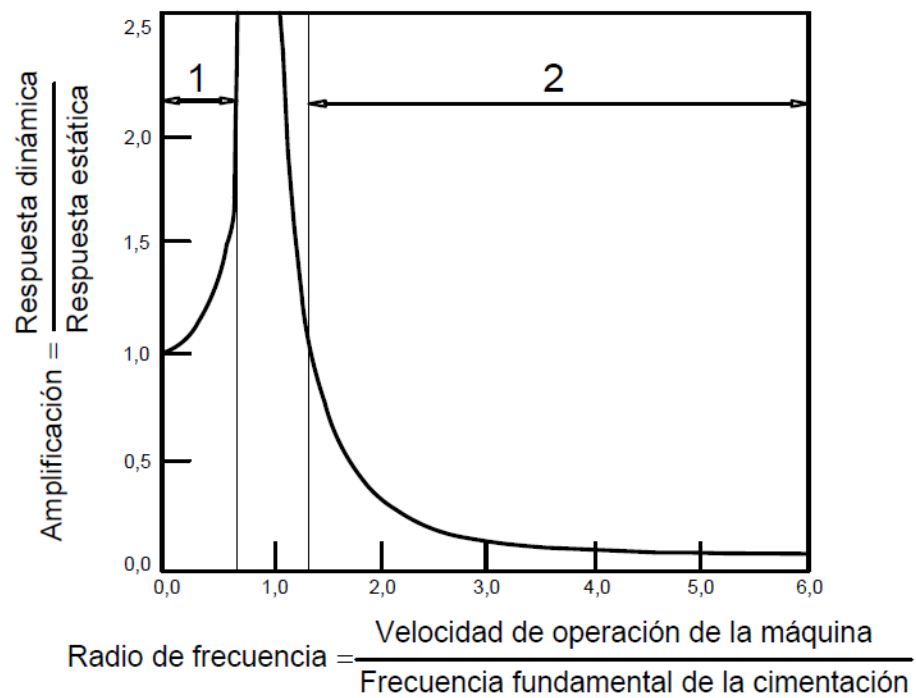
### 3.5 RESONANCIA

A medida que la frecuencia de funcionamiento o velocidad de la máquina se aproxima a la frecuencia natural de la fundación, se produce una ampliación de la respuesta estática. A esta ampliación se le conoce como resonancia, que se caracteriza por producir desplazamientos excesivos, que pueden dañar la máquina y/o causar molestias a los operadores, por lo que el objetivo del diseño de la cimentación es evitar que se presente.

Evitar la resonancia es uno de los factores críticos en cualquier diseño exitoso donde las vibraciones inducidas por la máquina están presentes, a menos que el sistema sea altamente amortiguado. En la mayoría de los diseños, resulta más práctico controlar la respuesta dinámica mediante la modificación de las frecuencias naturales de la cimentación, en lugar de intentar modificar la amortiguación característica de la máquina.

Para controlar estos límites de resonancia se define una zona de resonancia y la frecuencia natural del sistema debe encontrarse fuera de esta zona.

La fundación está altamente sintonizada cuando su frecuencia fundamental es mayor que la velocidad de funcionamiento del equipo o bajamente sintonizada cuando su frecuencia fundamental es menor que la velocidad de funcionamiento. Este concepto se ilustra en la figura 19:



**Figura 19.** Fundación altamente y bajamente sintonizada.

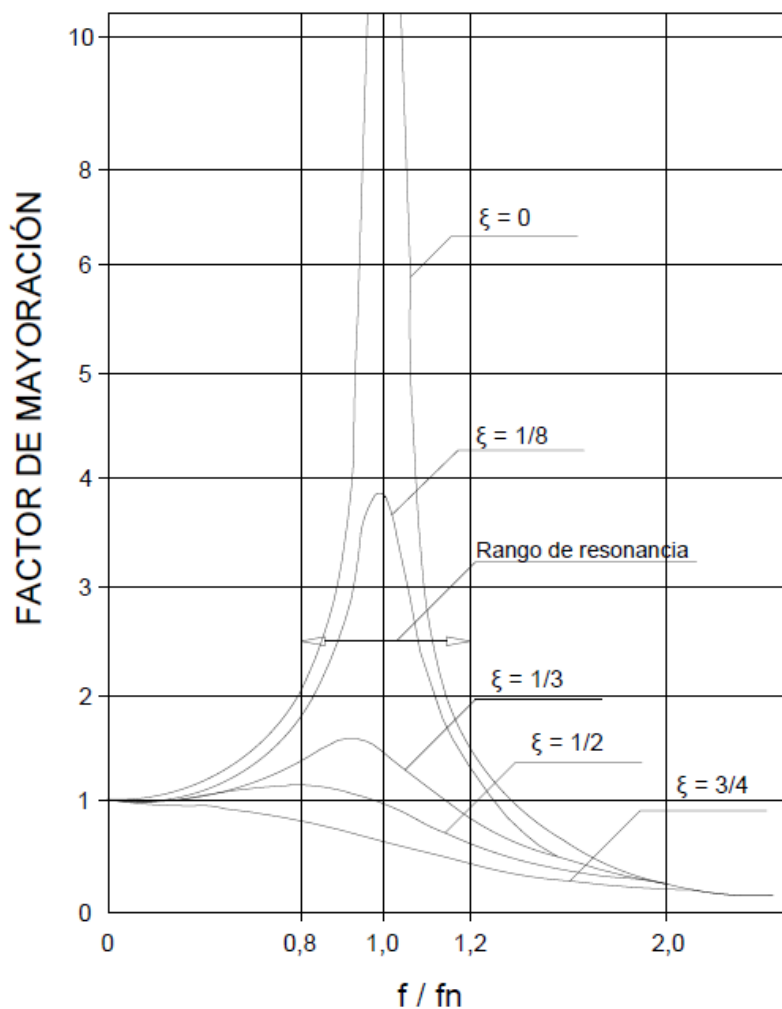
**Fuente:** (ACI Committee 351.3R04, 2004)

Donde:

1: Altamente sintonizada

2: Bajamente sintonizada

Si la frecuencia natural de la fundación es menor que la velocidad de la máquina, la resonancia puede producirse durante el equipo al encenderlo o al apagarlo. Se aconseja que las frecuencias naturales de la fundación estén fuera del rango de 0,8 a 1,2 veces la velocidad de la máquina, como se observa en la figura 20:



**Figura 20.** Presencia de resonancia.

**Fuente:** (P. Srinivasulu, 1990)

Donde:

$f$ : Frecuencia de excitación (Hz o rpm)

$f_n$ : Frecuencia natural (Hz o rpm)

Se deberá entonces calcular las frecuencias naturales del conjunto para los seis modos principales de vibrar, si alguna de estas coincide con alguna de las frecuencias de operación de la máquina entonces se deberá modificar el diseño para evitar dicho inconveniente.

### 3.6 PROPIEDADES DEL SUELO.

El estudio de suelos aparte de establecer cuál es la capacidad portante del suelo, adicionalmente determinara la presencia de nivel freático y otras características que pueda presentar el suelo, entre ellas las más importantes para el Ingeniero Calculista son:

- Suelo unidad de peso,  $\gamma$
- Relación de Poisson,  $\nu$
- Módulo de corte,  $G$

La densidad del suelo se utiliza para el cálculo de las constantes de amortiguación. El coeficiente de Poisson se utiliza para calcular tanto la rigidez del suelo y la amortiguación, los valores que se muestran en la tabla 3 generalmente son adecuados para los análisis dinámicos:

**Tabla 3.**

Módulo de Poisson recomendado según el tipo de suelo.

TIPO DE SUELO	RADIO DE POISSON ( $\nu$ )	
	RANGO	RECOMENDADO
Arenas y Gravas	0,25 - 0,40	0,33
Arcillas y Limos	0,35 - 0,50	0,45

**Fuente:** (P. Srinivasulu, 1990)

El módulo de corte ( $G$ ) es el parámetro de suelo más importante que influye en el comportamiento dinámico. Se utiliza para calcular la rigidez del suelo. Se puede determinar por los valores presuntivos, correlaciones con otras propiedades del suelo, o por mediciones de campo in situ.

Cuando sólo se conoce el tipo de suelo existen correlaciones para asumir un módulo de corte inicial, cuando se conoce otro dato del suelo, los valores presuntivos pueden justificarse o verificarse. Los valores del módulo de corte pueden obtenerse con el ensayo de penetración estándar. Sin embargo para el diseño de las grandes fundaciones, se recomienda el uso del cross-hole o pruebas de campo de fondo de pozo. Hallando así velocidades de las ondas en el suelo a diferentes profundidades.

El método consta de dos perforaciones a una distancia conocida. Un dispositivo sensor se coloca en un agujero de perforación y un dispositivo de producción de choque se coloca en la otra. La velocidad de la onda de corte se determina midiendo el tiempo que tarda la onda inducida a viajar entre perforaciones, la velocidad de onda cortante basada en mediciones de campo y módulo de corte, están relacionados como se indica:

$$G = \rho v_s^2 \quad (3.42)$$

Donde:

$G$  = Módulo de corte

$\rho$  = Densidad del suelo

$v_s$  = Velocidad de onda del suelo



### 3.7 ESFUERZOS EN EL SUELO

Los esfuerzos en el suelo se verifican utilizando la interacción suelo estructura. Mediante resortes verticales y horizontales aplicados a los elementos del modelo matemático. Para propósitos de diseño, la asunción de que la frecuencia es independiente de la rigidez es válido para frecuencias bajas. Entendiéndose una frecuencia baja “ $f$ ” menor que:

$$\left(\frac{1}{\pi r_0}\right) \left(\frac{G g}{\rho}\right)^{0,5} \quad (3.43)$$

Donde:

$r_0$  = Radio en fundación circular.

Movimiento de traslación en cimentaciones rectangulares:

$$\left(\frac{B L}{3 \pi}\right)^{0,5} \quad (3.44)$$

Movimiento de cabeceo en cimentaciones rectangulares:

$$\left(\frac{B L^3}{3 \pi}\right)^{0,25} \quad (3.45)$$

$G$  = Modulo de corte.

$\rho$  = Densidad del suelo.

$g$  = Constante gravitacional.

B, L = Dimensiones longitudinales de la cimentación rectangular, donde L es la dimensión perpendicular al eje de cabeceo

Las constantes de resortes para el modelo del semiespacio, son evaluadas bajo tales condiciones como las constantes elásticas estáticas del resorte. Expresiones de las constantes de resorte teóricas para el movimiento vertical, horizontal, balanceo y torsión se dan en la tabla 4. Pudiendo evaluar cimentaciones circulares, rectangulares apoyadas sobre la superficie o embebidas; presentando coeficientes para este último caso en la tabla 5.

**Tabla 4.**

Constantes equivalentes de resortes, para cimentaciones circulares o rectangulares

MODO DE VIBRACIÓN	CIMENTACIÓN CIRCULAR	CIMENTACIÓN RECTANGULAR
VERTICAL	$k_z = \frac{4 G r_o}{1 - \nu} \eta_z$	$k_z = \frac{G}{1 - \nu} \beta_z \sqrt{B L} \eta_z$
HORIZONTAL	$k_x = \frac{32(1 - \nu) G r_o}{7 - 8\nu} \eta_x$	$k_x = 2 (1 + \nu) G \beta_x \sqrt{B L} \eta_x$
CABECEO	$k_\psi = \frac{8 G (r_o)^3}{3(1 - \nu)} \eta_\psi$	$k_\psi = \frac{G}{1 - \nu} \beta_\psi B L^2 \eta_\psi$
TORSIONAL	$k_\theta = \frac{16 G (r_o)^3}{3}$	No existe solución, usar $r_o$ de la tabla 5

**Fuente:** (Suresh, Mchael, & George, 1979)

**Tabla 5.**

Coeficientes para cimentaciones embebidas

MODO DE VIBRACIÓN	$r_o$ PARA CIMENTACIÓN RECTANGULAR	COEFICIENTE
VERTICAL	$\sqrt{\frac{B L}{\pi}}$	$\eta_z = 1 + 0,6(1 - \nu) \left(\frac{h}{r_o}\right)$
HORIZONTAL	$\sqrt{\frac{B L}{\pi}}$	$\eta_x = 1 + 0,55(2 - \nu) \left(\frac{h}{r_o}\right)$
CABECEO	$\sqrt[4]{\frac{B L^3}{3 \pi}}$	$\eta_\psi = 1 + 1,2(1 - \nu) \left(\frac{h}{r_o}\right) + 0,2(2 - \nu) \left(\frac{h}{r_o}\right)^3$
TORSIONAL	$\sqrt[4]{\frac{B L (B^2 + L^2)}{6 \pi}}$	Ninguno disponible

**Fuente:** (Suresh, Mchael, & George, 1979)

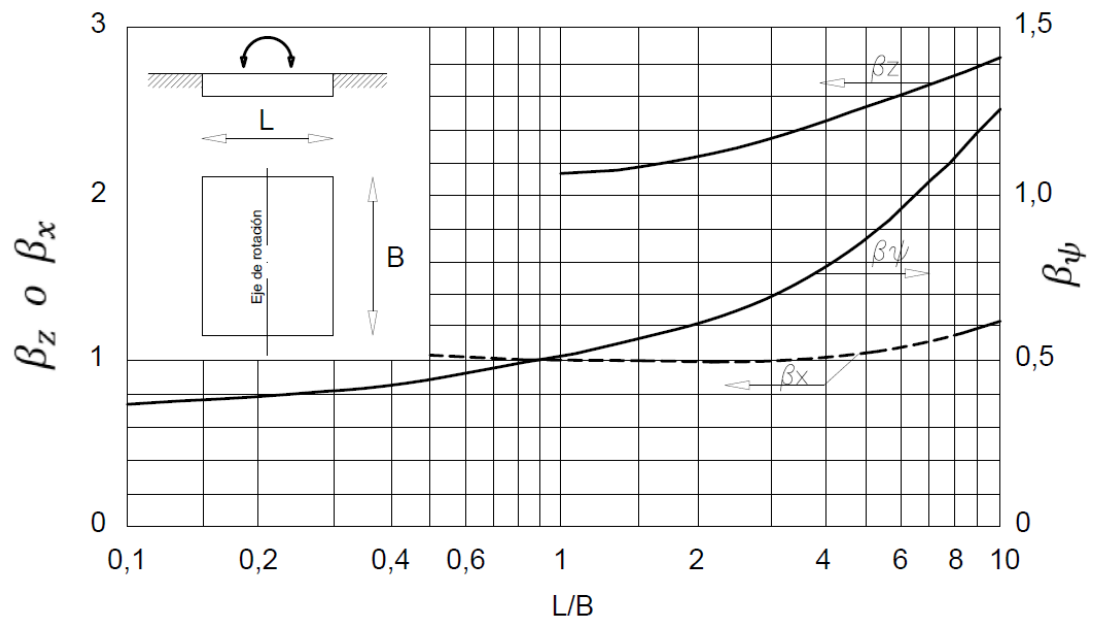
Donde:

h: Profundidad de empotramiento de la fundación.

L: Es la dimensión horizontal perpendicular al eje de cabeceo

B: Dimensión horizontal restante.

Tabla 6.

Formulación para la determinación de  $K_x = K_y$ 

Fuente: (Suresh, Michael, &amp; George, 1979)

### **3.8 CARGAS TRANSMITIDAS A LA CIMENTACIÓN**

La cimentación de los equipos dinámicos debe ser diseñada para soportar todas las fuerzas que a estas se le impongan durante el periodo de vida de la planta. Las cargas aplicadas pueden variar de máquina a máquina, sin embargo el tipo de cargas actuantes en la fundación pueden ser clasificadas como se muestra a continuación:

#### **3.8.1 CARGAS ESTÁTICAS**

Son aquellas que no variaran en el tiempo, entre las cuales se encuentran:

##### **3.8.1.2 CARGA MUERTA**

- El peso de la cimentación
- El peso de la maquinaria
- El peso de las tuberías y/o racks
- Contenedores propios del equipo
- Protección contra incendios.

##### **3.8.1.2 CARGAS VIVAS**

Son las cargas que produce el equipo de mantenimiento, se distribuye uniformemente sobre el área de la cimentación. Valores que se encuentran en los códigos o normativa aplicada por su ubicación.

### **3.8.1.3 CARGAS TÉRMICAS**

Cuando la máquina está en funcionamiento causa cambios de temperatura que a su vez provoca expansiones y contracciones, estos movimientos se transmiten a los apoyos que generan esfuerzos adicionales a la cimentación.

### **3.8.4 CARGAS DINÁMICAS**

Las fuerzas dinámicas por lo general las da el fabricante del equipo, son producto de la operación de la máquina y representan los valores del desbalanceo de fuerzas internas en la máquina.

Estas cargas dinámicas son dependientes del funcionamiento de la máquina, pudiendo ser máquinas centrífugas o reciprocantes.

## **MÁQUINAS CENTRÍFUGAS**

A este grupo pertenecen: turbinas, compresores axiales, bombas centrífugas, turbogeneradores y ventiladores. Equipos que operan a velocidades constantes por largos períodos de tiempo.

Estos elementos pueden incluir un eje de rotación que no pasa por el centro de gravedad de los componentes móviles o un eje de rotación que no pasa por el eje principal de inercia del equipo, estos ejes rotacionales originan pares longitudinales, deflexiones en el rotor, desalineamiento durante la instalación y desgaste de las partes móviles.

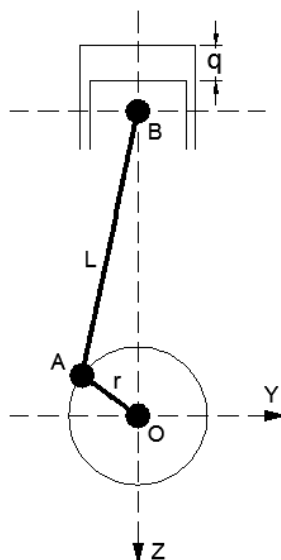
## MÁQUINAS RECIPROCANTES

Las fuerzas reciprocantes son producto de un mecanismo manivela-pistón, mismo que está presente en máquinas reciprocantes como compresores o bombas de pistón. El mecanismo de manivela transforma un movimiento reciprocante en un movimiento rotatorio y viceversa. El fabricante del equipo, una vez que ha determinado el peso y el centro de gravedad de cada una de las partes móviles procede a evaluar las fuerzas dinámicas resultantes.

En la figura 3.6 se muestra un mecanismo básico de manivela. Las partes que lo componen son:

- Un pistón que se mueve verticalmente dentro de un cilindro que sirve de guía.
- Una manivela de longitud “ $r$ ” que gira alrededor de eje “O”
- Una varilla de longitud  $L$ , unida al pistón en el punto B y a la manivela en el punto A.

Mientras el punto B se mueve longitudinalmente, el punto A por consecuencia se mueve circularmente a una velocidad  $w$ , como resultado de este movimiento los puntos intermedios tendrán un movimiento elíptico.



**Figura 21.** Mecanismo de manivela.

**Fuente:** (Suresh, Michael, & George, 1979)

Si se conoce la velocidad angular  $\omega$  de la manivela, se puede determinar el desplazamiento del pistón en cualquier instante de tiempo "t". Con las ecuaciones siguientes:

$$q = \left[ r + \frac{r^2}{4L} \right] + r \left[ \cos(\omega t) + \frac{r}{4L} \cos(2\omega t) \right] \quad (3.43)$$

$$\dot{q} = r \omega \left[ \sin(\omega t) + \frac{r}{2L} \sin(2\omega t) \right] \quad (3.44)$$

$$\ddot{q} = r \omega^2 \left[ \cos(\omega t) + \frac{r}{L} \cos(2\omega t) \right] \quad (3.45)$$

Donde:

$q$  = Desplazamiento del pistón.

$r$  = Longitud de la manivela.

$L$  = Longitud de varilla.

$\omega$  = Frecuencia circular de operación de la máquina.



### 3.9 ESTABILIDAD AL VOLCAMIENTO Y DESLIZAMIENTO

El factor de seguridad (FS) es definido como la relación suficiente para provocar un momento resistente y contrarrestar el momento de volcamiento.

El peso de suelo ejercido sobre la cimentación deberá ser considerado como parte del momento resistente a volcamiento. Cuando el nivel de cimentación se encuentre debajo del nivel de aguas freáticas, el peso unitario saturado que se encuentra sobre la cimentación deberá ser usado en lugar del peso unitario total. Donde existe flotación, se deberá usar un factor mínimo de seguridad de 1.1.

Las cimentaciones sujetas a momentos de volcamiento, corte y/o fuerzas de tracción, deben ser diseñadas de tal manera que para cualquier condición de carga, el factor de seguridad (FS), basado en cargas de servicio, para zapatas aisladas deberá ser:

- Condición de Izaje 1.50.
- Condición de ensayo o prueba 1.50.
- Condición operativa 1.70.
- Zapatas Octogonales 1.80.

El factor de seguridad basado en cargas de servicio, para edificaciones, estructuras para procesos, y otras estructuras aporricadas, deberá ser determinado de la siguiente manera, y no podrá ser menor o igual a 1.50:

$$FS = \text{Momento Resistente} / \text{Momento de volcamiento}$$

Donde el momento resistente es el momento ocasionado a la carga muerta de la cimentación y la estructura (Incluyendo la flotación).

El momento de volcamiento es aquel ocasionado por fuerzas y momentos laterales que brindan inestabilidad a la estructura. Los momentos, tanto resistente como de volcamiento, deberán ser calculados alrededor del eje más crítico de rotación del bloque de cimentación y la superficie de contacto con el suelo. Puede existir más de un eje de rotación.

Para todas las condiciones de servicio, la resistencia al deslizamiento de las cimentaciones, especialmente de muros de contención, no deberá ser menor que 1.50 veces las cargas laterales aplicadas, cuando solo se considera la sumatoria de fuerzas horizontales y verticales. Esto se incrementa a 3.00 cuando se considera la presión pasiva del suelo y la resistencia a la fricción (sumatoria de fuerzas horizontales) en combinación. La resistencia al deslizamiento deberá ser controlada por la fricción entre la cimentación y la superficie de contacto.

El nivel de cimentación de todas las zapatas se mantendrán a la misma altura siempre y cuando sea posible, con la debida consideración de las tuberías subterráneas o de la red de ductos subterráneos.

## **CAPÍTULO IV**

### **GUÍA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES PARA EQUIPOS DINÁMICOS**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Se exponen los pasos que son necesarios para el diseño de la cimentación que soportara el equipo, se debe tener en cuenta que el enfoque del diseño es conservador, para esto se asumen parámetros como factores de seguridad y límites de operación. Con el fin de disminuir grandes pérdidas de rendimiento o financieras relacionadas con el mal funcionamiento de maquinaria.

El presente capítulo está dividido en el análisis y el diseño, con el fin de determinar los procesos necesarios para conseguir el diseño de la fundación.

## 4.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 4.2.1 REQUERIMIENTOS DE LA MAQUINARIA

Como se puede entender los datos de la máquina son de suma importancia para el diseño óptimo de la cimentación, estos deben ser provistos por el fabricante, y se mencionan a continuación:

- La geometría que tenga la máquina.
- La disposición de los apoyos conocido también como “foot print”. El cual es un dibujo de la posición, tamaño de soportes y detalles de los pernos de anclaje de montaje.
- Velocidad de funcionamiento, o rango de velocidad.
- La frecuencia de operación de la máquina.
- Número y disposición de los pistones (máquinas reciprocantes).
- Masas de rotor e impulsor (máquinas centrifugas).
- Las temperaturas de operación.
- Dibujo detallado con las dimensiones de la fundación sugeridas, donde se suele incluir equipos auxiliares y los detalles de drenaje que sean necesarios.
- Magnitud, dirección y la posición de todas las cargas dinámicas con sus frecuencias asociadas:
  - Cargas externas (tuberías, sobretensiones, etc).
  - Fuerzas individuales pistón.
  - Fuerzas y pares desequilibradas.
  - Rotación de la masa de excentricidad (después de equilibrio).
- Momentos de inercia de masa alrededor de tres ejes.
- Condiciones de cortocircuito dinámicos (Hasta 10 veces la carga máxima de torque).

#### 4.2.2 PREDISEÑO DE LA CIMENTACIÓN

Como se mencionó en 2.6 existen varios tipos de cimentaciones, el fabricante suele recomendar que tipo deba ser la ideal, caso contrario el calculista lo determinara.

El diseño de una cimentación tipo bloque para una maquina centrifuga o reciprocante, empieza con en tamaño preliminar del bloque. Este pre dimensionamiento está basado en lineamientos empíricos y prácticos que han sido usados a lo largo del tiempo. Recomendaciones que se mencionan en el libro “Design of Structures & Foundations for Vibrating Machines”, de Suresh Arya, Michael O’Neil y George Pincus, y son enumeradas a continuación:

1. La parte inferior de la base de bloques debe estar por encima del nivel freático. No debe estar descansando en suelo previamente rellenado ni en un suelo especialmente sensible a la vibración.

Las recomendaciones del consultor geotécnico suelen incluir la profundidad de la cimentación. Si la calidad del suelo es pobre, se puede recomendar el uso de pilotes.

2. Los siguientes parámetros se aplican para fundaciones tipo bloque:

- a. De ser una máquina centrífuga, la masa del bloque rígido debe ser de dos a tres veces la masa de la máquina. Y cuando la máquina de movimiento alternativo o reciprocante, la masa de la cimentación debe ser de tres a cinco veces la masa de la máquina.

b. Se recomienda que la parte superior del bloque se mantenga 1 pie por encima de la elevación del suelo o pavimento terminado, con el fin de prevenir los daños causados por el escurrimiento de las aguas superficiales.

c. El espesor vertical del bloque no debe ser inferior a 2 pies, o según lo dictado por la longitud de los pernos de anclaje utilizados. El espesor vertical también puede regirse por las otras dimensiones del bloque con el fin de que la fundación se considere rígida. El espesor no debe ser menor que un quinto de la menor dimensión o  $0,6 + \frac{l_{max}}{30}$ , donde la dimensión mayor está en metros.

d. La base debe ser lo suficientemente ancha para aumentar la amortiguación en el modo de oscilación, el ancho debe ser de al menos 1 a 1,5 veces la distancia vertical desde la base hasta la línea central de la máquina.

e. Una vez que el espesor y el ancho se han seleccionado, la longitud se determina de acuerdo con el literal a, siempre que se cuente con un área suficiente disponible para soportar la máquina más 1 pie, como mínimo, desde el borde de la base de la máquina hasta el borde del bloque, con fin de propósitos de mantenimiento.

f. La longitud y ancho de la base se ajustan de manera que el centro de gravedad de la máquina y equipo se encuentre en un rango del 5% de cercanía con el centro de gravedad de la fundación. El centro de gravedad combinado debería coincidir con el centro de resistencia del suelo.

g. Para grandes máquinas de movimiento alternativo, puede ser deseable aumentar la restricción lateral y las relaciones de amortiguación para todos los modos de vibración. Para esto se aconseja aumentar la profundidad embebida de la cimentación en el suelo a un rango entre el 50% a 80% del espesor.

h. El análisis dinámico debe predecir resonancia con la frecuencia actuante, así la masa de la base se aumenta o disminuye de modo que, la estructura se encuentre altamente sintonizado o bajamente sintonizado, respectivamente.

3. Para fundaciones apoyadas sobre pilotes se recomienda:

a. De tratarse de una maquina centrifuga, la masa del cabezal del pilote debe ser de 1,5 a 2,5 veces la masa de la máquina. Si se trata de una maquina reciprocante, la masa del cabezal debe ser de 2,5 a 4 veces la masa de la máquina.

b. El espesor, anchura y longitud del bloque se selecciona como se menciona desde 2 (b) hasta 2 (f)

c. El número y tamaño de los pilotes se seleccionara de tal manera que ningún elemento soporte más allá de la mitad de la carga de diseño permisible.

d. Los pilotes estarán dispuestos de modo que el centroide del grupo, coincida con el centro de gravedad combinado de la estructura y de la máquina.

e. Si se predice que ocurrirán efectos de resonancia, es necesario realizar modificaciones como se describe en 2 (h).

h. Los pilotes deben estar anclados adecuadamente a la losa, para una mejora de la rigidez y para cumplir con las condiciones de diseño asumidos durante la fase de análisis.

#### **4.2.4 CARGAS DE DISEÑO**

Como se mencionó en 3.8 las cargas que son aplicadas a la cimentación son divididas en cargas estáticas y dinámicas, para proceder a diseñar, las cargas son consideradas de la siguiente forma:

- Cargas permanentes (CP)
- Cargas vivas (CV)
- Cargas de viento (W)
- Fuerzas sísmicas (EQ)
- Fuerza producida por el compresor (SAgp)
- Fuerza producida por la turbina (SApt)
- Fuerza producida por el generador (SAgen)

#### **4.2.5 COMBINACIONES DE CARGA**



Las siguientes combinaciones no deben ser tomadas como únicas, es responsabilidad del diseñador analizar si deben ser tomadas en cuenta otros posibles escenarios. De acuerdo a normativa de cada país se determinaran los factores de mayoración para cada combinación, para el Ecuador las combinaciones que serán usadas serán:

### **CARGAS ÚLTIMAS**

1.  $1,2 CP + CV + SA_{gp} + SA_{pt} + SA_{gen} + E_y - E_z$  (4.1)
2.  $1,2 CP + CV + SA_{gp} + SA_{pt} + SA_{gen} - E_y - E_z$  (4.2)
3.  $1,2 CP + CV - SA_{gp} - SA_{pt} - SA_{gen} + E_y - E_z$  (4.3)
4.  $1,2 CP + CV - SA_{gp} - SA_{pt} - SA_{gen} - E_y - E_z$  (4.4)
5.  $1,2 CP + CV + SA_{gp} + SA_{pt} + SA_{gen} + W_y$  (4.5)
6.  $1,2 CP + CV + SA_{gp} + SA_{pt} + SA_{gen} - W_y$  (4.6)
7.  $1,2 CP + CV - SA_{gp} - SA_{pt} - SA_{gen} + W_y$  (4.7)
8.  $1,2 CP + CV - SA_{gp} - SA_{pt} - SA_{gen} - W_y$  (4.8)
9.  $0,9 CP + E_y + 0,3 E_z$  (4.9)
10.  $0,9 CP - E_y + 0,3 E_z$  (4.10)
11.  $0,9 CP + W_y$  (4.11)
12.  $0,9 CP - W_y$  (4.12)

#### **4.2.6 MODELAMIENTO DE EQUIPOS, SUELO Y CIMENTACIÓN.**

Para modelar es esencial que la configuración del modelo estructural incluya todos los elementos estructurales principales que conforman la cimentación, para esto se aconseja discretizar o sub dividir al bloque macizo en elementos finitos, para poder encontrar con mayor exactitud los resultados en cada punto de apoyo.

Como se mencionó en 3.7 se deberá calcular el módulo de balasto, bien sea por principios teóricos, haciendo uso de las tablas 4, 5 y 6, o por la obtención del dato por medio de un estudio de suelos.

### **4.3 DISEÑO ESTRUCTURAL**

#### **4.3.1 INTRODUCCIÓN**

El diseño estructural es la compilación de las formulas y chequeos que se deben hacer para lograr una cimentación eficiente, que soporte y transmita adecuadamente todas las cargas que a esta se le imponen hacia el suelo.

#### **4.3.2 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA EN PLANTA DE LA CIMENTACIÓN**

La geometría de la cimentación debe abarcar todos los apoyos, más un área recomendable de circulación y limitada al espacio que se tenga. Se recomienda dejar 1 pie (300 mm) de distancia desde el contorno del equipo hasta el filo de la fundación.

### 4.3.3 DISEÑO A FLEXIÓN

Se chequeara que los diagramas de momentos en los distintos estados de carga no se inviertan, caso contrario se compensara con armadura por sismo.

Para el diseño de la cuantía de acero el ACI, nos da:

$$\rho = \frac{0,85 * f'c}{Fy} * \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 Mu}{\phi 0,85 b d^2 f'c}} \right] \quad (4.13)$$

$$As_{cal} = \rho b d \quad (4.14)$$

No puede ser menor a:

$$As_{min} = \rho_{min} b d \quad (4.15)$$

Y se debe chequear efectos de contracción por temperatura, por ende:

$$As_{temp} = 0,0018 b h \quad (4.16)$$

### 4.3.4 DISEÑO A CORTE

Se asegurara de que las secciones no fallen por corte o punzonamiento, en secciones críticas, para lo cual se debe cumplir:

$$\phi Vc > Vu \quad (4.17)$$

$$Vc = 0,53 \sqrt{f'c * b * d} \quad (4.18)$$

## 4.4 DETALLE DE ARMADO

Se adjuntaran los planos de la estructura (cimentación), con un alto grado de detalle, asegurando que el armado cumpla longitudes de desarrollo y demás requerimientos que exige el ACI.

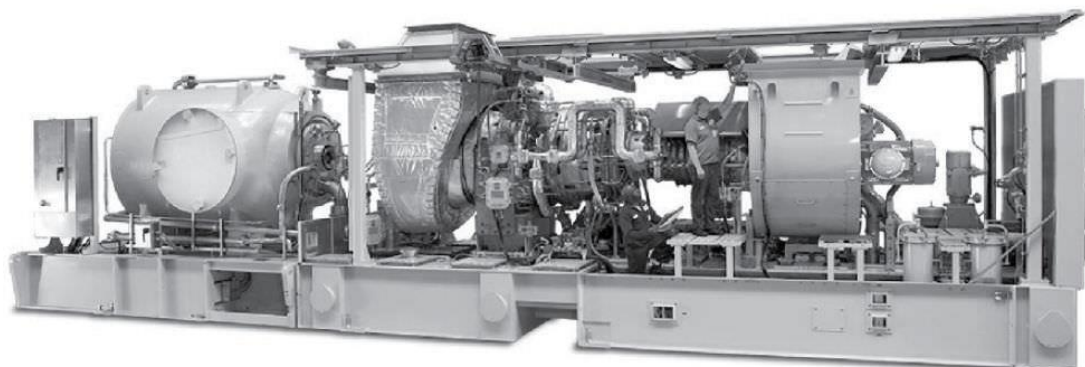
## .CAPÍTULO V

### DISEÑO DE UNA CIMENTACION PARA EL TURBO GENERADOR MARCA SOLAR

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se empleara la metodología descrita en el Capítulo IV para el diseño de una cimentación de un turbo grupo, he estimado que el proyecto será construido en la ciudad de Esmeraldas, debido a la producción de crudo y al aprovechamiento de gas asociado que se obtiene del proceso de refinación de dicho crudo. Y también debido a la explotación del gas natural.

En la figura 20, se presenta el turbo grupo, del fabricante Solar S.A, modelo Titán 250, con un peso total de 1313.13 KN y una potencia de 22 370 kW.



**Figura 22.** Turbogrupos Titan 250, Solar Turbines

**Fuente:** <http://www.directindustry.com/prod/solar-turbines/product-22650-1363575.html>

## **5.2 CRITERIOS DE DISEÑO**

### **5.2.1 CÓDIGOS Y ESTÁNDARES**

Los códigos que serán empleados son:

- ACI 318-05: Requisitos de reglamento para concreto estructural.
- ACI 351-3R-04: Fundaciones para equipos dinámicos.
- NEC\_SE\_CG: Norma Ecuatoriana de la construcción. Cargas no sísmicas.
- NEC\_SE\_CM: Norma Ecuatoriana de la construcción. Geotécnia y Cimentaciones.
- NEC\_SE\_HM: Norma Ecuatoriana de la construcción. Hormigón armado.

### **5.2.2 DOCUMENTOS DE REFERENCIA**

Los documentos de los cuales se toman referencia son:

- Información del turbo grupo Titan 250: DWG. 3T571-149956

### **5.2.3 MATERIALES**

Los materiales que se usaran son:

- Hormigón  $f'c$ : 30 MPa, Para fundaciones.
- Hormigón  $f'c$ : 15 MPa, Para replantillo.
- Acero de refuerzo: 420 MPa.

### 5.3 CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR

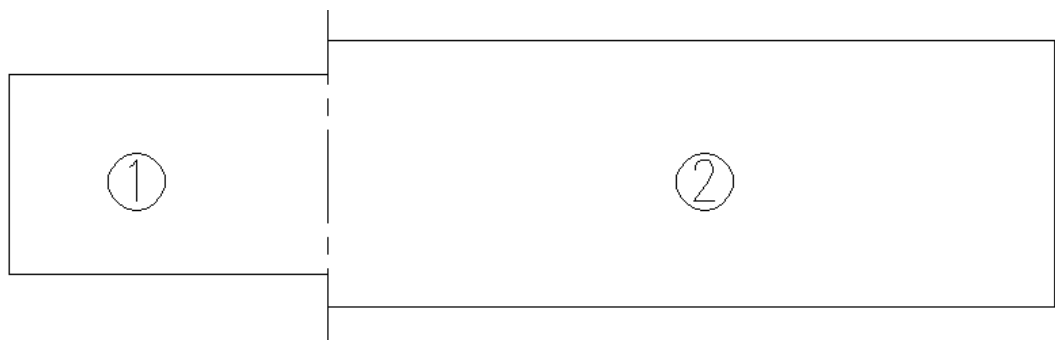
#### 5.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo presenta las condiciones:

- Capacidad admisible ( $Q_{adm}$ ) : 20 t/m<sup>2</sup> (Para cargas estáticas)
- Capacidad admisible ( $Q_{adm}$ ) : 30 t/m<sup>2</sup> (Para cargas estáticas más dinámicas)
- Coeficiente de balasto ( $K_s$ ) : 15000 t/m<sup>3</sup> (Para una placa de 0,3mX0,3m)
- Coeficiente de balasto ( $K_s'$ ) : 45000 t/m<sup>3</sup> (Para una placa de 0,3mX0,3m, caso sísmico)
- Perfil del suelo: Grava densa,  $G = 241317 \text{ kN/m}^2$

#### 5.3.1 RESORTE VERTICAL Y HORIZONTAL

El resorte vertical corresponde al coeficiente de balasto, calculado según 3.7, el valor de la constante de resorte vertical que se aplica en el modelo se lo determina mediante el uso de las tablas 4, 5 y 6, en la figura 23, se muestra la división de las áreas para el cálculo:



**Figura 23.** División de áreas para el cálculo del coeficiente de balasto

Obteniendo para la sección inicial:

Resorte vertical Kz1		
L	3,70 m	L/B= 0,63
B	5,9 m	ro= 2,64
h	1,2 m	$\beta_z = 2,10$
		nz= 1,16

Usando  $\nu = 0,40$  y  $G = 241317 \text{ kN/m}^2$ , ya que corresponde a grava densa.

Resorte vertical  $K_{z1} = 4592942 \text{ kN/m}$ .

Resorte vertical  $K_{BL} = 210395,9 \text{ kN/m}^3$ .

Para la segunda sección se obtiene:

Resorte vertical Kz2		
L	4,90 m	L/B= 0,36
B	13,5 m	ro= 4,59
h	1,2 m	$\beta_z = 2,10$
		nz= 1,09

Resorte vertical  $K_{z2} = 7516134,9 \text{ kN/m}$ .

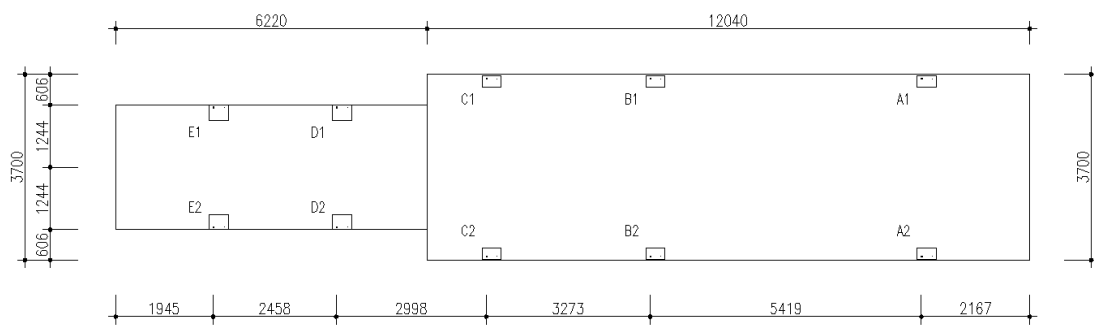
Resorte vertical  $K_{BL} = 113622,6 \text{ kN/m}^3$ .

De estos dos valores se toma el promedio, obteniendo:

$$K_{BL} = 162009,20 \text{ kN/m}^3.$$

## 5.4 DIMENSIONES DEL EQUIPO

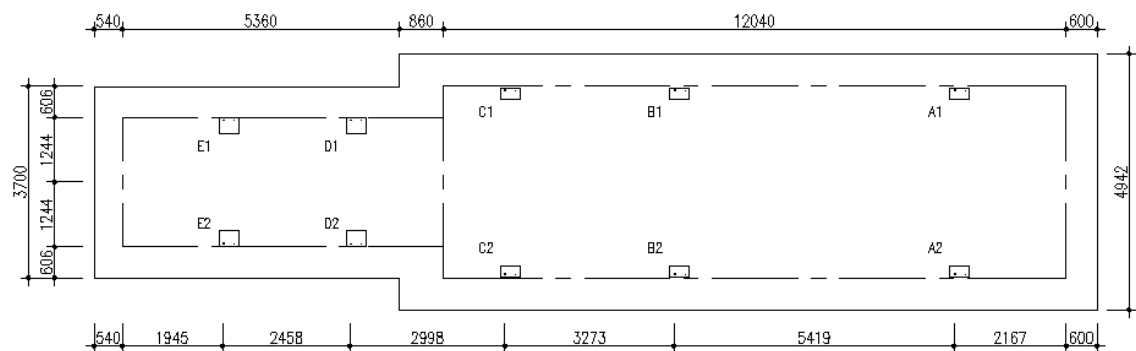
Las dimensiones que presenta el equipo fueron provistas por Solar, dimensiones que muestran el contorno del cuerpo del turbo generador. Se muestra a continuación:



**Figura 24.** Skid del turbogruppo Solar

## 5.5 PREDISEÑO DE LA CIMENTACIÓN

Las dimensiones de la cimentación fueron tomadas siguiendo los lineamientos descritos en el Capítulo IV, y se esquematiza en la figura 25.



**Figura 25.** Dimensiones de la cimentación.



Para el prediseño de la cimentación se parte de la recomendación del fabricante de realizar la cimentación tipo bloque rígido, de esta manera se emplea el procedimiento mencionado en 4.2.2:

1. La parte inferior de la base de bloques debe estar por encima del nivel freático. No debe estar descansando en suelo previamente rellenado ni en un suelo especialmente sensible a la vibración.

A nivel de desplante no se tiene presencia de nivel freático (CUMPLE)

2a. De ser una máquina centrífuga, la masa del bloque rígido debe ser de dos a tres veces la masa de la máquina.

Peso del equipo: 1313,13 KN

Peso del bloque de la cimentación: 3167,28 KN

Relación de masas:

$$\frac{3167,28}{1313,13} = 2,412$$

(CUMPLE)

2b. Se recomienda que la parte superior del bloque se mantenga 1 pie por encima de la elevación del suelo o pavimento terminado, con el fin de prevenir los daños causados por el escurrimiento de las aguas superficiales.

Se propone una elevación de 310 mm (1,017 pies) (CUMPLE)

2c. El espesor vertical del bloque no debe ser inferior a:

- 2 pies = 609,6 mm
- $\frac{1}{5} l_{min} = \frac{4942}{5} = 988,4 \text{ mm}$
- $0,6 + \frac{l_{max}}{30} = 0,6 + \frac{19,4}{30} = 1,25 \text{ m}$

Espesor propuesto: 1500 mm (CUMPLE)

2d. La base debe ser de al menos 1 a 1,5 veces la distancia vertical desde la base hasta la línea central de la máquina.

Distancia vertical: (1,5 m + 2,187m) = 3,69 m

B = 3,70 m

Relación B / Distancia Vertical = 1,00 (CUMPLE)

2e. La longitud se determina de acuerdo con el literal a, siempre que se cuente con un área suficiente disponible para soportar la máquina más 1 pie, como mínimo, desde el borde de la base de la máquina hasta el borde del bloque, con fin de propósitos de mantenimiento.

Se extiende 2 pies (CUMPLE)

2f. Para que la longitud y ancho de la base se ajusten de manera que el centro de gravedad de la máquina y equipo se encuentre en un rango del 5%.

Se presenta la tabla 7, para hallar la excentricidad de la máquina y la tabla 8 para el cálculo de la excentricidad de la cimentación:

**Tabla 7**

Calculo de centro de gravedad del turbogruppo.

PAD	CARGA VERTICAL (KN)	Xi (mm)	Yi (mm)	Xi x CV	Yi x CV
A1	-119,661	16633	3628	-1990321,41	-434130,108
A2	-119,661	16633	72	-1990321,41	-8615,592
B1	-183,708	11215	3628	-2060285,22	-666492,624
B2	-183,708	11215	72	-2060285,22	-13226,976
C1	-91,633	7941	3628	-727657,653	-332444,524
C2	-91,633	7941	72	-727657,653	-6597,576
D1	-141,902	4943	3043	-701421,586	-431807,786
D2	-141,902	4943	657	-701421,586	-93229,614
E1	-119,661	2485	3043	-297357,585	-364128,423
E2	-119,661	2485	657	-297357,585	-78617,277
CIM 1	-785,88	2950	1850	-2318346	-1453878
CIM 2	-2381,4	12650	1850	-30124710	-4405590
	<b>-4480,41</b>			<b>-43997142,9</b>	<b>-8288758,5</b>

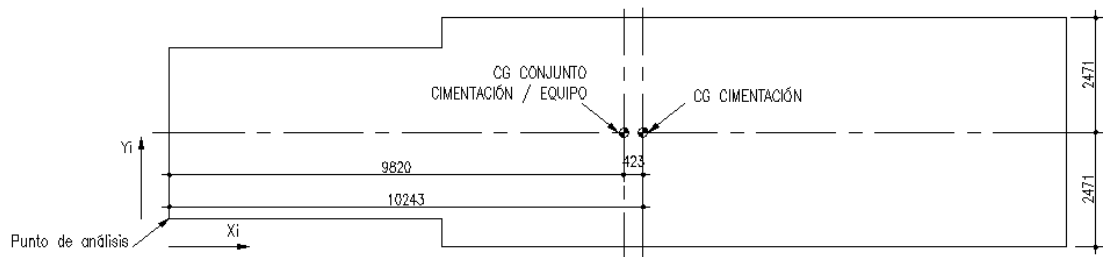
$\bar{X}$ (m)	9,81989213
$\bar{Y}$ (m)	1,85

**Tabla 8**

Calculo de centro de gravedad de la cimentación.

L	B	Área	Xi	Yi	A x Xi	A x Yi
5,9	3,7	21,83	2,95	1,85	64,3985	40,3855
13,5	4,9	66,15	12,65	1,85	836,7975	122,3775
		<b>87,98</b>			<b>901,196</b>	<b>162,763</b>

$\bar{X}$ (m)	10,24
$\bar{Y}$ (m)	1,85



**Figura 26.** Esquema general de centros de gravedad de máquina y cimentación.

Excentricidad en x =  $10,24 - 9,82 = 0,42$

Excentricidad en y =  $1,8 - 1,85 = 0$

Calculo del porcentaje de excentricidad:

Sentido X:  $0,42 \times \frac{100}{19,4} = 2,16 \% < 5\%$  (CUMPLE)

Sentido Y:  $0,0 \times \frac{100}{3,70} = 0,0 \% < 5\%$  (CUMPLE)

## 5.6 ANALISIS DE CARGAS

Las cargas de diseño fueron suministradas por el proveedor, como se indicó en 4.2.4, las cargas son divididas en:

- Cargas permanentes (CP)

Peso total del hormigón armado: 3167,28 KN, determinado en el modelo.

El peso de equipos se muestra en la tabla 9, información que muestra las cargas estáticas debidas al peso de los equipos e instrumentación sobre cada PAD.

**Tabla 9**

Carga estática debido al peso de los equipos.

PAD	CARGA ESTÁTICA (KG)
A1, B1	119,66
B1, B2	183,71
C1, C2	91,63
D1, D2	141,905
E1, E2	119,66
<b>TOTAL</b>	<b>1313,13</b>

- Cargas vivas (CV)

Para la carga viva, se tomó como base la Norma NEC\_SE\_CG, donde indica que para un uso industrial se puede adoptar un valor de 6 KN/m<sup>2</sup>.

**Tabla 10.**

Carga viva tomada de la Norma NEC\_SE\_CG

Ocupación o Uso	Carga uniforme (kN/m <sup>2</sup> )	Carga concentrada (kN)
<b>Fábricas/Industria/Manufactura</b>		
Livianas	6.00	9.0
Pesadas	12.00	13.40

**Fuente:** (NEC. Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015)

- Cargas de viento (W)

La carga por viento fue suministrada por el fabricante y se muestra en la tabla 11.

**Tabla 11**

Carga producida por el viento.

PAD	CARGA HORIZONTAL (KN)	CARGA VERTICAL (KN)
A1	28,1	43,1
A2	28,1	43,1
B1	23,3	34
B2	23,3	34
C1	18,4	33,2
C2	18,4	33,2
D1	17	49
D2	17	49
E1	15,6	41,4
E2	15,6	41,4

- Fuerzas sísmicas (EQ)

Las fuerzas sísmicas se presentan en la tabla 12, Las cuales fueron analizadas y suministradas por el fabricante, con el fin del diseño de la cimentación, el presente capítulo no profundiza el análisis sísmico debido a que se enfoca en el diseño de la cimentación para un funcionamiento óptimo y que no se presente resonancia en el sistema.

**Tabla 12**

Carga debido a acciones sísmicas.

<b>PAD</b>	<b>CARGA HORIZONTAL (KN)</b>	<b>CARGA VERTICAL (KN)</b>
<b>A1</b>	59,8	61,2
<b>A2</b>	59,8	61,2
<b>B1</b>	91,9	94
<b>B2</b>	91,9	94
<b>C1</b>	45,8	46,9
<b>C2</b>	45,8	46,9
<b>D1</b>	70,9	108,2
<b>D2</b>	70,9	108,2
<b>E1</b>	59,8	91,2
<b>E2</b>	59,8	91,2

- Sobrecargas accidentales de operación (SA):

El proveedor especifica las cargas dinámicas cuando ocurre un corto circuito, los cuales son críticos. Solicitaciones pertenecientes al compresor (SA<sub>gp</sub>), la turbina (SA<sub>pt</sub>) y por el generador (SA<sub>gen</sub>) son presentados en la tabla 13.

Tabla 13

Cargas dinámicas producidas por componentes dinámicos, (cargas en KN).

DESCRIPCION ROTOR	VELOCIDAD ROTACIONAL (RPM)	FUERZA DINAMICA EN EL CL DEL ROTOR	CARGA DINAMICA PAD A	CARGA DINAMICA PAD B1, B2 (C/U)	CARGA DINAMICA PAD C1, C2 (C/U)	CARGA DINAMICA PAD D1, D2 (C/U)	CARGA DINAMICA PAD E1, E2 (C/U)
T250 GAS PRODUCER	10500	6,29	1,83	1,31	0	0	0
		16,2	4,72	3,39	0	0	0
T250 POWER TURBINE	7000	7,94	0,08	3,89	0	0	0
		14,2	0,14	6,94	0	0	0
GENERATOR	1500	55,9	0	0	0	14,8	13,1
		64	0	0	0	26,1	23,1
CARGA TOTAL	-	<b>70,13</b>	<b>1,91</b>	<b>5,2</b>	<b>0</b>	<b>14,8</b>	<b>13,1</b>
		<b>94,4</b>	<b>4,86</b>	<b>10,33</b>	<b>0</b>	<b>26,1</b>	<b>23,1</b>

Fuente: (Turbines)



## 5.7 VIBRACIONES TRANSMITIDAS A LA CIMENTACIÓN

Como se trató en el Capítulo III, los equipos centrífugos generan una fuerza de vibración senoidal, y ya que la frecuencia de las fuerzas dinámicas en los soportes corresponde a las RPM de cada rotor produciendo cargas, se definen las siguientes funciones para el análisis de vibraciones.

- **T250 PRODUCTOR DE GAS**

Velocidad del rotor: 10500 rpm

Frecuencia= 175 HZ

Frecuencia angular= 1099,6 rad/seg

La tabla 14 muestra la frecuencia producida por el compresor.

**Tabla 14**

Frecuencia producida por el compresor.

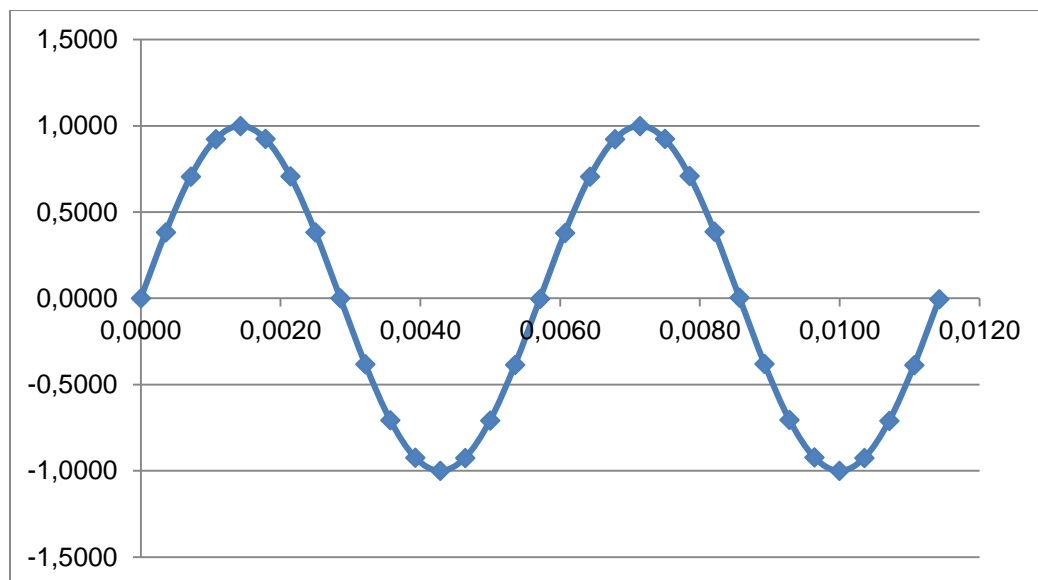
T	F
0,0000	0,0000
0,0004	0,3825
0,0007	0,7069
0,0011	0,9237
0,0014	1,0000
0,0018	0,9242
0,0021	0,7078
0,0025	0,3837
0,0029	0,0013
0,0032	-0,3814
0,0036	-0,7060
0,0039	-0,9232
0,0043	-1,0000
0,0046	-0,9247
0,0050	-0,7087
0,0054	-0,3849
0,0057	-0,0025

Continua



0,0061	0,3802
0,0064	0,7051
0,0068	0,9227
0,0071	1,0000
0,0075	0,9251
0,0079	0,7095
0,0082	0,3860
0,0086	0,0038
0,0089	-0,3791
0,0093	-0,7042
0,0096	-0,9222
0,0100	-1,0000
0,0104	-0,9256
0,0107	-0,7104
0,0111	-0,3872
0,0114	-0,0050

La figura 27 muestra la función para carga dinámica SAgp, que se asignará al modelo.



**Figura 27.** Función por carga dinámica (SAgp)

- **T250 TURBINA**

Velocidad del rotor: 7000 rpm

Frecuencia= 117 HZ

Frecuencia angular= 733,0 rad/seg

La tabla 15 muestra la frecuencia producida por la turbina.

**Tabla 15**

Frecuencia producida por la turbina.

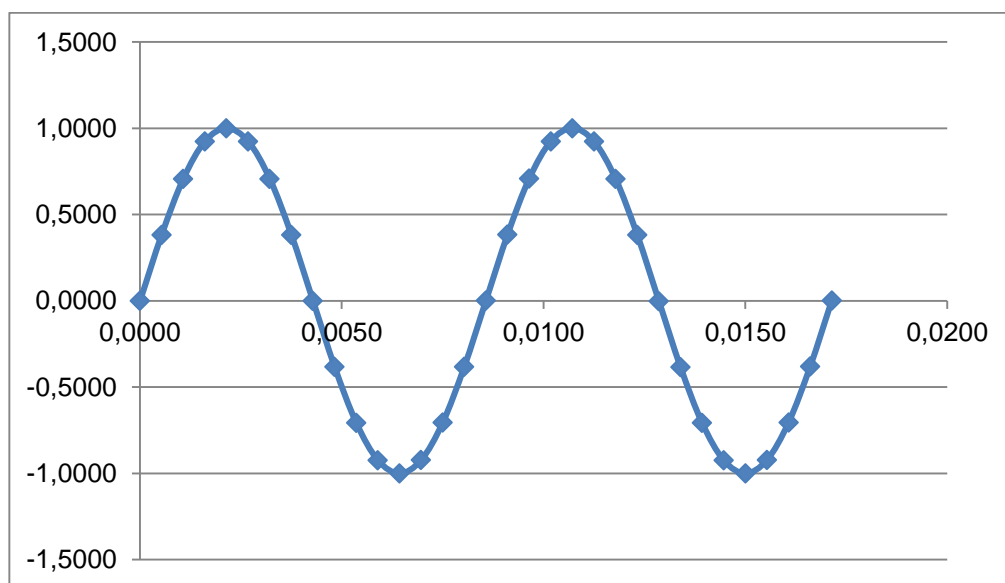
T	F
0,0000	0,0000
0,0005	0,3827
0,0011	0,7072
0,0016	0,9240
0,0021	1,0000
0,0027	0,9238
0,0032	0,7068
0,0038	0,3823
0,0043	-0,0005
0,0048	-0,3832
0,0054	-0,7076
0,0059	-0,9241
0,0064	-1,0000
0,0070	-0,9236
0,0075	-0,7065
0,0080	-0,3818
0,0086	0,0010
0,0091	0,3837
0,0096	0,7079
0,0102	0,9243
0,0107	1,0000
0,0113	0,9234
0,0118	0,7061
0,0123	0,3813
0,0129	-0,0015
0,0134	-0,3841
0,0139	-0,7083

Continua



0,0145	-0,9245
0,0150	-1,0000
0,0155	-0,9232
0,0161	-0,7058
0,0166	-0,3809
0,0171	0,0020

La figura 28 muestra la función para carga dinámica SAgp, que se asignará al modelo.



**Figura 28.** Función por carga dinámica (SAgp)

- **T250 GENERADOR**

Velocidad del rotor: 1500 rpm

Frecuencia= 25 HZ

Frecuencia angular= 157,1 rad/seg

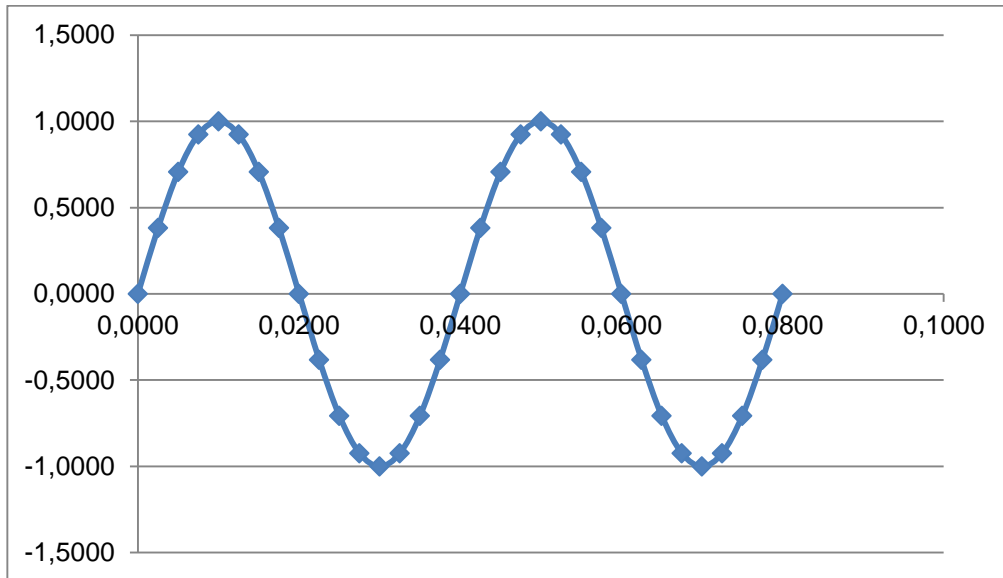
La tabla 16 muestra la frecuencia producida por el generador.

**Tabla 16**

Frecuencia producida por el generador.

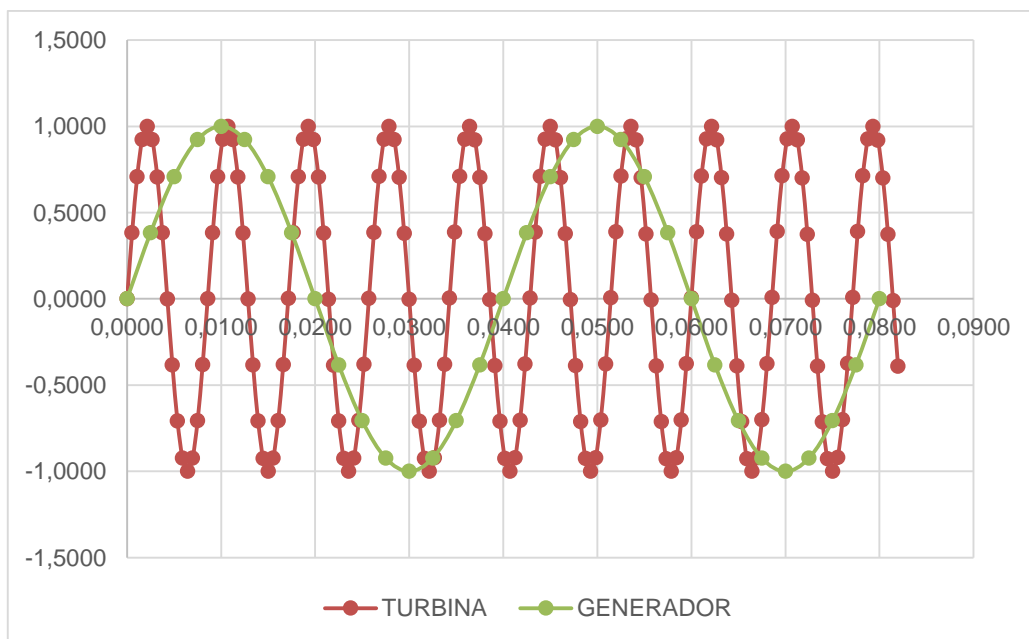
T	F
0,0000	0,0000
0,0025	0,3827
0,0050	0,7071
0,0075	0,9239
0,0100	1,0000
0,0125	0,9239
0,0150	0,7071
0,0175	0,3827
0,0200	0,0000
0,0225	-0,3827
0,0250	-0,7071
0,0275	-0,9239
0,0300	-1,0000
0,0325	-0,9239
0,0350	-0,7071
0,0375	-0,3827
0,0400	0,0000
0,0425	0,3827
0,0450	0,7071
0,0475	0,9239
0,0500	1,0000
0,0525	0,9239
0,0550	0,7071
0,0575	0,3827
0,0600	0,0000
0,0625	-0,3827
0,0650	-0,7071
0,0675	-0,9239
0,0700	-1,0000
0,0725	-0,9239
0,0750	-0,7071
0,0775	-0,3827
0,0800	0,0000

La figura 29 muestra la función para carga dinámica SAgén, que se asignará al modelo.



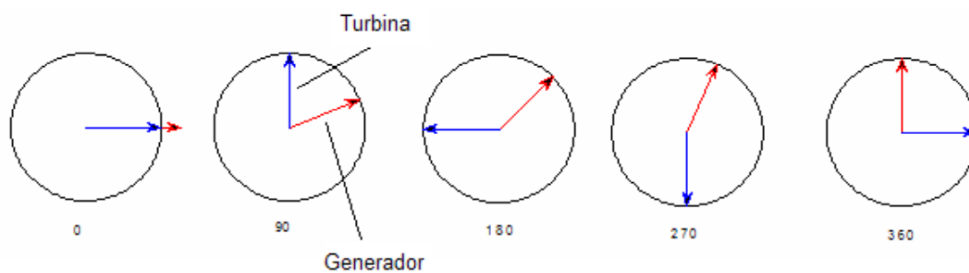
**Figura 29.** Función por carga dinámica (SAgén)

Se aprecia en la figura 30, que las excitaciones del generador y de la turbina no están en fase, razón por la cual se deben analizar las amplitudes de desplazamiento para distintas orientaciones de las cargas dinámicas.



**Figura 30.** Excitación debida al generador y turbina

Se muestran a continuación las orientaciones o disposiciones de la excitación recomendadas. En la figura 31, se representan las posiciones en las que el disco de la turbina y el del generador pueden encontrarse desfasados. En la tabla 17 se muestran los estados de carga que serán aplicados al modelo.



**Figura 31.** Disposiciones de desfase entre turbina y generador

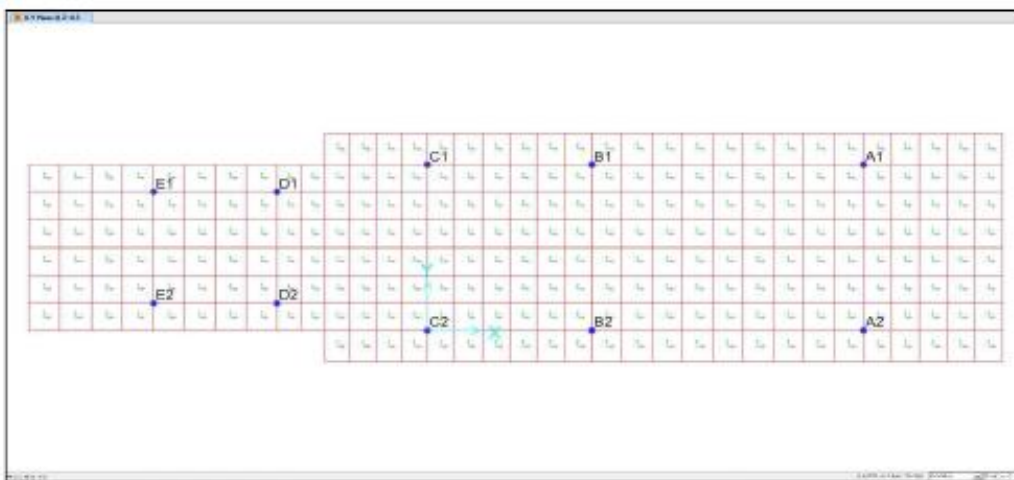
**Tabla 17**

Estados de carga por ángulo de fase entre turbina y generador.

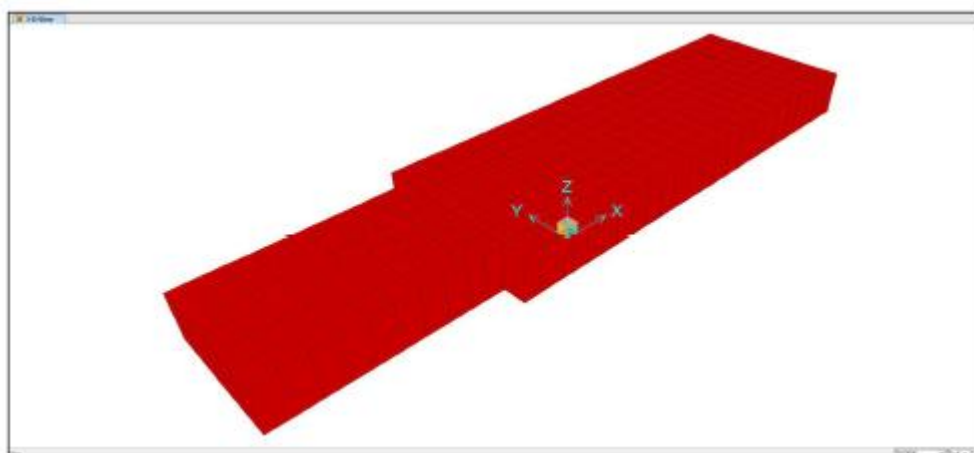
Angulo de fase	Caso de Carga
0° Turbina + 0° Generador	SAc1
90°Turbina + 30°Generador	SAc2
180°Turbina + 60°Generador	SAc3
270°Turbina + 60°Generador	SAc4
360°Turbina + 90°Generador	SAc5

## 5.8 ANALISIS COMPUTACIONAL

La geometría del modelo está compuesta por nudos y elementos que son aplicables para el programa SAP2000. Todos los elementos tienen asignadas propiedades geométricas y propiedades del material de acuerdo a sus características reales. Se presenta la vista en planta y la disposición de PADs (Apoyos) y una vista isométrica del bloque de hormigón.



**Figura 32.** Vista en planta y ubicación pads



**Figura 33.** Vista isométrica del bloque de hormigón.



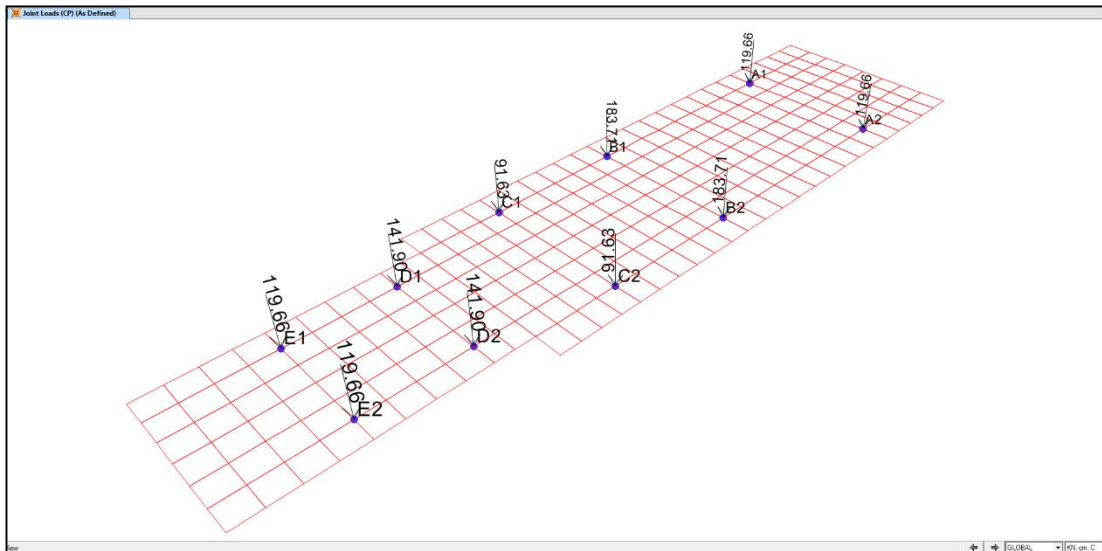
Como ya fueron definidos los materiales y sus propiedades, en la figura 34 se muestra la sección de la cimentación.

The image shows a software dialog box titled "Shell Section Data". It contains the following fields and controls:

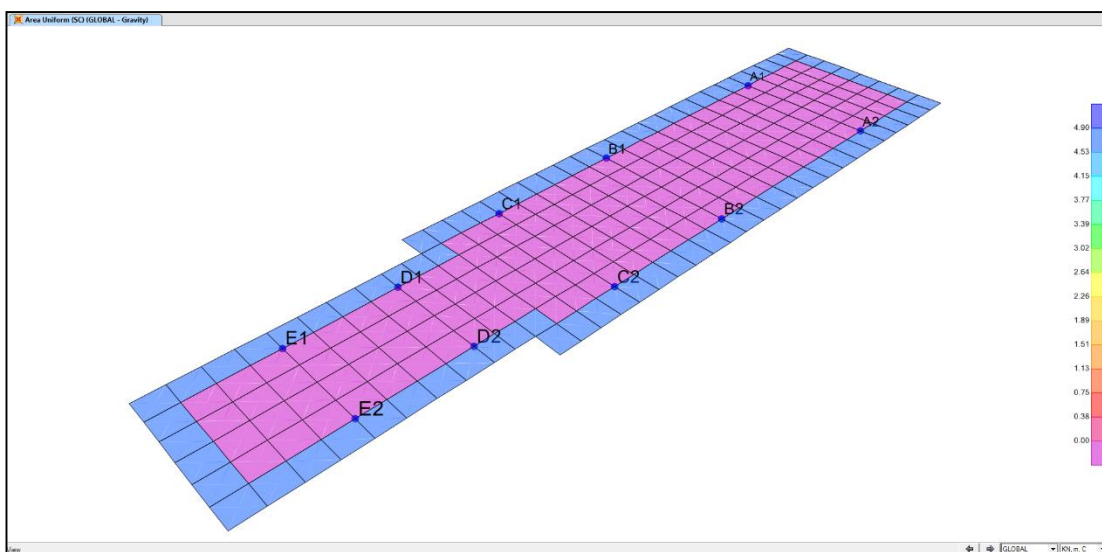
- Section Name:** Text input field containing "L150".
- Section Notes:** Button labeled "Modify/Show...".
- Display Color:** A green square indicator.
- Type:** Radio button group with options: "Shell - Thin" (selected), "Shell - Thick", "Plate - Thin", "Plate Thick", "Membrane", and "Shell - Layered/Nonlinear". Below the group is a button labeled "Modify/Show Layer Definition...".
- Material:** "Material Name" dropdown menu showing "H35-1c30" with a "+" icon to its left. "Material Angle" text input field containing "0".
- Thickness:** "Membrane" text input field containing "1.5". "Bending" text input field containing "1.5".
- Concrete Shell Section Design Parameters:** Button labeled "Modify/Show Shell Design Parameters...".
- Stiffness Modifiers:** Button labeled "Set Modifiers...".
- Temp Dependent Properties:** Button labeled "Thermal Properties...".
- Buttons:** "OK" and "Cancel" buttons at the bottom.

**Figura 34.** Definición de propiedades para la cimentación.

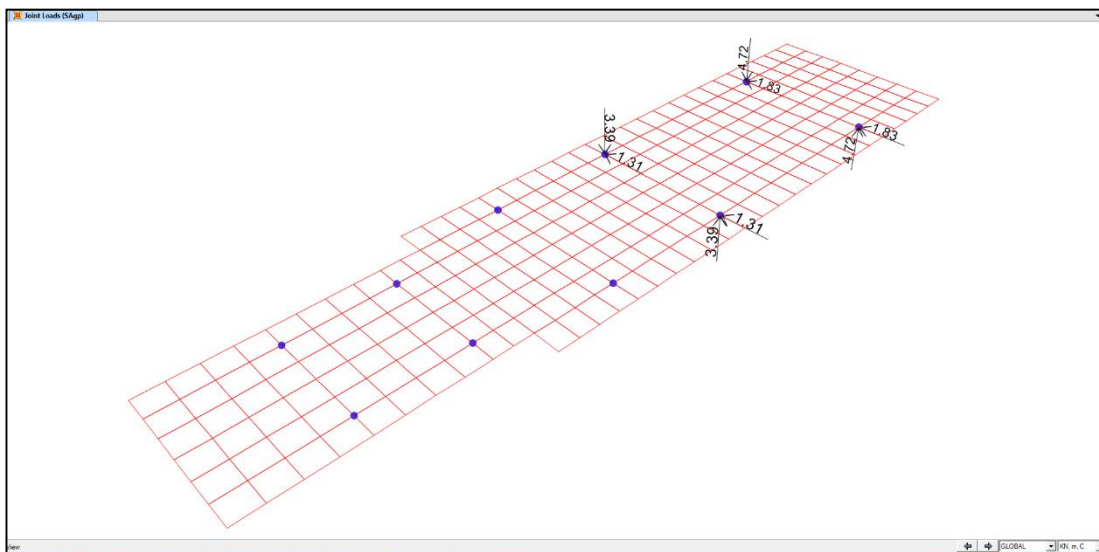
A continuación se muestra la aplicación de cargas según fueron declaradas anteriormente.



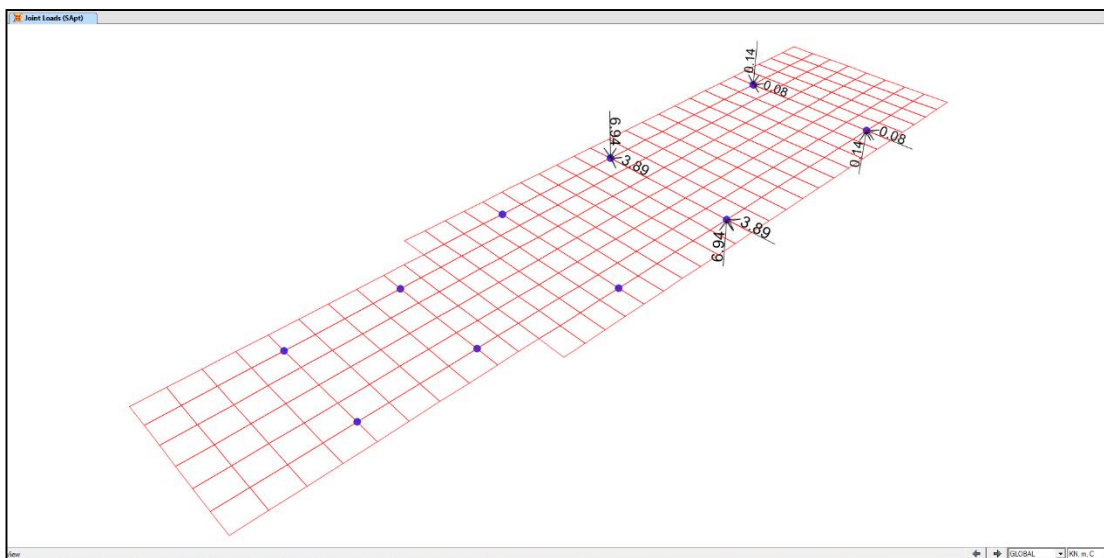
**Figura 35.** Asignación de cargas permanentes (CP)



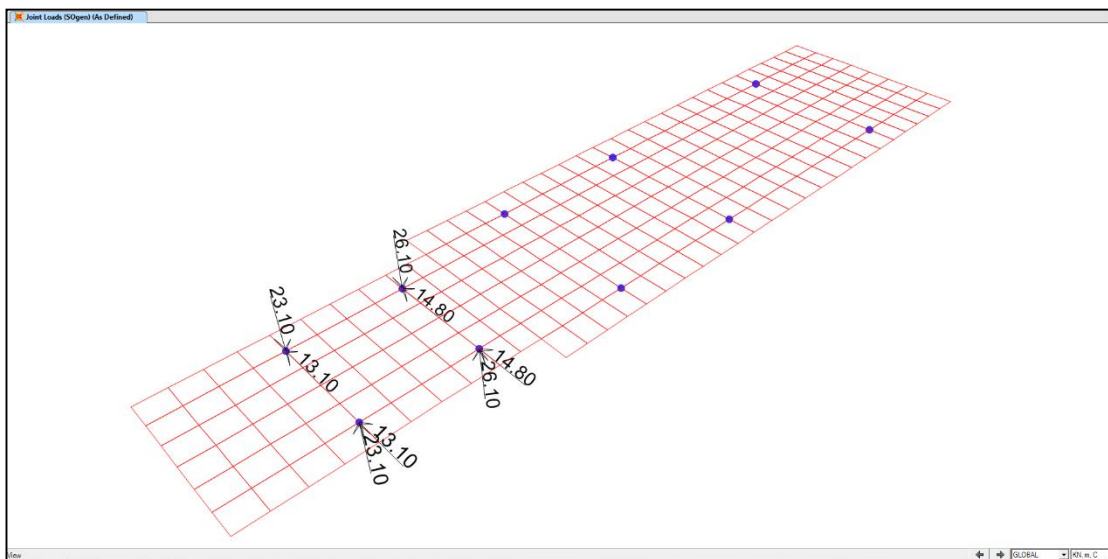
**Figura 36.** Asignación de carga viva (CV)



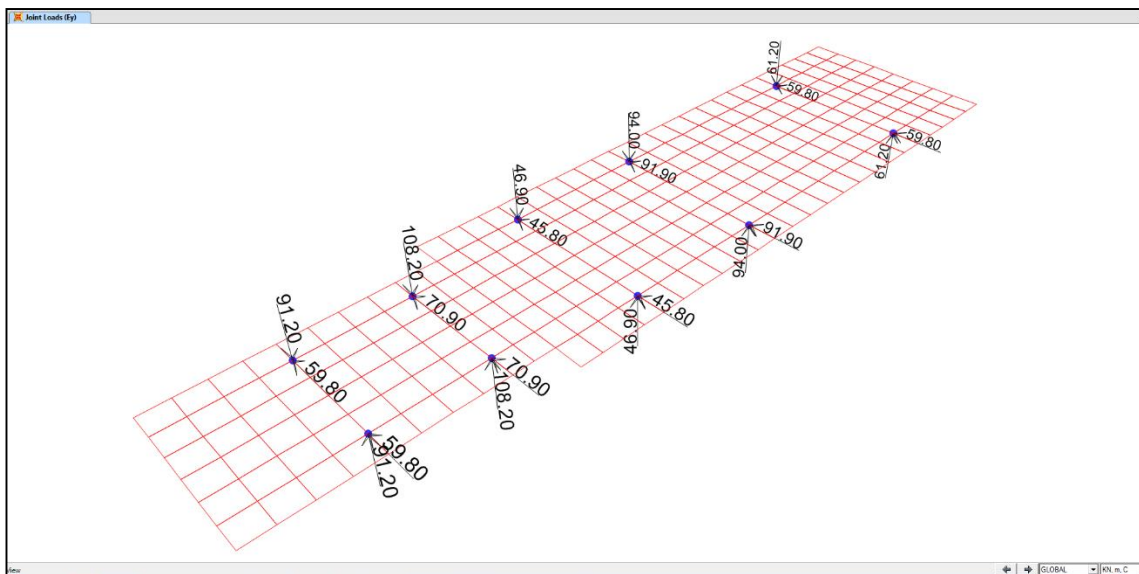
**Figura 37.** Asignación de sobrecarga de operación SAgp



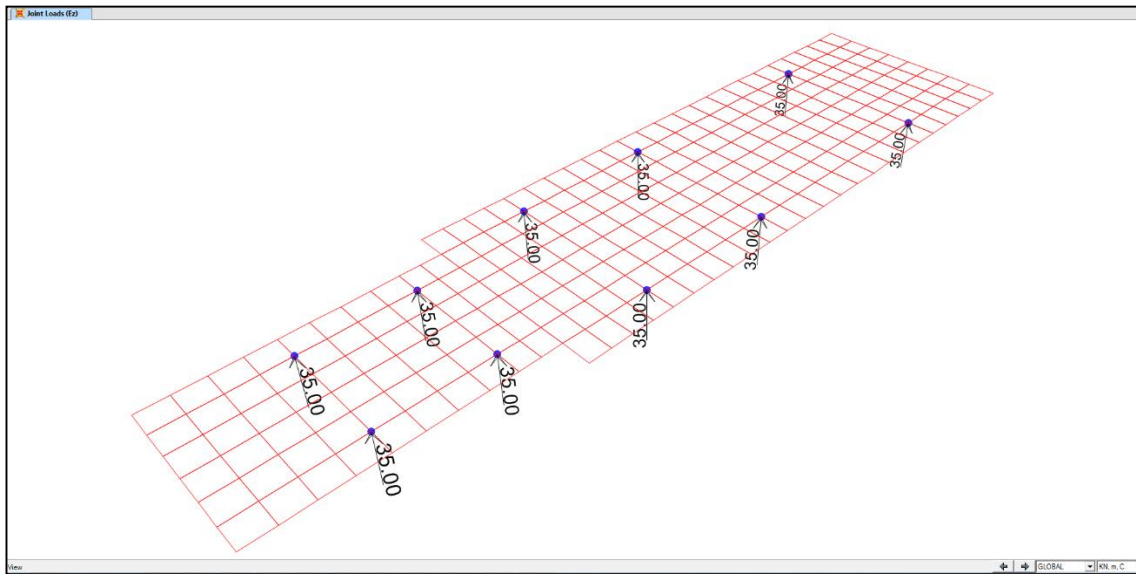
**Figura 38.** Asignación de sobrecarga de operación SApt



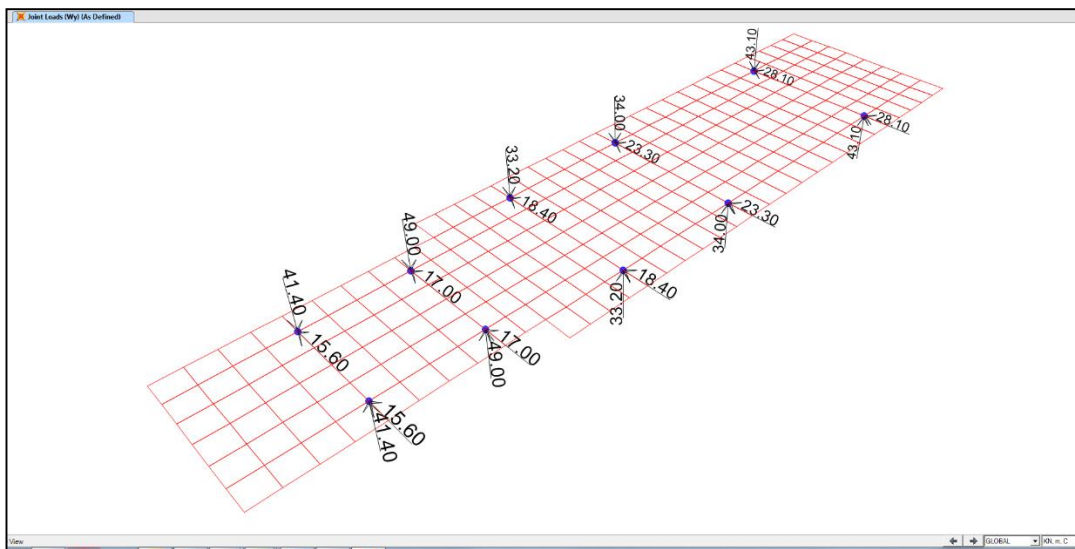
**Figura 39.** Asignación de sobrecarga de operación Sagen



**Figura 40.** Asignación de carga por sismo Ey



**Figura 41.** Asignación de carga por sismo Ez



**Figura 42.** Asignación de carga por viento W

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez realizado el modelo se procede al análisis de resultados donde se verifican los esfuerzos del suelo, resonancia, momentos y cortes de la cimentación. Finalmente se realiza el diseño de la cimentación donde se obtendrá el armado longitudinal y transversal de la cimentación.

#### 6.2 ESFUERZOS EN EL SUELO

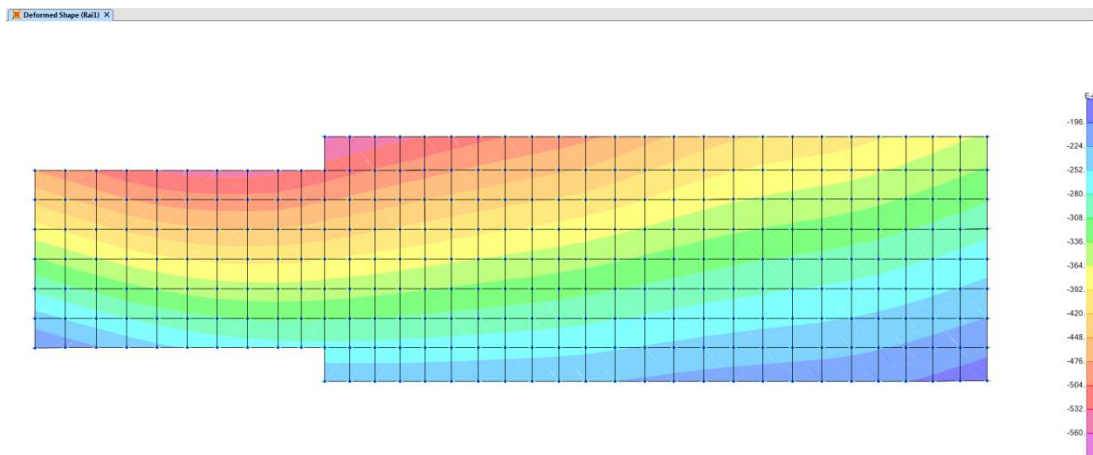
Los esfuerzos en el suelo se chequean utilizando interacción suelo estructura mediante resortes verticales y horizontales aplicados a los elementos shell del modelo matemático. Las magnitudes de los resortes verticales son  $K_{BL} = 162009.2 \text{ kN/m}^3$ .

Se presenta a continuación el máximo y mínimo esfuerzo actuante en el suelo:

**Tabla 18**

Máximo y mínimo esfuerzo actuante.

Joint	OutputCase	Desplazamiento u3 (m)	Coeff. Balasto $K_{BL}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Esfuerzo en el suelo (kPa)	CHECK
133	Rai1	-0.000567	162009.2	91.859	OK<Qadm'
131	Raii1	-0.000163	162010.2	26.408	OK<Qadm'



**Figura 43.** Desplazamientos de cimentación ante Rai1

Se observa en la figura 43, que no existen esfuerzos de tracción en el suelo de cimentación.

### 6.3 COMPROBACIÓN AL VOLTEO Y DESLIZAMIENTO

En la siguiente tabla, se resume las cargas actuantes en el sentido transversal de la cimentación, es decir sentido Y.

**Tabla 19**

Cargas actuantes en el sentido transversal.

ESTADO DE CARGA	CARGA HORIZONTAL H [kN]	CARGA VERTICAL V [kN]	MOMENTO M [kN-m]
CP	0	-4480.410	10977.005
SC	0	-145.400	356.230
SAgp	6.280	0	-38.259
SApt	7.940	0	-37.0865
SAgen	55.800	0	-201.091
Ey	656.400	0	-2179.036
Ez	0	350.050	-857.623
Wy	204.800	0	-915.121

Donde:

H: Carga horizontal en sentido Y

V: Carga vertical en sentido Z. (Sentido gravitacional negativo)

M: Momento de volteo (negativo) Momento estabilizante (positivo)

A continuación se presenta la estabilidad al volteo y deslizamiento ante las combinaciones de servicio mostradas:

**Tabla 20**

Estabilidad ante el volteo y deslizamiento para las combinaciones de servicio.

COMBINACIÓN		Me [kN-m]	Mv [kN-m]	FSv	H [kN]	Fr [kN]	FSd
Cargas de servicio. Tipo i	Rai1	11066.062	1597.850	6.926	726.42	2525.594	3.477
	Rai2	11066.062	2760.222	4.009	586.38	2525.594	4.307
	Rai3	11066.062	1044.977	10.590	586.38	2525.594	4.307
	Rai4	11066.062	3313.095	3.340	726.42	2525.594	3.477
	Rai5	11066.062	1191.558	9.287	274.82	2350.569	8.553
	Rai6	11066.062	638.684	17.326	134.78	2350.569	17.440
	Rai7	11066.062	638.684	17.326	134.78	2350.569	17.440
	Rai8	11066.062	1191.558	9.287	274.82	2350.569	8.553
Cargas de servicio. Tipo ii	Raii1	10977.005	3036.659	3.615	656.4	2157.369	3.287
	Raii2	10977.005	1321.414	8.307	656.4	2157.369	3.287
	Raii3	10977.005	915.121	11.995	204.8	2332.394	11.389
	Raii4	10977.005	915.121	11.995	204.8	2332.394	11.389

Donde:

Me: Momento estabilizante

Mv: Momento de voleo

Sv: Factor de seguridad al volteo Me/Mv

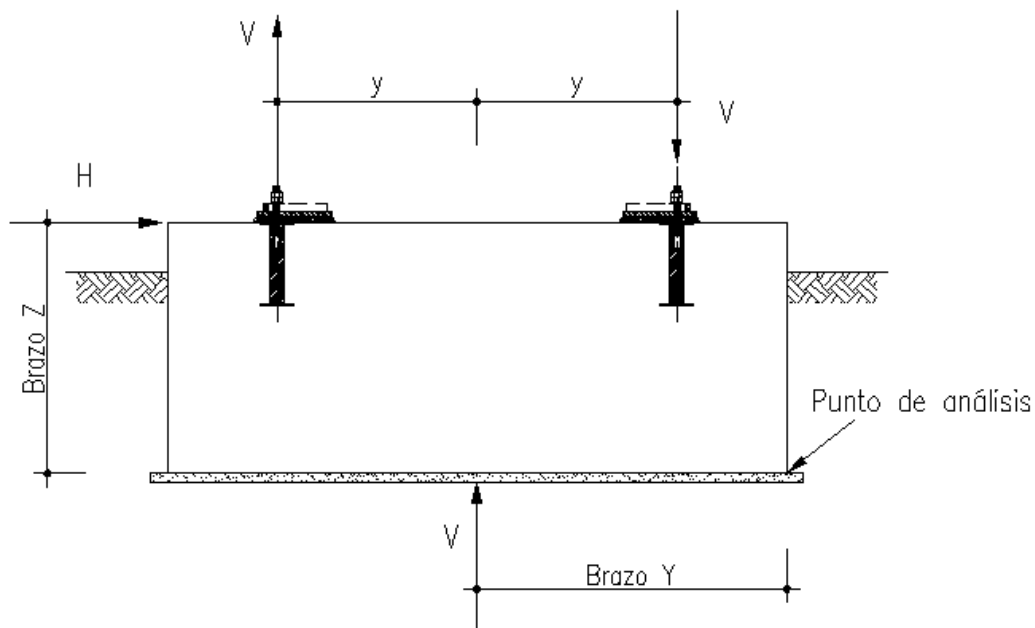
H: Carga horizontal deslizante

r: Fuerza resistente al deslizamiento.



El coeficiente de fricción entre suelo y cimentación es  $\mu=0.5$ . Para el cálculo del empuje pasivo se utiliza, peso unitario natural  $\gamma=2.2 \text{ t/m}^3$  y coeficiente de empuje en reposo  $k_p = 0.30$ .

FSv: Factor de seguridad al deslizamiento  $F_r/H$



**Figura 44.** Esquema de análisis.

#### 6.4 MOMENTOS Y CORTANTES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA CIMENTACIÓN.

**Tabla 21**

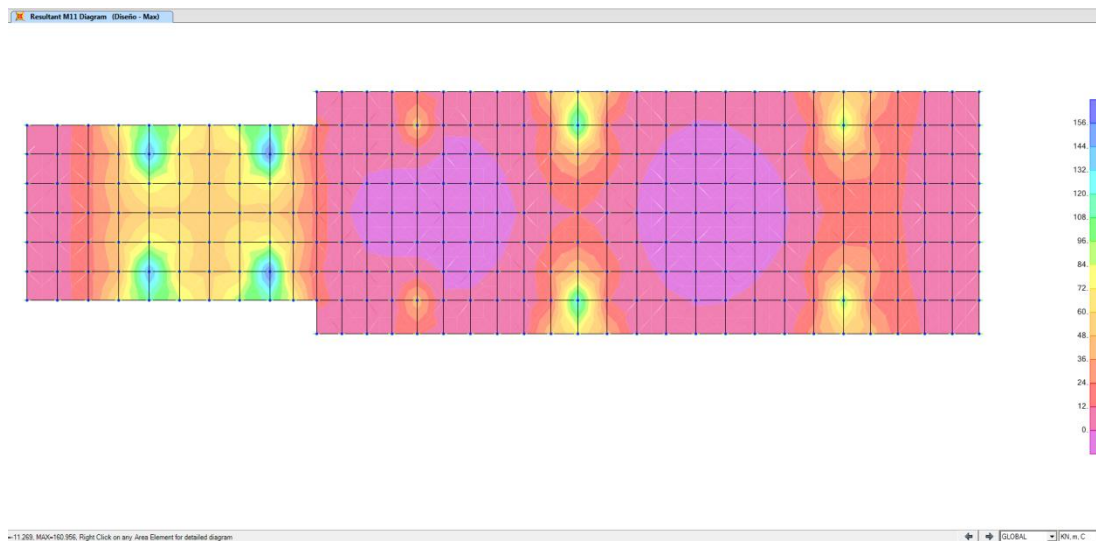
Momentos máximos y mínimos de la cimentación

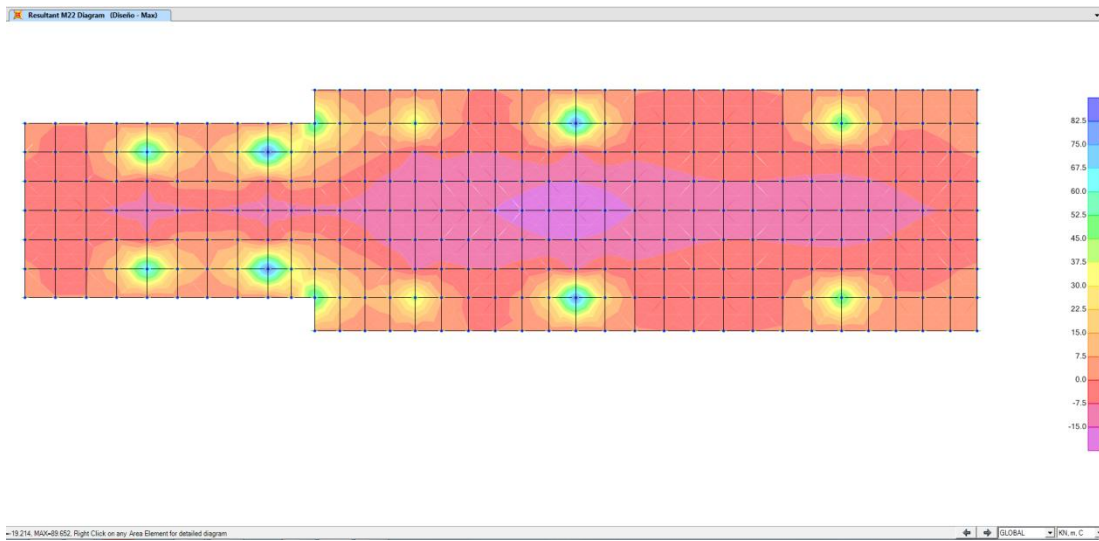
MOMENTOS		
Momento máximo que actúa alrededor del eje Y	M11 (t-m)	Mu = 161.0 kN-m
Momento máximo que actúa alrededor de eje X	M22 (t-m)	Mu = 89.7 kN-m
Momento mínimo que actúa alrededor del eje Y	M11 (t-m)	Mu = -51.06 kN-m
Momento mínimo que actúa alrededor de eje X	M22 (t-m)	Mu = -73.92 kN-m

**Tabla 22**

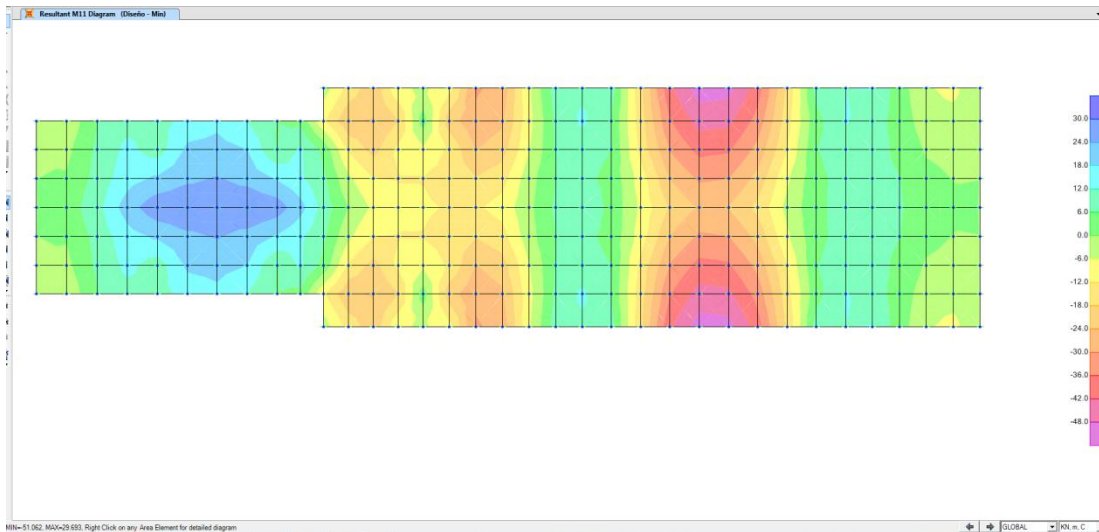
Cortantes máximos y mínimos de la cimentación

CORTE		
Cortante máximo que actúa en el plano X-Z	V13 (t)	Vu = 255,6 kN
Cortante máximo que actúa en el plano Y-Z	V23 (t)	Vu = 198,8 kN
Cortante mínimo que actúa en el plano X-Z	V13 (t)	Vu = -213,8 kN
Cortante mínimo que actúa en el plano Y-Z	V23 (t)	Vu = -198,8 kN

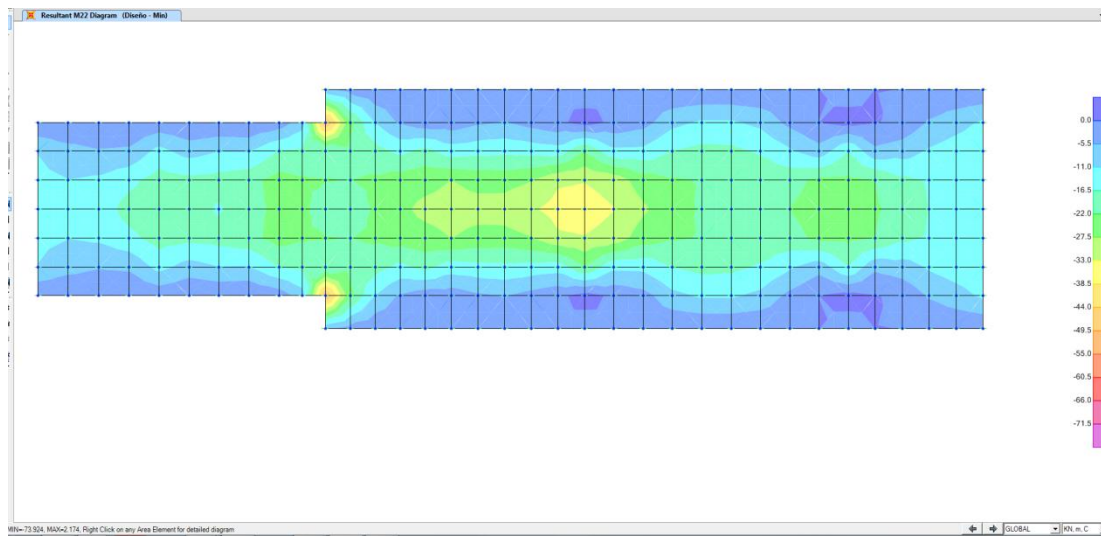
**6.4.1 DIAGRAMAS DE MOMENTOS Y CORTANTES DE LA CIMENTACION****Figura 45.** Momento máximo actuante alrededor del eje Y  $M11 = 161$  (kN/m)



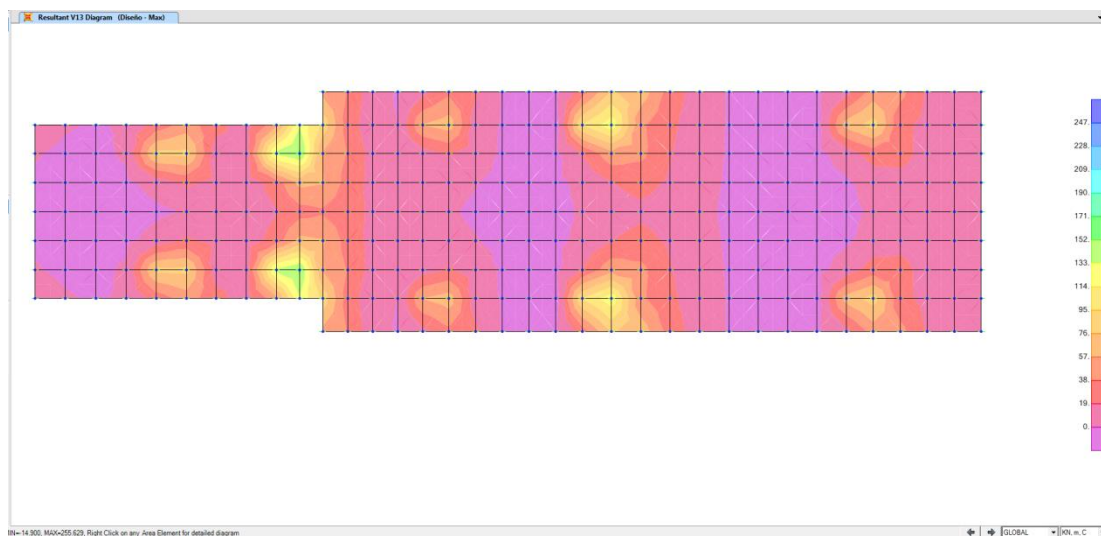
**Figura 46.** Momento máximo que actúa alrededor de eje X:  $M22 = 89.65$  (kN-m)



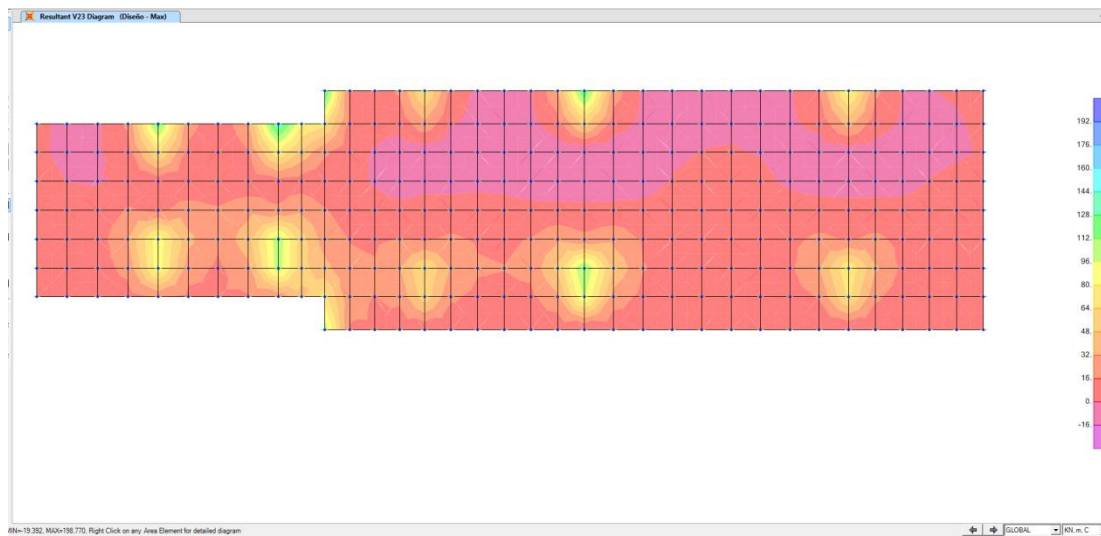
**Figura 47.** Momento mínimo que actúa alrededor del eje Y:  $M11 = -51.06$  (kN-m)



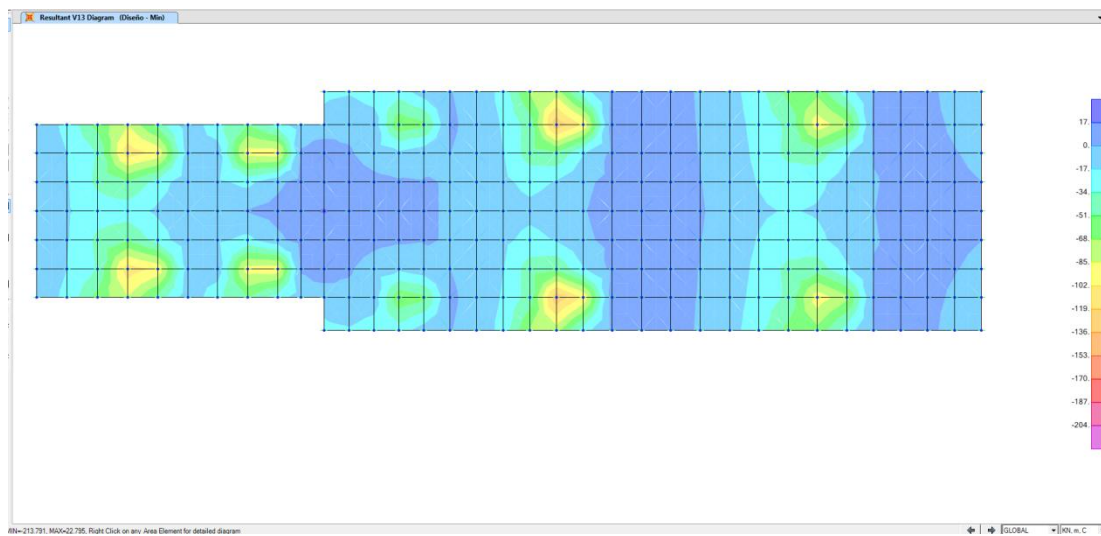
**Figura 48.** Momento mínimo que actúa alrededor de eje X:  $M_{22} = -73.92$  (kN-m)



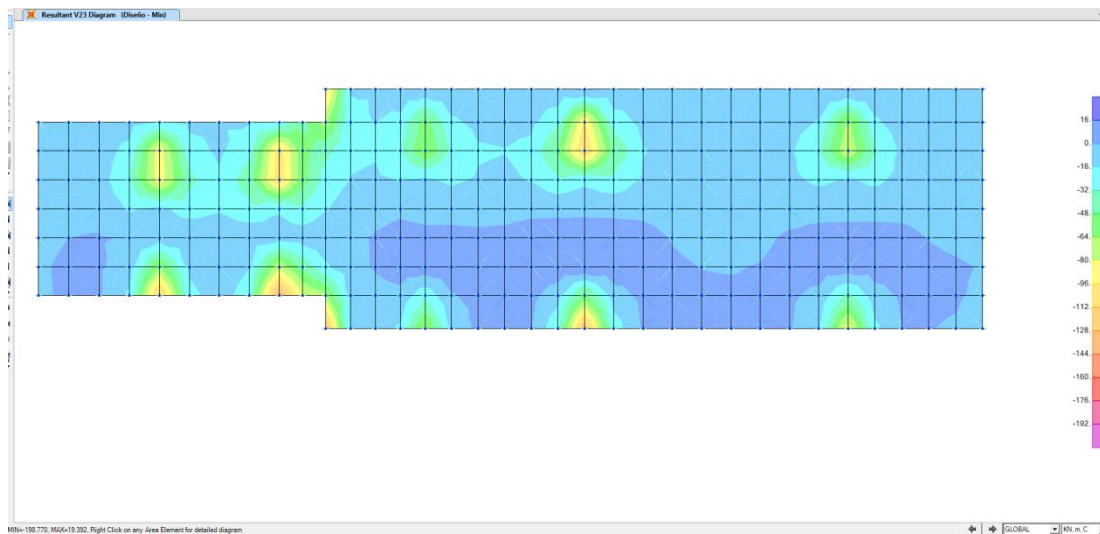
**Figura 49.** Cortante máximo que actúa en el plano X-Z:  $V_{13} = 255.63$  (kN)



**Figura 50.** Cortante máximo que actúa en el plano Y-Z:  $V23 = 198.77$  (kN)



**Figura 51.** Cortante mínimo que actúa en el plano X-Z:  $V13 = -213.79$  (kN)



**Figura 52.** Cortante mínimo que actúa en el plano Y-Z:  $V_{23} = -198.77$  (kN)

## 6.5 ANALISIS MODAL Y RESONANCIA

Para la verificación de la resonancia, vamos a considerar el modo de vibración donde se tiene un porcentaje de participación modal superior al 90% en las 3 direcciones X, Y, Z. Esto se cumple desde el modo 5 indicado en la siguiente tabla:

**Tabla 23.**

Factores de participación modal

TABLE: Modal Participating Mass Ratios									
OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	15.113134	4.075E-15	0.949486	0	4.075E-15	0.949486	0
MODAL	Mode	2	14.51546	1	3.831E-15	0	1	0.949486	0
MODAL	Mode	3	9.260049	1.827E-18	0.050514	0	1	1	0
MODAL	Mode	4	0.029926	0	0	0.387434	1	1	0.387434
MODAL	Mode	5	0.029926	0	0	0.578766	1	1	0.966201
MODAL	Mode	6	0.029926	0	0	0.033799	1	1	1
MODAL	Mode	7	0.029859	0	2.191E-11	0	1	1	1
MODAL	Mode	8	0.02796	0	0	0	1	1	1
MODAL	Mode	9	0.020959	0	0	0	1	1	1
MODAL	Mode	10	0.020224	0	0	0	1	1	1
MODAL	Mode	11	0.014207	0	9.288E-14	0	1	1	1
MODAL	Mode	12	0.013356	0	0	0	1	1	1

**Tabla 24**

Frecuencias y periodos modales.

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	15.113134	0.066168	0.41574	0.17284
MODAL	Mode	2	14.51546	0.068892	0.43286	0.18737
MODAL	Mode	3	9.260049	0.10799	0.67853	0.4604
MODAL	Mode	4	0.029926	33.416	209.96	44082
MODAL	Mode	5	0.029926	33.416	209.96	44082
MODAL	Mode	6	0.029926	33.416	209.96	44082
MODAL	Mode	7	0.029859	33.49	210.43	44279
MODAL	Mode	8	0.02796	35.766	224.72	50500
MODAL	Mode	9	0.020959	47.712	299.79	89871
MODAL	Mode	10	0.020224	49.447	310.69	96525
MODAL	Mode	11	0.014207	70.388	442.26	195590
MODAL	Mode	12	0.013356	74.871	470.43	221300

Como se indicó en 3.5 es de vital importancia que el rango de frecuencias este fuera del intervalo de 0,8 a 1,2, se muestra en la tabla 25 esta comprobación.

**Tabla 25**

Frecuencias y periodos modales.

Descripción del rotor	Velocidad de Rotación (RPM)	Frecuencia Hz	Rango de frecuencia del rotor
T250 Compresor	10500	175	140 - 210
T250 Turbina	7000	116.667	93.3 - 140
Generador	1500	25	20 - 30

Para el modo 8, se tiene una frecuencia de 50.69 Hz la misma que se encuentra fuera del rango entre 0.8 y 1.2 veces la velocidad de operación del rotor.

Las frecuencias de los modos 8 a 12, también están fuera del rango de velocidad de operación del equipo, por lo tanto no existe la posibilidad de resonancia.

## 6.5 ANALISIS DE VIBRACIONES

Debido a la acción de las fuerzas de vibración, se producen velocidades en cada punto de soporte, cuya velocidad media efectiva resultante debe tener un valor máximo de 0.05 in/seg (1.27 mm/seg) de acuerdo al documento, enviado por el fabricante.

La expresión para el cálculo de la velocidad media efectiva es la siguiente:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{(Vx^3 + Vy^3 + Vz^3)}{3}} \quad (6.1)$$

Donde  $Vx$ ,  $Vy$ ,  $Vz$  son las amplitudes de las componentes del vector de velocidades de la respuesta en cada punto de soporte.

Se presenta en la tabla 26, el cálculo de  $V_{RMS}$  en cada punto de soporte.

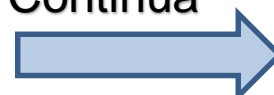


Tabla 26

Cálculo de  $V_{RMS}$ , asociado a desplazamientos en X, Y, Z.

TABLE: Joint Velocities - Absolute							
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	U1	U2	U3	VRMS
Text	Text	Text	Text	m/sec	m/sec	m/sec	mm/sec
A1	SAgp	LinModHist	Max	4.973E-07	1.999E-07	0.00002245	0.01296521
A1	SAgp	LinModHist	Min	-1.02E-07	-6.377E-07	-6.403E-06	0.00371553
A1	SApt	LinModHist	Max	0.00000165	0.00001076	0.00003246	0.01976657
A1	SApt	LinModHist	Min	-2.874E-06	-1.276E-06	-0.00001016	0.0061404
A1	SAgen	LinModHist	Max	0.0001056	0.0002161	0.0019	1.10572006
A1	SAgen	LinModHist	Min	-0.0001289	-0.0001353	-0.0008832	0.52120487
A1	SAc1	LinModHist	Max	0.0001053	0.0002194	0.002	1.16321744
A1	SAc1	LinModHist	Min	-0.0001316	-0.0001357	-0.0008692	0.51356327
A1	SAc2	LinModHist	Max	0.0001053	0.0002194	0.002	1.16321744
A1	SAc2	LinModHist	Min	-0.0001316	-0.0001357	-0.0008692	0.51356327
A1	SAc3	LinModHist	Max	0.0001053	0.0002194	0.002	1.16321744
A1	SAc3	LinModHist	Min	-0.0001316	-0.0001357	-0.0008692	0.51356327
A1	SAc4	LinModHist	Max	0.0001053	0.0002194	0.002	1.16321744
A1	SAc4	LinModHist	Min	-0.0001316	-0.0001357	-0.0008692	0.51356327
A1	SAc5	LinModHist	Max	0.0001053	0.0002194	0.002	1.16321744
A1	SAc5	LinModHist	Min	-0.0001316	-0.0001357	-0.0008692	0.51356327
A2	SAgp	LinModHist	Max	1.02E-07	1.999E-07	0.000006403	0.00369904
A2	SAgp	LinModHist	Min	-4.973E-07	-6.377E-07	-0.00002245	0.01296992
A2	SApt	LinModHist	Max	2.874E-06	0.00001076	0.00001016	0.0087037
A2	SApt	LinModHist	Min	-0.00000165	-1.276E-06	-0.00003246	0.01877944
A2	SAgen	LinModHist	Max	0.0001289	0.0002161	0.0008832	0.53020646
A2	SAgen	LinModHist	Min	-0.0001056	-0.0001353	-0.0019	1.10143201
A2	SAc1	LinModHist	Max	0.0001316	0.0002194	0.0008692	0.52311999
A2	SAc1	LinModHist	Min	-0.0001053	-0.0001357	-0.002	1.15895105
A2	SAc2	LinModHist	Max	0.0001316	0.0002194	0.0008692	0.52311999
A2	SAc2	LinModHist	Min	-0.0001053	-0.0001357	-0.002	1.15895105
A2	SAc3	LinModHist	Max	0.0001316	0.0002194	0.0008692	0.52311999
A2	SAc3	LinModHist	Min	-0.0001053	-0.0001357	-0.002	1.15895105
A2	SAc4	LinModHist	Max	0.0001316	0.0002194	0.0008692	0.52311999
A2	SAc4	LinModHist	Min	-0.0001053	-0.0001357	-0.002	1.15895105
A2	SAc5	LinModHist	Max	0.0001316	0.0002194	0.0008692	0.52311999
A2	SAc5	LinModHist	Min	-0.0001053	-0.0001357	-0.002	1.15895105
B1	SAgp	LinModHist	Max	1.265E-07	0.000000269	0.00004895	0.02826182
B1	SAgp	LinModHist	Min	-1.02E-07	-3.142E-07	-6.065E-06	0.00350682
B1	SApt	LinModHist	Max	5.053E-07	0.00000385	0.00002109	0.01238098
B1	SApt	LinModHist	Min	-3.331E-06	-0.00001133	-0.00001076	0.00922392
B1	SAgen	LinModHist	Max	0.00004289	0.000221	0.0009283	0.55148933
B1	SAgen	LinModHist	Min	-0.00007454	-0.000148	-0.0009994	0.58488192
B1	SAc1	LinModHist	Max	0.00004288	0.0002094	0.0009964	0.5883593
B1	SAc1	LinModHist	Min	-0.00007534	-0.0001513	-0.000978	0.57301885
B1	SAc2	LinModHist	Max	0.00004288	0.0002094	0.0009964	0.5883593
B1	SAc2	LinModHist	Min	-0.00007534	-0.0001513	-0.000978	0.57301885
B1	SAc3	LinModHist	Max	0.00004288	0.0002094	0.0009964	0.5883593
B1	SAc3	LinModHist	Min	-0.00007534	-0.0001513	-0.000978	0.57301885
B1	SAc4	LinModHist	Max	0.00004288	0.0002094	0.0009964	0.5883593
B1	SAc4	LinModHist	Min	-0.00007534	-0.0001513	-0.000978	0.57301885
B1	SAc5	LinModHist	Max	0.00004288	0.0002094	0.0009964	0.5883593
B1	SAc5	LinModHist	Min	-0.00007534	-0.0001513	-0.000978	0.57301885
B2	SAgp	LinModHist	Max	1.02E-07	0.000000269	0.000006065	0.00350557
B2	SAgp	LinModHist	Min	-1.265E-07	-3.142E-07	-0.00004895	0.02826197

Continua



B2	SApt	LinModHist	Max	3.331E-06	0.00000385	0.00001076	0.00687255
B2	SApt	LinModHist	Min	-5.053E-07	-0.00001133	-0.00002109	0.01382525
B2	SAgen	LinModHist	Max	0.00007454	0.000221	0.0009994	0.59250811
B2	SAgen	LinModHist	Min	-0.00004289	-0.000148	-0.0009283	0.54328766
B2	SAC1	LinModHist	Max	0.00007534	0.0002094	0.000978	0.57908217
B2	SAC1	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0001513	-0.0009964	0.58239258
B2	SAC2	LinModHist	Max	0.00007534	0.0002094	0.000978	0.57908217
B2	SAC2	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0001513	-0.0009964	0.58239258
B2	SAC3	LinModHist	Max	0.00007534	0.0002094	0.000978	0.57908217
B2	SAC3	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0001513	-0.0009964	0.58239258
B2	SAC4	LinModHist	Max	0.00007534	0.0002094	0.000978	0.57908217
B2	SAC4	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0001513	-0.0009964	0.58239258
B2	SAC5	LinModHist	Max	0.00007534	0.0002094	0.000978	0.57908217
B2	SAC5	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0001513	-0.0009964	0.58239258
C1	SAGp	LinModHist	Max	1.171E-07	4.114E-07	0.00006714	0.03876408
C1	SAGp	LinModHist	Min	-1.02E-07	-9.36E-07	-5.841E-06	0.00341583
C1	SApt	LinModHist	Max	3.868E-06	0.000003771	0.00003943	0.02297757
C1	SApt	LinModHist	Min	-5.645E-07	-0.00001215	-0.00001065	0.00933387
C1	SAgen	LinModHist	Max	0.00004289	0.00007454	0.0005011	0.29353987
C1	SAgen	LinModHist	Min	-0.0001088	-0.0002363	-0.0011	0.65260379
C1	SAC1	LinModHist	Max	0.00004288	0.00007407	0.0006077	0.35431829
C1	SAC1	LinModHist	Min	-0.0001049	-0.0002396	-0.0011	0.652792
C1	SAC2	LinModHist	Max	0.00004288	0.00007407	0.0006077	0.35431829
C1	SAC2	LinModHist	Min	-0.0001049	-0.0002396	-0.0011	0.652792
C1	SAC3	LinModHist	Max	0.00004288	0.00007407	0.0006077	0.35431829
C1	SAC3	LinModHist	Min	-0.0001049	-0.0002396	-0.0011	0.652792
C1	SAC4	LinModHist	Max	0.00004288	0.00007407	0.0006077	0.35431829
C1	SAC4	LinModHist	Min	-0.0001049	-0.0002396	-0.0011	0.652792
C1	SAC5	LinModHist	Max	0.00004288	0.00007407	0.0006077	0.35431829
C1	SAC5	LinModHist	Min	-0.0001049	-0.0002396	-0.0011	0.652792
C2	SAGp	LinModHist	Max	1.02E-07	4.114E-07	0.000005841	0.00338117
C2	SAGp	LinModHist	Min	-1.171E-07	-9.36E-07	-0.00006714	0.03876712
C2	SApt	LinModHist	Max	5.645E-07	0.000003771	0.00001065	0.00653099
C2	SApt	LinModHist	Min	-3.868E-06	-0.00001215	-0.00003943	0.02392564
C2	SAgen	LinModHist	Max	0.0001088	0.00007454	0.0011	0.63963366
C2	SAgen	LinModHist	Min	-0.00004289	-0.0002363	-0.0005011	0.32082106
C2	SAC1	LinModHist	Max	0.0001049	0.00007407	0.0011	0.63939825
C2	SAC1	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0002396	-0.0006077	0.37795332
C2	SAC2	LinModHist	Max	0.0001049	0.00007407	0.0011	0.63939825
C2	SAC2	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0002396	-0.0006077	0.37795332
C2	SAC3	LinModHist	Max	0.0001049	0.00007407	0.0011	0.63939825
C2	SAC3	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0002396	-0.0006077	0.37795332
C2	SAC4	LinModHist	Max	0.0001049	0.00007407	0.0011	0.63939825
C2	SAC4	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0002396	-0.0006077	0.37795332
C2	SAC5	LinModHist	Max	0.0001049	0.00007407	0.0011	0.63939825
C2	SAC5	LinModHist	Min	-0.00004288	-0.0002396	-0.0006077	0.37795332
D1	SAGp	LinModHist	Max	4.595E-07	5.431E-07	0.0000523	0.03019821
D1	SAGp	LinModHist	Min	-6.844E-08	-8.05E-07	-3.811E-06	0.00224918
D1	SApt	LinModHist	Max	4.453E-06	0.000003174	0.00002723	0.01603513
D1	SApt	LinModHist	Min	-1.238E-06	-5.75E-07	-6.867E-06	0.00404223
D1	SAgen	LinModHist	Max	0.00003921	0.0001468	0.000228	0.15818941
D1	SAgen	LinModHist	Min	-0.00008355	-0.0002087	-0.0007955	0.47726881
D1	SAC1	LinModHist	Max	0.00004113	0.0001464	0.0003075	0.19805798
D1	SAC1	LinModHist	Min	-0.00007864	-0.0002063	-0.0007805	0.46830339
D1	SAC2	LinModHist	Max	0.00004113	0.0001464	0.0003075	0.19805798
D1	SAC2	LinModHist	Min	-0.00007864	-0.0002063	-0.0007805	0.46830339
D1	SAC3	LinModHist	Max	0.00004113	0.0001464	0.0003075	0.19805798
D1	SAC3	LinModHist	Min	-0.00007864	-0.0002063	-0.0007805	0.46830339
D1	SAC4	LinModHist	Max	0.00004113	0.0001464	0.0003075	0.19805798
D1	SAC4	LinModHist	Min	-0.00007864	-0.0002063	-0.0007805	0.46830339
D1	SAC5	LinModHist	Max	0.00004113	0.0001464	0.0003075	0.19805798
D1	SAC5	LinModHist	Min	-0.00007864	-0.0002063	-0.0007805	0.46830339

Continua



D2	SAgp	LinModHist	Max	6.844E-08	5.431E-07	0.000003811	0.00222286
D2	SAgp	LinModHist	Min	-4.595E-07	-8.05E-07	-0.0000523	0.03020016
D2	SApt	LinModHist	Max	1.238E-06	0.000003174	0.000006867	0.00442578
D2	SApt	LinModHist	Min	-4.453E-06	-5.75E-07	-0.00002723	0.01593354
D2	SAgen	LinModHist	Max	0.00008355	0.0001468	0.0007955	0.46952142
D2	SAgen	LinModHist	Min	-0.00003921	-0.0002087	-0.000228	0.17988618
D2	SAc1	LinModHist	Max	0.00007864	0.0001464	0.0007805	0.46072315
D2	SAc1	LinModHist	Min	-0.00004113	-0.0002063	-0.0003075	0.21510278
D2	SAc2	LinModHist	Max	0.00007864	0.0001464	0.0007805	0.46072315
D2	SAc2	LinModHist	Min	-0.00004113	-0.0002063	-0.0003075	0.21510278
D2	SAc3	LinModHist	Max	0.00007864	0.0001464	0.0007805	0.46072315
D2	SAc3	LinModHist	Min	-0.00004113	-0.0002063	-0.0003075	0.21510278
D2	SAc4	LinModHist	Max	0.00007864	0.0001464	0.0007805	0.46072315
D2	SAc4	LinModHist	Min	-0.00004113	-0.0002063	-0.0003075	0.21510278
D2	SAc5	LinModHist	Max	0.00007864	0.0001464	0.0007805	0.46072315
D2	SAc5	LinModHist	Min	-0.00004113	-0.0002063	-0.0003075	0.21510278
E1	SAgp	LinModHist	Max	8.789E-07	9.381E-07	0.0000564	0.03257101
E1	SAgp	LinModHist	Min	-6.844E-08	-6.777E-07	-3.755E-06	0.00220333
E1	SApt	LinModHist	Max	3.041E-06	0.00001311	0.00001383	0.01114134
E1	SApt	LinModHist	Min	-1.808E-06	-2.128E-06	-6.641E-06	0.00415933
E1	SAgen	LinModHist	Max	0.00007404	0.0002061	0.0002492	0.19153744
E1	SAgen	LinModHist	Min	-0.00006911	-0.0003805	-0.00083	0.52866386
E1	SAc1	LinModHist	Max	0.00007691	0.0002057	0.0003195	0.22383617
E1	SAc1	LinModHist	Min	-0.00006519	-0.0003665	-0.0008166	0.51814012
E1	SAc2	LinModHist	Max	0.00007691	0.0002057	0.0003195	0.22383617
E1	SAc2	LinModHist	Min	-0.00006519	-0.0003665	-0.0008166	0.51814012
E1	SAc3	LinModHist	Max	0.00007691	0.0002057	0.0003195	0.22383617
E1	SAc3	LinModHist	Min	-0.00006519	-0.0003665	-0.0008166	0.51814012
E1	SAc4	LinModHist	Max	0.00007691	0.0002057	0.0003195	0.22383617
E1	SAc4	LinModHist	Min	-0.00006519	-0.0003665	-0.0008166	0.51814012
E1	SAc5	LinModHist	Max	0.00007691	0.0002057	0.0003195	0.22383617
E1	SAc5	LinModHist	Min	-0.00006519	-0.0003665	-0.0008166	0.51814012
E2	SAgp	LinModHist	Max	6.844E-08	9.381E-07	0.000003755	0.00223493
E2	SAgp	LinModHist	Min	-8.789E-07	-6.777E-07	-0.0000564	0.03256886
E2	SApt	LinModHist	Max	1.808E-06	0.00001311	0.000006641	0.00854876
E2	SApt	LinModHist	Min	-3.041E-06	-2.128E-06	-0.00001383	0.0082673
E2	SAgen	LinModHist	Max	0.00006911	0.0002061	0.00083	0.49536297
E2	SAgen	LinModHist	Min	-0.00007404	-0.0003805	-0.0002492	0.2660594
E2	SAc1	LinModHist	Max	0.00006519	0.0002057	0.0008166	0.48764666
E2	SAc1	LinModHist	Min	-0.00007691	-0.0003665	-0.0003195	0.28420512
E2	SAc2	LinModHist	Max	0.00006519	0.0002057	0.0008166	0.48764666
E2	SAc2	LinModHist	Min	-0.00007691	-0.0003665	-0.0003195	0.28420512
E2	SAc3	LinModHist	Max	0.00006519	0.0002057	0.0008166	0.48764666
E2	SAc3	LinModHist	Min	-0.00007691	-0.0003665	-0.0003195	0.28420512
E2	SAc4	LinModHist	Max	0.00006519	0.0002057	0.0008166	0.48764666
E2	SAc4	LinModHist	Min	-0.00007691	-0.0003665	-0.0003195	0.28420512
E2	SAc5	LinModHist	Max	0.00006519	0.0002057	0.0008166	0.48764666
E2	SAc5	LinModHist	Min	-0.00007691	-0.0003665	-0.0003195	0.28420512

Se obtiene un valor máximo de 1.16 mm/seg < 1.27 mm/seg.

## 6.6 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN

Una vez comprobados todos los chequeos se pasa al diseño de la cimentación, para lo cual se usaran las formulas descritas en 4.3.

### FLEXIÓN LOSA, CARA SUPERIOR:

$$\rho = \frac{0,85 \cdot 300}{4200} * \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 (739200)}{(0,9) 0,85 (100) (145)^2 4200}} \right] \quad (6.2)$$

$$\rho = 0,00009 \text{ cm}^2$$

$$As_{cal} = (0,00009 * 100 * 145) \quad (6.3)$$

$$As_{cal} = 1,35 \text{ cm}^2$$

No debe ser menor a:

$$As_{min} = 0,0033 * 100 * 145 \quad (6.4)$$

$$As_{min} = 48,33 \text{ cm}^2$$

Efectos de contracción por temperatura:

$$As_{temp} = 0,0018 (100) * (145) \quad (6.5)$$

$$As_{temp} = 27 \text{ cm}^2$$

**FLEXIÓN LOSA, CARA INFERIOR:**

$$\rho = \frac{0,85 \cdot 300}{4200} * \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 (1609500)}{(0,9) 0,85 (100) (145)^2 4200}} \right] \quad (6.6)$$

$$\rho = 0,000203 \text{ cm}^2$$

$$A_{s_{cal}} = (0,00020 * 100 * 145) \quad (6.7)$$

$$A_{s_{cal}} = 2,94 \text{ cm}^2$$

No debe ser menor a:

$$A_{s_{min}} = 0,0033 * 100 * 145 \quad (6.8)$$

$$A_{s_{min}} = 48,33 \text{ cm}^2$$

Efectos de contracción por temperatura:

$$A_{s_{temp}} = 0,0018 (100) * (145) \quad (6.9)$$

$$A_{s_{temp}} = 27 \text{ cm}^2$$

Para los dos casos domina el armado por temperatura, para lo cual se usa  
1 $\phi$  @ 200 mm

**DISEÑO A CORTE**

$$V_u = 25,56 T \quad (6.10)$$

$$\phi V_c = 0,75 * 0,53 \sqrt{300 * 100 * 145} \quad (6.11)$$

$$\phi V_c = 99,83 T$$

$$V_c > V_u$$

$$99,83 > 25,56$$

(CUMPLE)

**DISEÑO DE ANCLAJE****PLACA BASE**

La placa base tiene como dimensiones:

$$B = 500 \text{ mm}$$

$$L = 440 \text{ mm}$$

$$B = 381 \text{ mm}$$

$$l = 160 \text{ mm}$$

Carga de compresión crítica (Nudo B1, Combinación Rai1)

$$F_3 = 32940,7 \text{ Kg}$$

Material (ASTM A36)

$$F_y = 2535 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{F3}{B * L} = 14,97 \text{ kg/cm}^2$$

$$Q = P_{m\acute{a}x} * l = 570,47 \text{ kg/cm}^2$$

Módulo de sección requerida:

$$S = \frac{Q * l^2}{2} = 48,01 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$$

Espesor requerido:

$$S = \sqrt{\left(\frac{6 * S}{b}\right)} = 2,75 \text{ cm}$$

Espesor adoptado: 3 cm

### PERNOS DE ANCLAJE

Tabla 27

Diseño de pernos a tracción

**DISEÑO DE PERNOS ANCLAJE PRE-INSTALADOS**

COEFICIENTE POR SISMO 0.75

**TRACCION**

**RESISTENCIA DEL ACERO A LA TRACCION**

f'c	Fya	Pu	Vu	pernos				Futa	Ase	Nsa	φNsa
kg/cm2	kg/cm2	kg	kg	# filas	# col	do (mm)	rt	kg/cm2	cm2	kg	kg
300	7382.24	7063.23	0	1.0	1.0	38.0	0.236	8600	9.01	77510.2	43599.5
				sl=	0.0cm	0.0cm	=2	OK			

**RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO A LA TRACCION**

h <sub>e</sub>	A	B	c1	1.5 hfa	c1'	c2	1.5 hfb	c2'	e' <sub>N</sub>
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
50.0	370.0	240.0	65.7	75.0	304.3	120.0	75.0	120.0	0.0
h <sub>e</sub>	A <sub>ntz</sub>	Nb	A <sub>ntz</sub>	Ψ <sub>seN</sub>	Ψ <sub>seN</sub>	Ψ <sub>en</sub>	N <sub>se</sub>	φN <sub>se</sub>	
cm	cm2	kg	cm2				kg	kg	
50.0	22500	68172	21105	1.00	0.9628	1.00	61566	32322	OK

Ψ<sub>en</sub>=1.0C Para anclajes localizados en concreto con fisuración  
 Ψ<sub>en</sub>=1.2f Para anclajes localizados en concreto sin fisuración

**RESIST. A LA EXTRACCION POR DESLIZAMIENTO**

PERN	A <sub>ntz</sub>	Ψ <sub>en</sub>	Np	N <sub>en</sub>	φN <sub>en</sub>
O	cm2		kg	kg	kg
CON	33.592	1.00	80622	80622	42327

OK

**RESIST. AL DESPRENDIMIENTO LATERAL**

C <sub>sl</sub>	N <sub>sl</sub>	N <sub>se</sub>	φN <sub>sl</sub>
cm	kg	kg	kg
20.000	85330	85330	44798.1

OK

**CALCULO DE LA LONGITUD DE ROSCA**

R <sub>ntz</sub>	R <sub>sl</sub>	d <sub>ntz</sub>	D <sub>ntz</sub>	A <sub>e</sub>	A <sub>cl</sub>	L <sub>ROSCA</sub>
kg/cm2	kg/cm2	mm	mm	mm2	mm2	mm
8800.0	5150.0	37.13	34.46	823.00	88.35	47.75

Uso 80mm

Tabla 28

Diseño de pernos a corte

CORTE															
ACERO		RESISTENCIA AL ARRANCAMIENTO DEL CONCRETO											RESIST. AL DESPREND.		
V <sub>sa</sub>	φV <sub>sa</sub>	h <sub>a</sub>	e <sub>st</sub>	C <sub>a1</sub>	A <sub>12a</sub>	V <sub>b</sub>	A <sub>12</sub>	Ψ <sub>ev</sub>	Ψ <sub>ev</sub>	Ψ <sub>ev</sub>	V <sub>ag</sub>	φV <sub>ag</sub>	K <sub>tr</sub>	V <sub>ag</sub>	φV <sub>ag</sub>
kg	kg	cm	cm	cm	cm <sup>2</sup>	kg	cm <sup>2</sup>				kg	kg	kg	kg	kg
46506.1	22671.7	150	0	65.7	19424.2	57231.8	19424.2	1.00	1.00	1.00	57231.8	27900.5	2.0	123133	60027
OK		Ψ <sub>ev</sub> =1.0 Para anclajes localizados en concreto con fisuración Ψ <sub>ev</sub> =1.2 Para anclajes localizados en concreto con fisuración con refuerzo suplementario consistente en barras de diametro no. 13 o mayor Ψ <sub>ev</sub> =1.4 Para anclajes localizados en concreto con fisuración con refuerzo suplementario consistente en barras de diametro no. 13 o mayor y confinado con estribos espaciados a no mas de 100mm											OK		

INTERACCION TRACCION-CORTE							
CABEZ		JOTA		PERNO CABEZA		PERNO JOTA	
φNn	φNn	φVn	Nu/φNn	Vu/φVn	Nu/φNn	Vu/φVn	
kg	kg	kg					
32322.4	9210.9	22671.7	0.21852	0	0.76683	0	
				OK		OK	



## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La generación de energía eléctrica la vemos constantemente, es necesaria en todos los ámbitos del día en mayor o menor cantidad. La más necesaria es a nivel industrial y en grandes cantidades. Por lo cual se han creado equipos que generan dichas cantidades de energía, los cuales usan combustibles perecederos o no renovables; equipos que además son dinámicos, los cuales necesitan una cimentación confiable, segura y económica desde el punto de vista constructivo, dado que la cimentación es una necesidad inevitable para la generación de energía a través de procesos industriales.
- En el presente trabajo se recopiló información analítica de aspectos geotécnicos y estructurales, la industria necesita este tipo de aportes ya que vuelven eficiente un diseño, lo que se traduce en un ahorro de costos.
- Es fundamental conocer el equipo a cimentar, ya que no todos los equipos dinámicos trabajan igual, y su modelación es diferente, por ende es necesario conocer el peso, geometría, velocidades y frecuencias de operación de dichos equipos.
- El Ecuador es un país con alta producción de hidrocarburos, lo que hace tentador la incursión de equipos generadores, por lo que la

ingeniería aplicada al diseño y construcción está en constante necesidad.

- La norma ecuatoriana NEC-V.2015, es una norma enfocada principalmente en las estructuras más comunes, por lo que para cimentaciones de equipos dinámicos es necesario recurrir a normas y modelamientos que tienen más de 30 años de antigüedad, sin embargo estos métodos no han sido renovados, lo que deja una cierta ventana a la investigación de este campo.
- Siempre que se requiera cimentar un equipo dinámico es de vital importancia apoyarse en el estudio de suelos, el cual suele recomendar consideraciones de diseño y construcción, además de los parámetros que fueron usados en el diseño.
- Es responsabilidad del diseñador asegurar la inclusión de cualquier carga o escenario posible, ya que el lugar de construcción es delimitado por sus propias normas y condiciones de sitio.
- Como se vio, el armado en grandes bloques de hormigón suele ser regido por el hormigón a temperatura, normalmente se esperan grandes masas de hormigón por las condiciones de relación entre la masa de la cimentación y la masa del equipo
- Las vibraciones deben ser cuidadosamente estudiadas, debido a que como se mostró, si la relación entre la cimentación y el equipo está entre 0,8 y 1,2 existirá resonancia, haciendo que se amplifiquen las amplitudes y destruyendo el hormigón. Se debe prevenir también vibraciones nocivas para el personal.

## 7.2 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- ACI Committee 351.3R04. (2004). *Foundations for Dynamic Equipment*.
- Aguiar Falconi, R. (s.f.). *Dinamica de estructuras con CEINCI-LAB*.
- Bhatia, K. G. (2008). *FOUNDATIONS FOR INDUSTRIAL MACHINES*. New Delhi: D-VAD Publishers.
- Building, O. I. (1997). *UNIFORM BUILDING CODE*. Whittier, California.
- [http://energia-nuclear.net/como\\_funciona\\_la\\_energia\\_nuclear.html](http://energia-nuclear.net/como_funciona_la_energia_nuclear.html). (s.f.).
- <http://energiasostenible.info/energias-renovables/energia-eolica/>. (s.f.).
- <http://heliosolar.es/>. (s.f.).
- <http://organismos.chubut.gov.ar/ambiente/files/2011/11/GSJ-CD-U02-AI-001.pdf>. (s.f.).
- <http://sedientosdesaber.blogspot.com/2013/01/el-agua-como-fuente-de-energia.html>. (s.f.).
- [http://www.hellopro.es/Automator\\_Groupe\\_Automator-882-noprofil-2010532-5173-0-1-1-fr-societe.html](http://www.hellopro.es/Automator_Groupe_Automator-882-noprofil-2010532-5173-0-1-1-fr-societe.html). (s.f.).
- <http://www.iae.org.ar/archivos/educ6.pdf>. (s.f.).
- <http://www.imagenesi.net/centrales-termicas/central-termica/>. (s.f.).
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Alternador>. (s.f.).
- Leoni, I. A. (s.f.). *APUNTE DE COEFIEICNTE DE BALASTO*.
- Munoz, J. R. (2011). *Diseno Practico de Cimentaciones Sujetas a Vibración Producida por Maquinaria*. Mexico.
- NEC. Norma Ecuatoriana de la Construcción*. (2015). Quito.
- P. Srinivasulu, C. V. (1990). *Handbook of machine foundations*. New Delhi: McGraw-Hill.
- Srinivasulu, P., & Vaidyanathan, C. V. (1976). *Handbook of Machine Foundations*. G. S. Ramaswamy.
- Suresh, A., Mchael, O., & George, P. (1979). *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Turbines, S. (s.f.). *TITAN 250 ONSHORE GENERATOR SET*.

## **7.2 ANEXOS**

Se presentan a continuación los planos para el ejercicio desarrollado.