



**UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**UAC**

TESIS

---

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE ”.**

---

Presentado por la bachiller:

Cabrera Glandeli, Alexandra

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Civil

Asesora:

Ing. Mitsy Gudiel Cárdenas.

**CUSCO – 2016**



## DEDICATORIA

A mi padre,

Por, haberme brindado su apoyo incondicional, por siempre creer en mi capacidad aún en los momentos difíciles

A mi madre

Por inculcar en mi seguridad y fortaleza para afrontar nuevos desafíos y por ser la motivación de mi vida.

A mi hermana

Por sus palabras de aliento, que me impulsaron a continuar.



## AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi agradecimiento a Mi padre, Mi madre y Mi hermana Sharely por su amor incondicional, por su apoyo constante durante mi faceta como estudiante, sus sacrificios y darme las herramientas para llegar a este día.

Así mismo agradecer la asesoría de la Ing. Mitsy Gudiel Cárdenas, quien ha tenido la dedicación para desarrollar la investigación, por su gran ayuda y comprensión expresadas hacia mi persona durante el desarrollo del mismo.

Agradezco el apoyo brindado por la Empresa de Generación Eléctrica EGEMSA, por permitirme usar la información necesaria concerniente a la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.



## RESUMEN

Actualmente la evolución en el diseño sísmico ha permitido adoptar un código de construcción para cubrir dicha solicitud, es común pensar y confiar que el diseño para esta carga es suficiente para que una estructura pueda resistir solicitudes de otras fuentes diferentes.

La estructura seleccionada para este estudio es una Casa de Máquinas. Es así que se realizó un estudio descriptivo para reconocer cuales son las diferencias significativas en los parámetros dinámicos y de respuesta global, a través de un análisis dinámico se ha logrado examinar las implicancias ante los casos de vibración generadas y asumidas por el sistema estructural.

Las respuestas dinámicas de las fuentes evaluadas no muestran una diferencia significativa de las propiedades dinámicas de la estructura. Los resultados de respuesta global registrados para fuentes diferentes de excitación han sido comparados con los resultados registrados ante la fuente de excitación por vibración sísmica. De esta manera, se han analizado los efectos de las acciones dinámicas sobre la estructura, los que muestran ser más influyentes en el caso sísmico y son significativamente mayores que aquellos registrados para otras solicitudes.

Palabras clave:

Parámetros dinámicos, excitaciones dinámicas, respuesta estructural global, vibraciones sísmicas, código de construcción sísmico.



## ABSTRACT

Seismic design has developed through years allowing to adopt a building code, which pretends to control effects of this one. Usually we believe and trust that this load's design is enough so the structure would be able to resist at the moment of facing different source loads.

Hydropower's house has been selected for this scope. Identifying dynamic and global response parameters plays a fundamental role and it is the main objective of this scope, In order to contrast dynamic properties and global structural response. It has been done a dynamic analysis, which has supported the results to evaluate the effects of vibrations generated on structural system. There are no meaningful differences concerning to dynamic responses. In the other hand, the comparison between different sources of vibration and seismic source allowed to show that the most influential force that the structure gets is the seismic one

Key words:

Harmonic excitation, pulse excitation, dynamics properties, structure's global response, seismic vibrations, seismic building code.



## INTRODUCCIÓN

La presente investigación enfoca sus estudios en la estructura de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu, identificándola como una infraestructura imprescindible en el proceso de generación de energía eléctrica. Dadas las condiciones de servicio que asume y por estar ubicada en una zona sísmica, será de importancia en el campo de la Ingeniería Estructural, evaluar el comportamiento dinámico ante las diversas fuentes de vibración forzada a las que es sometida dicha estructura.

La magnitud de las vibraciones pueden ser descritas en términos de frecuencia, aceleración, velocidad o desplazamiento, a nivel estructural llegan a generar en algunos casos de sobreesfuerzos en los elementos que la constituyen, por ejemplo: fatiga, deformaciones o tensiones; estos factores indudablemente repercuten en las actividades profesionales o procesos productivos que se realicen en el interior de la estructura.

Por lo tanto, se ha considerado que las vibraciones deben ser evaluadas en función a los efectos que producen, medir cómo y en qué nivel afectan a la estructura, evaluando si son tolerables o no para la estructura y mantener de esta manera un rango seguro de las deformaciones generadas con respecto a un valor límite, y sobretodo basándonos en que las máximas sollicitaciones deben ser las sísmicas.

En el campo de estudio de las estructuras afectadas por vibraciones forzadas, el análisis modal juega un papel importante al momento de identificar los parámetros dinámicos y de respuesta estructural, será muy útil usarlo como una herramienta para establecer si las fuentes de vibración forzadas son capaces de generar deformaciones estructurales significativas, o caso contrario si tienen amplitudes que adoptan valores moderados, con lo que podremos definir si son fuentes de vibración comunes que no son capaces de excitar a la estructura, además que sus valores de entrada no son semejantes para lograr simular una excitación sísmica. Bajo estas condiciones se estudió el comportamiento dinámico de la estructura, en cuanto a la magnitud de parámetros dinámicos y parámetros estructurales globales.



## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Identificación del problema.....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Descripción del problema.....	1
1.1.2. Formulación interrogativa del problema.....	2
1.1.2.1. Formulación interrogativa del problema general.....	2
1.1.2.2. Formulación interrogativa del problema específico.....	2
1.1.2.2.1. Problema específico n°01.....	2
1.1.2.2.2. Problema específico n°02.....	3
1.1.2.2.3. Problema específico n°03.....	3
1.1.2.2.4. Problema específico n°04.....	3
1.1.2.2.5. Problema específico n°05.....	3
<b>1.2. Justificación e importancia.....</b>	<b>3</b>
1.2.1. Justificación técnica.....	3
1.2.2. Justificación social.....	4
1.2.3. Justificación por viabilidad.....	5
1.2.4. Justificación por relevancia.....	6
<b>1.3. Limitaciones de la investigación.....</b>	<b>7</b>
<b>1.4. Objetivo de la investigación.....</b>	<b>7</b>
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivo específico.....	8
1.4.2.1. Objetivo específico n°01.....	8
1.4.2.2. Objetivo específico n°02.....	8
1.4.2.3. Objetivo específico n°03.....	8
1.4.2.4. Objetivo específico n°04.....	8
1.4.2.5. Objetivo específico n°05.....	8
<b>1.5. Hipótesis.....</b>	<b>9</b>
1.5.1. Hipótesis general.....	9
1.5.2. Sub hipótesis.....	9
1.5.2.1. Sub hipótesis n°01.....	9
1.5.2.2. Sub hipótesis n°02.....	9
1.5.2.3. Sub hipótesis n°03.....	9
1.5.2.4. Sub hipótesis n°04.....	9
1.5.2.5. Sub hipótesis n°05.....	10



**1.6. Definición de variables ..... 10**

1.6.1. Variables independientes ..... 10

1.6.2. Variables dependientes..... 11

1.6.3. Operacionalización de variables ..... 13

**Capítulo ii: marco teórico..... 14**

**2.1. Antecedentes de la tesis ..... 14**

2.1.1. Antecedentes a nivel nacional ..... 14

2.1.1.1. "Evaluación estructural de construcciones históricas en la costa peruana utilizando tecnologías modernas: el caso del hotel "el comercio" en lima" ..... 14

2.1.1.2. "Control de vibraciones para casas de tierra en Perú"..... 16

2.1.2. Antecedentes a nivel internacional..... 17

2.1.2.1. "Estudio del comportamiento dinámico de tres edificios de concreto de la pontificia universidad javeriana mediante vibraciones ambientales" ..... 17

2.1.2.2. "Análisis de vibraciones en una casa de máquinas de la central hidroeléctrica basada en la interacción fluido- estructura usando métodos numéricos". ..... 18

**2.2. Bases teórico-científicas ..... 19**

Conceptos básicos de dinámica ..... 19

2.2.1. Características físicas de estructuras..... 19

2.2.1.1. Masa ..... 19

2.2.1.2. Rigidez..... 21

2.2.1.2.1. Mecanismo elástico descrito por la ley de hooke ..... 21

2.2.1.2.2. Propiedades de los materiales ..... 22

2.2.1.2.3. Cálculo de la rigidez de un sistema empotrado ..... 26

2.2.1.3. Amortiguamiento ..... 28

2.2.2.3.1. Origen de las fuerzas de amortiguamiento ..... 28

2.2.2.3.2. Características del amortiguamiento viscoso ..... 29

2.2.2.3.3. Factor de amortiguamiento ( $\xi$ ) ..... 30

2.2.2.3.4. Sistemas con amortiguamiento proporcional- rayleigh ..... 31

2.2.2.3.4. Importancia del amortiguamiento en la dinámica ..... 34

2.2.2. Grados de libertad ..... 34

2.2.3. Sistemas dinámicos ..... 36

2.2.4. Vibración libre..... 36

2.2.4.1.1. Sistemas no amortiguados ..... 36





- 2.2.4.1.2. Sistemas amortiguados ..... 44
- 2.2.5. Vibración forzada ..... 47
  - 2.2.5.1. Ecuación de movimiento y equilibrio dinámico ..... 48
  - 2.2.5.2. Osciladores simples. .... 49
- 2.2.6. Respuesta de sistemas de un grado de libertad ..... 51
  - 2.2.6.1. Excitación armónica ..... 51
    - 2.2.6.1.1. Sistemas sin amortiguación ..... 52
    - 2.2.6.1.2. Sistemas con amortiguación ..... 54
    - 2.2.6.1.3. Respuesta máxima ..... 55
    - 2.2.6.1.4. Factor de amplificación ..... 56
    - 2.2.6.1.5. Respuesta ante un generador de vibración ..... 59
  - 2.2.6.2. Excitaciones transitorias ..... 61
    - 2.2.6.2.1. Respuesta elástica ..... 61
      - 2.2.6.2.1. Carga impulsiva e integral de duhamel para sistemas amortiguados ..... 62
    - 2.2.6.2.2. Efectos de la forma de pulso ..... 63
    - 2.2.6.2.3. Función rampa ..... 64
    - 2.2.6.2.4. Efectos del amortiguamiento viscoso ..... 67
  - 2.2.6.3. Excitación sísmica ..... 67
    - 2.2.6.3.1. Fuerzas sísmicas ..... 67
    - 2.2.6.3.2. Espectros de diseño en la dirección horizontal ..... 69
    - 2.2.6.3.3. Definición de la acción sísmica usando normativas ..... 71
    - 2.2.6.3.4. Normativa sismo resistente peruana (030 1998). ..... 71
    - 2.2.6.3.5. Excitación sísmica ..... 73
    - 2.2.6.3.6. Respuesta a una excitación sísmica ..... 76
  - 2.2.6.4. Modelos dinámicos ..... 78
    - 2.2.6.4.1. Métodos de modelado dinámico ..... 79
    - 2.2.6.4.2. Respuesta dinámica de un sistema. .... 82
    - 2.2.6.4.3. Modos de vibración de un edificio – análisis modal ..... 83
    - 2.2.6.4.4. Análisis espectral ..... 84
    - 2.2.6.4.5. Criterio de combinación de la respuesta modal ..... 84
- 2.2.7. Parámetros estructurales globales ..... 86
  - 2.2.7.1. Peso efectivo modal ..... 86
  - 2.2.7.2. Fuerza cortante en la base “v” ..... 87
    - 2.2.7.2.1. Fuerza cortante mínima ..... 90
  - 2.2.7.3. Desplazamiento modal máximo. .... 91



- 2.2.7.3.1. Deflexión lateral. Deriva o distorsión .....91
- 2.2.7.3.2. Efecto de la deriva en una estructura:.....93
- 2.2.8. Vibraciones.....95
  - 2.2.8.1. Tipos de vibración .....95
    - 2.2.8.1.1. Parámetros de la vibración.....97
    - 2.2.8.1.2. Medición de vibraciones de turbina francis transductores de desplazamiento .....98
    - 2.2.8.1.3. Registros de vibraciones ..... 100
    - 2.2.8.1.4. Gráficos generados por la señal ..... 100
  - 2.2.8.2. Turbina hidráulica francis ..... 102
    - 2.2.8.2.1. Elementos principales de una turbina hidráulica ..... 103
    - 2.2.8.2.2. Principio de funcionamiento de una turbo máquina ..... 104
  - 2.2.8.3. Puente grúa ..... 105
    - 2.2.8.3.1. Componentes de un puente grúa..... 105
    - 2.2.8.3.2. Movimientos del puente grúa ..... 106
    - 2.2.8.3.3. Funcionamiento: motores de corriente alterna ..... 106
    - 2.2.8.3.4. Líneas de influencia ..... 107
- CAPÍTULO III: METODOLOGÍA ..... 109**
  - 3.1. Metodología de la investigación ..... 109**
    - 3.1.1. Tipo de investigación..... 109
    - 3.1.2. Nivel de la investigación ..... 109
      - 3.1.2.1. Descriptivo ..... 109
    - 3.1.3. Método de investigación..... 110
      - 3.1.3.1. Método hipotético - deductivo..... 110
  - 3.2. Diseño de investigación ..... 110**
    - 3.2.1.1. Diseño metodológico no experimental ..... 110
    - 3.2.1.2. Tipo transversal – descriptivo ..... 111
    - 3.2.1.3. Diseño de ingeniería..... 113
  - 3.3. Población y muestra ..... 114**
    - 3.3.1. Población ..... 114
      - 3.3.1.1. Descripción de la población ..... 114
      - 3.3.1.2. Cuantificación de la población..... 121
    - 3.3.2. Muestra ..... 121
      - 3.3.2.1. Descripción de la muestra ..... 121



- 3.3.2.2. Cuantificación de la muestra ..... 121
- 3.3.2.3. Método de muestreo ..... 121
- 3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra..... 122
- 3.3.3. Criterios de inclusión..... 122
- 3.4. Instrumentos ..... 124**
- 3.4.1. Instrumentos metodológicos ..... 124
- 3.4.2. Formatos de recolección de datos excel:..... 124
  - 3.4.2.1. Propiedades de los materiales ..... 124
  - 3.4.2.2. Aporte de rigidez estructural ..... 125
  - 3.4.2.3. Metrado de cargas ..... 126
  - 3.4.2.4. Registro de vibraciones de la turbina hidráulica francis ..... 127
  - 3.4.2.5. Características del modelo de análisis – turbina hidráulica ..... 128
  - 3.4.2.6. Características del modelo de análisis – puente grúa..... 129
  - 3.4.2.7. Definir carga del puente grúa. .... 130
  - 3.4.2.8. Líneas de influencia en la viga principal del puente grúa..... 131
  - 3.4.2.9. Parámetros de sitio ..... 132
  - 3.4.2.10. Irregularidad estructural ..... 133
  - 3.4.2.11. Amortiguamiento proporcional rayleigh..... 136
  - 3.4.2.12. Factor de amplificación ..... 137
  - 3.4.2.13. Ángulo de fase ..... 138
- 3.4.3. Formatos de recolección de datos – matlab ..... 139
  - 3.4.3.1. Periodo estructurales y modos de vibración. .... 139
  - 3.4.3.2. Desplazamiento máximo ..... 140
- 3.4.4. Formato de recolección de datos – ETABS. .... 141
  - 3.4.4.1. Desplazamientos máximos ..... 141
  - 3.4.4.2. Periodo estructural ..... 142
  - 3.4.4.3. Fuerzas cortantes en la base ..... 143
  - 3.4.4.4. Derivas de entrepiso ..... 144
- 3.4.2. Instrumentos de ingeniería..... 144
- 3.5. Procedimiento de recolección de datos ..... 145**
- 3.5.1. Propiedades de los materiales ..... 145
- 3.5.2. Rigidez estructural ..... 147
- 3.5.3. Metrado de cargas ..... 152
- 3.5.4. Registro de vibraciones de la turbina hidráulica francis ..... 154
- 3.5.5. Características dinámicas del sistema – turbina hidráulica francis. .... 160



3.5.6. Características dinámicas sistema - puente grúa ..... 165

3.5.7. Definición de carga puente grúa. .... 169

3.5.8. Líneas de influencia en la viga principal del puente grúa..... 170

3.5.9. Líneas de influencia en la viga carrilera. .... 175

3.5.11. Parámetros vibración sísmica ..... 184

**3.6. Procedimiento del análisis de datos ..... 194**

3.6.1. Análisis de parámetros dinámicos ..... 194

3.6.1.1.1. Análisis periodo natural; sistema con vibraciones por turbina Francis..... 194

3.6.1.1.2. Análisis periodo natural; sistema con vibración por puente grúa. .... 197

3.6.1.1.3. Análisis del periodo natural de la estructura con vibración sísmica. .... 200

3.6.1.2. Análisis del amortiguamiento del sistema. .... 205

3.6.1.2.1. Análisis del amortiguamiento proporcional del sistema con vibración por turbina francis. .... 205

3.6.1.2.2. Análisis del amortiguamiento proporcional del sistema con vibración por puente grúa..... 208

3.6.1.2.1. Análisis del amortiguamiento proporcional del sistema con vibración sísmica ..... 212

3.6.1.3. Análisis del factor de amplificación ..... 216

3.6.1.4. Análisis cambio de ángulo de fase..... 220

3.6.2. Análisis de parámetros globales de respuesta ..... 223

3.6.2.1. Análisis de respuesta máximo – resultado etabs ..... 223

3.6.2.1.1. Análisis de máximo desplazamiento lateral del sistema con vibración por turbina francis ..... 223

3.6.2.1.2. Análisis desplazamiento lateral del sistema con vibraciones por puente grúa ..... 225

3.6.2.1.3. Análisis de máximo desplazamiento lateral del sistema con vibraciones sísmicas – resultados etabs..... 228

3.6.2.1.4. Análisis de fuerza cortante máxima del sistema con vibraciones por turbina francis..... 231

3.6.2.1.5. Análisis de fuerza cortante máxima del sistema con vibración por puente grúa. .... 232

3.6.2.1.6. Análisis de fuerza cortante máxima del sistema con vibraciones sísmicas ..... 234



3.6.2.1.7. Análisis de deriva o distorsión del sistema con vibraciones por turbina Francis.....236

3.6.2.1.8. Análisis de deriva o distorsión del sistema con vibraciones por puente grúa. ....237

3.6.2.1.9. Análisis de deriva o distorsión del sistema con vibraciones sísmicas. ....239

**CAPITULO IV: RESULTADOS .....242**

**4.1. Parámetros dinámicos.....242**

4.1.1. Periodo estructural .....246

4.1.2. Frecuencia natural .....246

4.1.3. Frecuencia circular.....247

4.1.3. Amortiguamiento crítico. ....247

4.1.4. Factor de amplificación dinámica.....249

4.1.5. Cambio de ángulo de fase. ....250

**4.2. Parámetros globales de respuesta estructural. ....251**

4.2.1. Desplazamientos laterales máximos totales. ....251

4.2.2. Fuerzas cortantes. ....253

4.2.3. Deriva o distorsión de entrepiso para diferentes excitaciones.....254

**4.3. Verificación de resultados .....255**

**CAPITULO V: DISCUSIÓN .....261**

**CONCLUSIONES: .....269**

**RECOMENDACIONES.....275**

**GLOSARIO .....279**

**BIBLIOGRAFÍA: .....285**

**LINK GRAFÍA: .....288**

**ANEXOS .....290**

**Anexo n°01.....290**

Cálculo del parámetros dinámicos: método de solución por determinantes en la ecuación de movimiento .....290

**Anexo n°02.....295**

Cálculo del parámetros dinámicos: resultados en etabs.....295

**Anexo n°03.....298**



Parámetros de respuesta global – resultados matlab.....	298
Análisis de máxima respuesta del sistema con vibración por turbina francis – resultados etabs.....	298
Análisis de máxima respuesta del sistema con vibraciones por puente grúa .....	299
<b>Anexo n°04.....</b>	<b>301</b>
Parámetros dinámicos - resultados en matlab .....	301
Parámetros dinámicos - resultados en matlab .....	303
<b>Anexo n°05: .....</b>	<b>313</b>
Solución de líneas de influencia .....	313
<b>Anexo n°06: .....</b>	<b>316</b>
Algoritmo en matlab: análisis modal.....	316
<b>Anexo n°07: .....</b>	<b>321</b>
Reporte de resultados etabs .....	321



**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla N° 1: Operacionalización de variables. .... 13

Tabla N° 2: Porcentaje de Amortiguamiento Crítico..... 31

Tabla N° 3: Valores típicos de periodo para estructuras y muros de 1 y 2 pisos.  
..... 42

Tabla N° 4: Carga viva uniforme. .... 87

Tabla N° 5: Metodología de la investigación. .... 112

Tabla N° 6: Formato para recolección Medrado de cargas ..... 126

Tabla N° 7: Formato para recolección Componentes del movimiento de la turbina  
hidráulica Francis. .... 127

Tabla N° 8: Formato para recolección de Parámetros del sistema dinámico. 128

Tabla N° 9: Formato para recolección de características dinámicas..... 129

Tabla N° 10: Formato para definir la carga del puente grúa ..... 130

Tabla N° 11: Formato para cálculo de Líneas de Influencia en la viga principal  
del puente grúa ..... 131

Tabla N° 12: Formato para recolección cuadro resumen parámetros de sitio.132

Tabla N° 13: Formato para cálculo de irregularidad estructural. .... 133

Tabla N° 14: Formato para recolección de datos Amortiguamiento Proporcional  
Rayleigh. .... 136

Tabla N° 15: Formato para recolección de datos del Factor De Amplificación  
Dinámica. .... 137

Tabla N° 16: Formato para recolección de datos del cambio de ángulo de fase.  
..... 138

Tabla N° 17: Cálculo de los Periodo Estructurales, Frecuencia Circular y Modos  
De Vibración..... 139

Tabla N° 18: Formato para análisis de datos, cálculo de Desplazamientos para  
diferentes solicitaciones de carga - Matlab. .... 140

Tabla N° 19: Formato para análisis de datos, cálculo Desplazamiento Máximos  
ante diferentes solicitaciones – Resultados ETABS..... 141

Tabla N° 20: Formato para análisis de datos, cálculo del Periodo Estructural con  
Vibración Libre– Resultados ETABS..... 142

Tabla N° 21: Formato para análisis de datos, cálculo de Fuerzas Cortantes ante  
unas diferentes solicitaciones de carga. .... 143



Tabla N° 22: Formato para análisis de datos, cálculo de Derivas Máximas ante diferentes solicitaciones de carga. .... 144

Tabla N° 23: Cálculo de la rigidez. .... 150

Tabla N° 24: Cálculo de la rigidez Nivel Válvula Esférica. .... 151

Tabla N° 25: Carga viva uniforme. .... 153

Tabla N° 26: Metrado de cargas ..... 153

Tabla N° 27: Componentes del movimiento de la turbina hidráulica Francis. 157

Tabla N° 28: Amplitud de vibración de Turbina hidráulica Francis..... 164

Tabla N° 29: características de diseño del puente grúa..... 167

Tabla N° 30: características dinámicas del motor de puente grúa. .... 167

Tabla N° 31: Líneas de Influencia ..... 174

Tabla N° 32: Líneas de influencia en la viga carrilera. .... 183

Tabla N° 33: Cuadro resumen parámetros de sitio. .... 187

Tabla N° 34: Irregularidad estructural ..... 191

Tabla N° 35: Amortiguamiento Proporcional Rayleigh Sistema con Vibración por Turbina Hidráulica Francis. .... 206

Tabla N° 36: Cálculo de la Amortiguación del Sistema. .... 209

Tabla N° 37: Amortiguamiento Proporcional Rayleigh Sistema con Vibración Sísmica. .... 213

Tabla N° 38: Cálculo del factor de amplificación del sistema..... 217

Tabla N° 39: Cálculo del factor de amplificación del sistema en vibración por Turbina Hidráulica Francis. .... 217

Tabla N° 40: Cálculo del factor de amplificación del sistema en vibración por Puente grúa..... 217

Tabla N° 41: Cálculo del Factor de Amplificación del Sistema en Vibración Sísmica. .... 218

Tabla N° 42: Cambio de Ángulo de Fase ante Vibración por Turbina Francis. .... 220

Tabla N° 43: Cambio de Ángulo de Fase ante Vibración por Puente Grúa.... 220

Tabla N° 44: Cambio de Ángulo de Fase para casos de Vibraciones Evaluadas. .... 221

Tabla N° 45: Desplazamiento lateral Máximo ante Vibraciones por Puente Grúa - Resultados ETABS. .... 226





Tabla N° 46: Desplazamiento lateral por Vibraciones Sísmicas - Resultados ETABS. .... 228

Tabla N° 47: Fuerzas Cortantes ante una Vibración por Turbina Francis. .... 231

Tabla N° 48: Fuerzas cortantes ante una vibración por puente grúa. .... 232

Tabla N° 49: Fuerzas Cortantes ante una Vibración Sísmica. .... 234

Tabla N° 50: Derivas Máximas ante una Vibración Turbina Hidráulica Francis. .... 236

Tabla N° 51: Derivas Máximas ante una Vibración por Puente Grúa..... 237

Tabla N° 52: Derivas Máximas ante una Vibración Sísmica. .... 240

Tabla N° 53: Diferencias entre los Parámetros Dinámicos para cada de Fuente de Excitación..... 242

Tabla N° 54: Parámetros Dinámicos del Sistema con Vibraciones por Turbina Francis. .... 243

Tabla N° 55: Parámetros Dinámicos del Sistema con Vibraciones por Puente Grúa. .... 243

Tabla N° 56: Parámetros Dinámicos del Sistema con Vibraciones Sísmicas. 244

Tabla N° 57: Magnitudes para el primer modo de vibración. .... 245

Tabla N° 58: Diferencia de magnitudes para el primer modo de vibración. ... 245

Tabla N° 59: Comparación de Valores Promedio Amortiguamiento Crítico Vs Amortiguamiento Rayleigh. .... 248

Tabla N° 60: Resumen de Desplazamiento lateral Máximos por nivel- Dirección X..... 251

Tabla N° 61: Resumen de Fuerzas Cortantes. .... 253

Tabla N° 62: Cortante máximo en la base ..... 254

Tabla N° 63: Resumen Derivas Máximas de entrepiso..... 254

Tabla N° 64: Resumen de periodos de vibración resultados Etabs y Matlab. 257

Tabla N° 65: Cálculo Estadístico tendencia proporcionalmente lineal..... 258

Tabla N° 66: Resumen de periodos de vibración resultados Etabs y solución con determinantes. .... 258

Tabla N° 67: Cálculo de la Frecuencia Natural y Periodo Estructural con Análisis Modal. .... 292

Tabla N° 68: Periodo Estructural con Vibraciones por Turbina Francis. .... 295

Tabla N° 69: Periodo Estructural con Vibraciones por Puente Grúa. .... 296



Tabla N° 70: Periodo Estructural con Vibración Sísmica. ....	297
Tabla N° 71: Desplazamientos por Turbina Hidráulica Francis Resultados - Matlab. ....	298
Tabla N° 72: Desplazamientos por Puente Grúa Resultados - Matlab.....	299



**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura N° 1: Rigidez Del Elemento..... 21

Figura N° 2: Daño Registrado En Probetas Sometidas A Compresión. .... 22

Figura N° 3. Diagrama Esfuerzo – Deformación Unitaria..... 23

Figura N° 4: Desplazamientos Registrados Durante Carga Y Descarga Aplicando La Ley De Hooke. .... 24

Figura N° 5: Modelo Elastoplástico. .... 25

Figura N° 6: Estructura Modelizada Como Un Grado De Libertad. A) Pórtico, B) Pórtico Con La Masa Concentrada Al Nivel De Viga. C) Modelo Dinámico. .... 35

Figura N° 7: Modelo Con Un Grado De Libertad. A) Modelo Conservativo, B) Modelo Con Amortiguamiento C) Modelo Sísmico..... 35

Figura N° 8: Esquema De Un Oscilador Con Tres Grados De Libertad..... 36

Figura N° 9: Modelo De Un Grado De Libertad No Amortiguado..... 37

Figura N° 10: Vibraciones Libres No Amortiguadas..... 39

Figura N° 11: Respuesta En Vibración Libre Sin Amortiguación..... 39

Figura N° 12: Velocidad De Reacción, Diferentes “T” Periodos..... 41

Figura N° 13: Gráfica Del Comportamiento De Una Oscilador Simple Sin Amortiguamiento..... 43

Figura N° 14. Modelo Un Grado De Libertad Con Amortiguamiento..... 44

Figura N° 15: Vibraciones Libres Amortiguadas. .... 45

Figura N° 16: Efectos Del Amortiguamiento En Las Vibraciones Libres. .... 46

Figura N° 17. Principio De D´Alembert, A) Fuerza Aplicada. B) Modelo Sísmico. .... 49

Figura N° 18: Sistema Lineal Amortiguado De Un Grado De Libertad..... 49

Figura N° 19: Tipos De Cargas Dinámicas. A) Armónica B) Periódicas C) Cuasi Periódica D, E) Fuerzas Impulsivas F) Carga Dinámica General G) Aceleración Sísmica Del Terreno ..... 51

Figura N° 20: Desplazamiento Inducido Por Fuerza Armónica. .... 56

Figura N° 21: Factor De Amplificación Dinámica. .... 57

Figura N° 22: Generador De Vibración A) Posición Inicial, B) Posición Y Fuerzas En El Tiempo, T. .... 59

Figura N° 23: Carga De Impulso. .... 62

Figura N° 24: Representación De Tipos De Fuerzas De Pulso..... 64



Figura N° 25: Fuerza De Pulso Tipo Rampa..... 65

Figura N° 26: Factor De Amplificación Dinámica Para Una Fuerza De Pulso.. 67

Figura N° 27: Filtrado De Una Señal Sísmica. .... 68

Figura N° 28: Obtención Del Espectro De Diseño..... 69

Figura N° 29: Aclaración Del Espectro De Respuesta. .... 69

Figura N° 30: Espectro Elástico De Respuesta..... 71

Figura N° 31: Edificio De Dos Pisos Sometido A Excitación Sísmica. .... 74

Figura N° 32: Diagrama De Cuerpo Libre. .... 74

Figura N° 33: Edificio De N Pisos Sometido A Movimientos Sísmicos..... 75

Figura N° 34: Modelo De Una Estructura..... 78

Figura N° 35: Modelos Dinámicos..... 79

Figura N° 36: Sistema De Varios Grados De Libertad. .... 80

Figura N° 37: Modelo Dinámico De Un Pórtico Cortante. .... 80

Figura N° 38: Modelo De Varios Grados De Libertad.. .... 81

Figura N° 39: Tres Primeros Modos De Vibración De Una Estructura. .... 83

Figura N° 40: Acción Sísmica Sobre Edificio. .... 88

Figura N° 41: Sistema De Oscilaciones Equivalentes..... 90

Figura N° 42: Fuerzas Laterales Y Cortantes Generadas Debido Al Movimiento Del Terreno. .... 90

Figura N° 43: Desplazamientos De Entrepiso. .... 92

Figura N° 44: Detalles En La Parte Inferior De Las Columnas..... 93

Figura N° 45: Distribución De Desplazamiento Total Generado. .... 93

Figura N° 46: Movimiento Sinusoidal ..... 97

Figura N° 47: Sensores De Desplazamiento Y Transductores De Corriente. .. 99

Figura N° 48: Unidad De Adquisición De Datos. .... 100

Figura N° 49: Ubicación De Sensores 90° ..... 100

Figura N° 50: Monitoreo En Tiempo Real De La Frecuencia De Rotación, Desplazamiento En Ambas Direcciones De La Turbina Hidráulica Francis. ... 101

Figura N° 51: Grafico En Base Al Tiempo- Desplazamiento De La Turbina. . 101

Figura N° 52: Turbina Francis. .... 102

Figura N° 53: Elementos De Una Turbina Francis. .... 104

Figura N° 54: Partes De La Turbina Francis. .... 104

Figura N° 55: Componentes Del Puente Grúa. .... 106



Figura N° 56: Planta Típica Casa De Máquinas..... 116

Figura N° 57: Elevación Corte A-A' ..... 117

Figura N° 58: Planta Nivel 1° . ..... 118

Figura N° 59: Planta Nivel 2° Y 3°..... 119

Figura N° 60: Planta Nivel 4° ..... 120

Figura N° 61: Resumen Metrado De Cargas. .... 154

Figura N° 62: Pantalla De Vibraciones Turbina Hidráulica Francis. .... 156

Figura N° 63: Velocidad De Rotación Turbina Francis..... 158

Figura N° 64: Desplazamiento En Dirección X Turbina Francis. .... 158

Figura N° 65: Velocidad En Dirección X Turbina Francis..... 158

Figura N° 66: Aceleración En Dirección X Turbina Francis..... 159

Figura N° 67: Oscilador Simple Turbina Hidráulica Francis. .... 160

Figura N° 68: Onda Senoidal Del Voltaje Motor De Corriente Alterna. .... 168

Figura N° 69: Línea De Influencia Para El Máximo Momento En El Tramo A - B;  
Viga Principal Del Puente Grúa..... 175

Figura N° 70: Líneas De Influencia Para Tramo 1..... 181

Figura N° 71: Líneas De Influencia Tramo 2. .... 181

Figura N° 72: Líneas De Influencia Tramo 3. .... 182

Figura N° 73: Espectro De Pseudo - Aceleraciones..... 188

Figura N° 74: Modo De Vibración 1..... 202

Figura N° 75: Modo De Vibración 2..... 203

Figura N° 76: Modo De Vibración 3..... 203

Figura N° 77: Modo De Vibración 4..... 204

Figura N° 78: Amortiguamiento Proporcional Con Vibración Por Turbina Francis.  
..... 206

Figura N° 79: Amortiguamiento Proporcional Del Sistema Con Vibraciones Por  
Puente Grúa..... 210

Figura N° 80: Amortiguamiento Proporcional - Vibración Sísmica. .... 213

Figura N° 81: Amortiguamiento Ante Vibraciones Evaluadas. .... 214

Figura N° 82: Resumen De Factor De Amplificación Para Casos De Vibraciones  
Evaluadas. .... 218

Figura N° 83: Cambio Del Ángulo De Fase Para Diferentes Amortiguamientos.  
..... 221



Figura N° 84: Desplazamiento Lateral Máximos Ante Vibraciones Por Turbina Francis – Resultados Etabs. .... 223

Figura N° 85: Desplazamiento Lateral Máximo Ante Vibraciones Por Turbina Francis. .... 224

Figura N° 86: Desplazamiento Lateral Máximo Caso De Carga Puente Grúa - Resultados Etabs. .... 227

Figura N° 87: Desplazamiento Lateral Por Sismo - Resultados Etabs..... 229

Figura N° 88: Fuerzas Cortantes Por Vibración De La Turbina Francis..... 231

Figura N° 89: Fuerzas Cortantes Ante Una Vibración Por Puente Grúa..... 233

Figura N° 90: Fuerzas Cortantes Ante Una Vibración Sísmica. .... 234

Figura N° 91: Diferencia Entre Periodos Fundamentales Para Cada Fuente De Excitación..... 242

Figura N° 92: Periodo Estructural Vs. Modo De Vibración. .... 246

Figura N° 93: Frecuencia Natural Vs. Modo De Vibración. .... 246

Figura N° 94: Frecuencia Circular Vs. Modo De Vibración. .... 247

Figura N° 95: Amortiguamiento Crítico Vs. Modo De Vibración. .... 247

Figura N° 96: Amortiguamiento Proporcional Rayleigh Vs. Modo De Vibración. .... 248

Figura N° 97: Comparación De Valores Promedio De Amortiguamiento Rayleigh Y Crítico Viscoso..... 249

Figura N° 98: Factor De Amplificación Dinámica Del Sistema Con Vibraciones Por Turbina Hidráulica Francis..... 249

Figura N° 99: Factor De Amplificación Dinámica Del Sistema Con Vibraciones Por Puente Grúa. .... 250

Figura N° 100: Cambio De Angulo De Fase Vs. Relación De Frecuencias De Excitación..... 250

Figura N° 101: Cambio De Angulo De Fase Vs. Relación De Frecuencias De Excitación..... 251

Figura N° 102: Desplazamiento Máximo - Mm..... 252

Figura N° 103: Fuerzas Cortantes..... 253

Figura N° 104: Deriva Máxima De Entrepiso ..... 255

Figura N° 105: Coeficiente De Pearson Entre Los Resultados De Etabs Y Matlab. .... 257



Figura N° 106: Coeficiente De Pearson Entre Los Resultados De Etabs Y La Solución Con Determinantes..... 259

Figura N° 107: Comparación De Periodo Fundamental Entre Resultados Etabs Vs Matlab. .... 259

Figura N° 108: Desplazamientos Por Turbina Hidráulica Francis Resultados - Matlab. .... 298

Figura N° 109: Desplazamientos Por Nivel – Turbina Hidráulica Francis - Matlab. .... 299

Figura N° 110: Desplazamientos Por Puente Grúa Resultados - Matlab. .... 300

Figura N° 111: Desplazamientos Por Nivel - Puente Grúa - Matlab..... 300



## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Identificación del problema.

#### 1.1.1. Descripción del problema.

La Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, se ubica aguas abajo de una tubería forzada de 340 m. de altura. A este lugar llega una cantidad de fluido a gran velocidad, mediante una tubería espiral se direcciona este fluido hasta la Turbina Hidráulica Francis, la fuerza dinámica ejercida por el agua sobre los alabes de la turbina causa su rotación. Se han instalado equipos de mantenimiento de manera complementaria, para asegurar el funcionamiento continuo en la central.

Es necesario citar dichos equipos, pues son la principal fuente de generación de vibraciones al interior de la estructura, básicamente ocurre por la acción del equipo electro – hidráulico, como se especifica a continuación.

Como primera fuente de vibración; la rotación permanente de la turbina hidráulica Francis, que ocupa tres niveles de la estructura y que genera vibraciones de tipo periódico, pues opera de manera continua.

La segunda fuente de vibración; se encuentra en el último nivel de la estructura inducida por el funcionamiento repentino del puente grúa, indispensable para dar mantenimiento a los equipos de generación, y del que se considera que las vibraciones son atribuidas a su motor y que actúan de manera transitoria.

Por último, teniendo en consideración que la estructura se ubica en una zona sísmica, evaluar las vibraciones sísmicas es fundamental.

Como se menciona, la estructura en estudio está destinada a la protección del equipo electro – hidráulico. El funcionamiento de toda esta maquinaria se asume que produce esfuerzos adicionales a la estructura, pues son la causa de problemas como: el incremento de tensiones o sobreesfuerzos en los principales elementos resistentes de la estructura, deterioro de las propiedades de ductilidad de los materiales podría incluso surgir la aparición de fisuras por fatiga del concreto.





Ante las condiciones antes mencionadas, es razonable pensar que las vibraciones toman un papel fundamental en la respuesta de la estructura, debido a que aquellas que se generan sean próximas o lejanas a una estructura producto de acciones dinámicas, son capaces de generar grandes fuerzas y deformaciones que la estructura deberá asumir durante su vida útil.

Entonces, existe la posibilidad que la estructura en estudio modifique de manera significativa las características dinámicas comparadas con las correspondientes a la estructura inicial, es decir antes de instalar todo el equipo electro – hidráulico.

Por otro lado, si las vibraciones generadas muestran alguna influencia en el diseño estructural, en vista de que este último depende netamente de las solicitaciones de carga que serán impuestas a la estructura en su vida útil, interesa saber cuál es la fuerza que gobierna su diseño.

Con lo antes mencionado en la estructura de la casa de máquinas, se evaluó el efecto sobre los parámetros dinámicos y respuesta global de la estructura de la Casa de Máquinas.

### **1.1.2. Formulación interrogativa del problema**

#### **1.1.2.1. Formulación interrogativa del problema general**

¿Qué magnitud tienen los parámetros dinámicos y parámetros globales de respuesta estructural, del sistema dispuesto en la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase respecto de las vibraciones inducidas por la turbina hidráulica Francis, vibraciones por el puente grúa y vibraciones sísmicas?

#### **1.1.2.2. Formulación interrogativa del problema específico**

##### **1.1.2.2.1. Problema específico N°01**

¿Cuáles son las características dinámicas de los parámetros de vibración de la turbina hidráulica Francis ubicada en la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase?

**1.1.2.2.2. Problema específico N°02**

¿Cuáles son las características dinámicas de los parámetros de vibración por el puente grúa ubicado en el sistema estructural de la Casa de Máquinas de la central hidroeléctrica Machupicchu II Fase?

**1.1.2.2.3. Problema específico N°03**

¿Cuáles son las características dinámicas de los parámetros de vibración sísmica, en la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase?

**1.1.2.2.4. Problema específico N°04**

¿Existen diferencias en los parámetros dinámicos de respuesta estructural del sistema: Casa de Máquinas de la central hidroeléctrica Machupicchu II Fase, obtenidos a partir de las vibraciones por la turbina hidráulica Francis, vibraciones por el puente grúa y vibraciones sísmicas?

**1.1.2.2.5. Problema específico N°05**

¿Qué sollicitación vibratoria determina los parámetros globales de respuesta como fuerza cortante, derivas de entrepiso y desplazamientos laterales máximos en la estructura de la Casa de Máquinas de la central hidroeléctrica Machupicchu II Fase, para efectos de diseño?

**1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA****1.2.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA**

Un criterio básico que maneja la Ingeniería Civil – Estructural; muestra la importancia de adoptar un sistema estructural que tenga la capacidad de absorber y disipar energía, ante las diferentes sollicitaciones de carga que se le imponen durante su vida útil, asegurando que esta se deforme en un rango elástico.

Sin embargo, basándonos en el origen de una fuerza externa, esta puede ser estática o dinámica, por ejemplo pueden ser de origen sísmico y también



producto de maquinarias como lo ha sido el caso estudiado, es posible que ante la acción de una fuente dinámica se lleguen a transmitir vibraciones al sistema.

En este sentido la estructura experimentará solicitaciones que podrían ser desfavorables teniendo en cuenta que los efectos dependen de las características propias de la vibración aplicada, es decir, mientras más largas sean la duración y las amplitudes de la vibración actuante mayor será el daño causado. Entonces, cuando nos referimos a vibraciones en estructuras, es necesario estudiar el potencial de sus efectos para descartar su influencia en el nivel de daño que sufre una estructura.

Además, un caso importante que debe ser mencionado en estructuras que albergan maquinaria, es cuando la frecuencia natural del equipo acondicionado coincide con la frecuencia de la estructura. Dicho efecto puede llegar a amplificar la respuesta del equipo.

Desde un enfoque técnico el presente estudio se fundamenta, además en las siguientes razones:

- ✓ Permite conocer la capacidad de respuesta de la estructura, al soportar las vibraciones transmitidas a la misma.
- ✓ Permite definir el sistema estructural, más conveniente para albergar equipos electromecánicos, además que cumpla con las condiciones de operación diaria.
- ✓ Permite identificar las condiciones críticas de resonancia, dentro de unos márgenes adecuados para la estructura.

### 1.2.2. JUSTIFICACIÓN SOCIAL

La importancia de conocer la respuesta de una estructura radica en que se pueden prevenir situaciones e incluso salvaguardar la vida de las personas donde se emplaza dicha estructura. Por ello, teniendo en cuenta la sismicidad de la zona de Machupicchu, lugar donde se ubica la Casa de Máquinas; según la: Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2002; en esta zona es de esperarse que ocurran sismos de 8 grados en escala Richter de intensidad con un periodo de



recurrencia de 50 años. Es importante considerar la existencia de vibraciones por fuente sísmica, además de aquellas que son atribuidas por la maquinaria que alberga dicha estructura.

Desde el enfoque social, las vibraciones que actúan sobre una estructura, en este caso una Casa de Máquinas, suelen generar incertidumbre e incomodidad en la población de este contexto, quienes incluso asumen que la estructura llega a registrar una pérdida de servicio a causa de las vibraciones, este es un problema usual que enfrentan las empresas que manejan su producción bajo el uso de maquinarias de alto rendimiento, entonces hace necesario entender bien la generación de las vibraciones, sus características y sus efectos para que puedan ser controladas. Por lo tanto, el estudio pretende evaluar la respuesta estructural, si las vibraciones llegan a causar efectos adversos en la Casa de Máquinas.

Dar a conocer los efectos de las vibraciones en una estructura muestra a la población la importancia de tener en cuenta la implementación de una normativa de vibraciones que se fundamente como punto de partida en criterios estructurales y significa un aporte para los estudiantes de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Andina del Cusco.

### **1.2.3. JUSTIFICACIÓN POR VIABILIDAD**

A nivel de recursos económicos, la investigación ha sido viable, pues ha requerido una inversión accesible para su elaboración.

A nivel de recursos materiales, se consiguieron los registros de vibración de la turbina hidráulica Francis, las especificaciones de diseño y fabricación del equipo electro – hidráulico, planos estructurales de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica II Fase, materiales que fueron otorgados en su totalidad por la empresa de generación eléctrica (EGEMSA S.A.) y que fueron indispensables para iniciar la investigación.

A nivel de herramientas, ha sido necesario usar programas computacionales accesibles y que además fueran comercialmente confiables, los que han permitido desarrollar cada objetivo planteado en la presente investigación, como



los que mencionamos a continuación: ETABS v2015, Matlab R2012b, AutoCAD y Excel.

#### 1.2.4. JUSTIFICACIÓN POR RELEVANCIA

Convencionalmente, en una estructura como la Casa de Máquinas, donde los equipos que se alojan son la clave del sistema de producción en una Central Hidroeléctrica, estos mismos son los que generan magnitudes de vibración que deben evaluarse para saber si son toleradas o no por la estructura. De manera que se pueda valorar el grado en que afectan a dicha, pues tendrían consecuencias en las personas, estructuras cercanas, o actividades que se realicen en el interior.

En relación a los posibles efectos se puede mencionar:

- Sobreesfuerzos en los elementos que forman la estructura (deformaciones, fatiga, tensiones).
- Efectos psicológicos o de sensaciones en las personas (mecánicos, acústicos, ópticos).
- Efectos en actividades profesionales o procesos productivos (problemas con las tolerancias de algunos productos,) así como también incremento de tensiones en maquinaria (deformaciones, fatiga, esfuerzos).

Con lo antes expuesto, los criterios de evaluación de una estructura ante vibraciones precisan ser mejorados, surge entonces la necesidad de crear una normativa que caracterice las vibraciones en la construcción.

Actualmente se cuenta con una normativa basada en la Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones mineras, pero esta no toma en cuenta la frecuencia, ni el tipo de suelo donde está ubicada la estructura en estudio, por lo que no se adapta a nuestras condiciones reales del entorno. Sin embargo, es posible mejorar la normativa de construcción estableciendo criterios que involucren las diferentes tipologías y funcionalidades estructurales sometidas a vibraciones. De manera que permita identificar los valores límites para aceptar vibraciones en función de criterios estructurales, criterios psicológicos y criterios



de calidad de producción para la población que lo requiera. Por lo tanto, permitirá reconocer los efectos esperables ante la acción de las vibraciones tanto en estructuras como para el personal que trabaja en el interior.

### **1.3. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación se limita al sistema estructural de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

- La investigación se limita al estudio del comportamiento dinámico de la estructura de la casa de máquinas de la central hidroeléctrica Machupicchu, enfocándose en el efecto de la vibración inducida por rotación de la Turbina Hidráulica Francis que funciona para un determinado caudal de 31 m<sup>3</sup>/seg,
- El puente grúa tiene una capacidad de izaje de 210 ton.
- Se usaron los estudios de caracterización de roca presentados en los informes de geología a la Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu EGEMSA S.A durante la construcción del proyecto de la Casa de Máquinas.
- Para el modelamiento de la estructura se tomó como fuente la configuración estructural y propiedades mecánicas de los materiales que han sido mostradas en los planos construcción.
- El material evaluado es de concreto armado con una resistencia a la compresión 275 kg/cm<sup>2</sup>, considerando dicho material el ratio de amortiguamiento es de 5%.
- Los parámetros dinámicos; consideran evaluar solo la dirección más crítica que muestre el sistema, después de haber realizado el cálculo del aporte de rigidez estructural.

### **1.4. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la magnitud de los parámetros dinámicos y parámetros globales de respuesta estructural del sistema dispuesto en la Casa de Máquinas de la Central



Hidroeléctrica Machupicchu II fase, con respecto a vibraciones inducidas por rotación de la Turbina hidráulica Francis, el puente grúa y sísmicas.

#### **1.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO**

##### **1.4.2.1. Objetivo específico N°01**

Identificar las características dinámicas de los parámetros de la vibración de la turbina hidráulica Francis ubicada en la Casa de Máquinas de La Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

##### **1.4.2.2. Objetivo específico N°02**

Identificar las características dinámicas de los parámetros de la vibración del puente grúa ubicada en la Casa de Máquinas de La Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

##### **1.4.2.3. Objetivo específico N°03**

Identificar las características dinámicas de los parámetros de la vibración sísmica, ubicada en la Casa de Máquinas de La Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

##### **1.4.2.4. Objetivo específico N°04**

Determinar la magnitud de las diferencias de los valores de parámetros dinámicos estructurales de la Casa de Máquinas de La Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, obtenidos a partir de las vibraciones por la turbina hidráulica Francis, vibraciones por el puente grúa y vibraciones sísmicas.

##### **1.4.2.5. Objetivo específico N°05**

Identificar los parámetros globales de respuesta estructural como fuerza cortante, desplazamientos laterales máximos y derivas de entrepiso que determinan el diseño de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, en función de las vibraciones inducidas por rotación de la Turbina hidráulica Francis, puente grúa y vibraciones sísmicas.



## **1.5. HIPÓTESIS**

### **1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL**

La magnitud de los parámetros dinámicos del sistema estructural, dispuesto en la Casa de Máquinas de La Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, con respecto a vibraciones inducidas por rotación de la Turbina hidráulica Francis, puente grúa y vibraciones sísmicas toman valores semejantes; los parámetros globales de respuesta estructural son mayores para el caso de vibraciones sísmicas.

### **1.5.2. SUB HIPÓTESIS**

#### **1.5.2.1. Sub hipótesis N°01**

Las características de la vibración inducida por una turbina hidráulica Francis se asemejan a una vibración libre armónica asociadas a su frecuencia vibratoria.

#### **1.5.2.2. Sub hipótesis N°02**

Las características de la vibración inducida por el puente grúa se asemejan a una vibración libre armónica por ciclos, asociadas a la frecuencia de su motor.

#### **1.5.2.3. Sub hipótesis N°03**

Las características de los parámetros de la vibración sísmicas están referidas a los valores que toma la aceleración espectral en el tiempo.

#### **1.5.2.4. Sub hipótesis N°04**

En la medida que los parámetros dinámicos de un sistema estructural están en función de sus características de masa y rigidez, las diferentes acciones dinámicas, no determinan diferencias significativas; en los valores de los parámetros dinámicos para el sistema estructural de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, obtenidos a partir de las vibraciones por la turbina hidráulica Francis, vibraciones por el puente grúa y vibraciones sísmicas.





**1.5.2.5. Sub hipótesis N°05**

Los parámetros globales de respuesta estructural como fuerza cortante, desplazamientos máximos, y derivas de entrepiso, determinantes para el diseño, corresponden a vibraciones sísmicas.

**1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES**

**1.6.1. VARIABLES INDEPENDIENTES**

- **X1: Vibraciones inducidas por puente grúa.**

Define un movimiento de un solo pulso, donde actúan cargas exteriores variables con el tiempo  $F(t)$ , sobre un sistema, dichas fuerzas tienen un incremento de magnitud finito.

**INDICADORES:**

Frecuencia angular del motor de puente grúa	rad/seg.
Periodo de vibración	seg.
Amplitud	voltaje.

- **X2: Vibraciones inducidas por la turbina hidráulica Francis.**

Describe movimientos trepidatorios, que se manifiestan como un movimiento armónico simple y repetitivo de la masa correspondiente a la turbina, alrededor de una posición de equilibrio, dicho movimiento se repite con valores de magnitud razonablemente semejantes en un cierto intervalo de tiempo, es decir donde la frecuencia es constante en el tiempo.

**INDICADORES:**

Frecuencia angular	rad/seg.
Periodo de vibración	seg.
Amplitud	Ton.



- **X<sub>3</sub>: Vibraciones sísmicas.**

Las vibraciones sísmicas representan la energía liberada en un terremoto en forma de ondas elásticas, la propagación de las mismas dependerá de las características del suelo de fundación, pues por este medio se transmiten acciones dinámicas hacia la estructura.

**INDICADORES:**

Aceleración espectral      m/seg<sup>2</sup>.

**1.6.2. VARIABLES DEPENDIENTES**

- **Y (1): Parámetros dinámicos de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.**

Son aquellos que permiten predecir la respuesta de un sistema ante una fuerza externa que es variable en el tiempo la misma que da origen a fuerzas de disipación de energía mediante diversos mecanismos de fricción y fuerzas de inercia, y además una fuerza estática como la rigidez. Fuerzas que se obtienen a partir de condiciones intrínsecas del sistema evaluado.

**INDICADORES:**

Periodo de vibración	seg.
Frecuencia natural de vibración	1/seg.
Coeficiente de amortiguamiento	Ton*seg/m.

- **Y (2): Parámetros globales de respuesta estructural de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.**

Son el conjunto de fuerzas internas; momentos flectores, fuerzas cortantes, etc. y fuerzas cortantes en la base, desplazamientos máximos, derivas o distorsiones de entrepiso.



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE".

Evalúa la respuesta de un sistema en función al grado en que se modifica su configuración alrededor de una posición de equilibrio estable.

Es posible obtener las respuestas máximas importantes para evaluar si el sistema resiste una determinada acción impuesta.

**INDICADORES:**

Fuerza Cortante	Ton.
Desplazamientos máximos	mm.
Derivas de entrepiso	adimensional.



1.6.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

TABLA N° 1: Operacionalización de variables.

TIPO DE VARIABLE	DEFINICION	NIVEL	INDICADORES	UND.	INSTRUMENTOS
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>					
Y (1): Parámetros Dinámicos:	Son aquellos que permiten predecir la respuesta de un sistema ante una fuerza externa que es variable en el tiempo, y suele ser rápida. La misma que da origen a fuerzas de disipación de energía mediante diversos mecanismos de fricción y fuerzas de inercia que son comparables en magnitud con las fuerzas estáticas como la rigidez. Ambas fuerzas se obtienen a partir de las propiedades intrínsecas del sistema evaluado.	Parámetros Dinámicos.	Periodo fundamental de vibración. Frecuencia natural de vibración. Amortiguamiento.	seg. 1/seg. ton*seg/m	Hojas electrónicas de función de carga dinámica para vibraciones de la turbina hidráulica Francis, puente grúa y Sísmicas.
Y (2): Parámetros Globales de Respuesta Estructural:	Evalúan la respuesta de un sistema, evalúa el grado en que modifica su configuración alrededor de una posición de equilibrio estable. Es posible obtener las respuestas máximas importantes para evaluar si el sistema resiste una determinada acción impuesta.	Parámetros Globales de Respuesta Estructural.	Fuerza Cortante. Desplazamientos máximos totales. Derivas de entrepiso.	ton. mm. adimensional	Hojas electrónicas para evaluar parámetros globales de respuesta estructural
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>					
X (1): Vibraciones por turbina :	Describe movimientos trepidatorios, que se manifiestan como un movimiento armónico simple y repetitivo de la masa correspondiente a la Turbina, alrededor de una posición de equilibrio, dicho movimiento se repite con valores de magnitud razonablemente semejantes en un cierto intervalo de tiempo, es decir donde la frecuencia es constante en el tiempo.	Registros técnicos de turbina Francis.	Frecuencia angular de la turbina Francis Periodo de vibración. Amplitud.	rad/seg. seg. ton.	Ficha técnica de la turbina hidráulica Francis.
X (2): Vibraciones inducidas por puente grúa:	Define un movimiento de un solo pulso, donde actúan cargas exteriores variables con el tiempo F(t) sobre un sistema, dichas fuerzas tienen un incremento de magnitud finito.	Registros técnicos de puente grúa.	Frecuencia angular del motor de equipos Periodo de vibración. Amplitud.	rad/seg. seg. ton.	Ficha técnica de puente grúa
X (3): Vibraciones sísmicas:	Las vibraciones sísmicas, representan la energía liberada en un terremoto en forma de ondas elásticas, la propagación de las mismas dependerá de las características del suelo de fundación de la estructura, pues por este medio se transmiten acciones dinámicas hacia la estructura.	Registros espectro de respuesta.	Aceleración espectral. (Sa)	m/seg <sup>2</sup>	Archivo de espectro de respuesta.

Fuente: Elaboración propia.



## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. ANTECEDENTES DE LA TESIS

#### 2.1.1. ANTECEDENTES A NIVEL NACIONAL

##### 2.1.1.1. Evaluación estructural de construcciones históricas en la costa peruana utilizando tecnologías modernas: el caso del hotel “el comercio” en lima.

**(Tesis de pregrado)**

Chácara Espinoza, César Javier, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2013.

#### **Resumen:**

En esta tesis se presenta una herramienta para la evaluación estructural de construcciones existentes que son los ensayos experimentales de identificación modal. Estos ensayos tienen como finalidad la de estimar el comportamiento real de las estructuras mediante la identificación de sus propiedades dinámicas (frecuencias, amortiguamiento y modos de vibración). Estos ensayos son de gran utilidad para el estudio de construcciones históricas porque se alinean con las filosofías modernas de conservación ya que son experimentos no destructivos en los cuales se usa solo el ruido ambiental como fuente de excitación de la estructura.

#### **CONCLUSIONES:**

##### **1. Ensayos experimentales de identificación modal, sistemas de medición y métodos de procesamiento de señales**

El análisis de estructuras mediante vibraciones se divide, de acuerdo a la fuente de excitación, en vibraciones forzadas y en vibraciones ambientales. Para la evaluación de estructuras de ingeniería civil, los ensayos con vibraciones forzadas requerirían de una gran cantidad de energía para estimular su respuesta dinámica, equipos pesados y personal capacitado. La selección de los transductores apropiados (desplazamiento, velocidad o aceleración), el sistema de adquisición de



datos y el de almacenamiento de datos, son un aspecto importante para la medición de señales ambientales. Para este tipo de ensayos, los transductores de medida deben tener una alta sensibilidad y los equipos de adquisición alta resolución. La ubicación de los transductores de medida también es importante ya que éstos se deben ubicar en puntos con desplazamiento significativo en todos los modos de vibración. La ubicación de los sensores de medida se debe realizar con ayuda de resultados de un análisis modal con modelos numéricos preliminares.

## 2. Construcción virreinal de la costa Peruana

Los sistemas estructurales característicos de la época del virreinato fueron los de adobe y quincha. El primero de ellos es un sistema pesado con falla frágil lo que ocasiona daños severos cuando ocurren movimientos sísmicos. La quincha es un sistema más flexible que se usó en los pisos superiores de los edificios por su buen comportamiento en sismos. Ensayos experimentales y modelo numérico del hotel "El Comercio" La identificación experimental de las propiedades dinámicas del hotel presentó dificultad debido a la complejidad de su estructura y al severo daño que presenta. Los resultados analíticos no presentan el mismo comportamiento que los resultados experimentales debido a que no se cuenta con planos detallados de la estructura del hotel, y a la incertidumbre en el material y estado de daño. A partir del modelo numérico se obtuvieron modos de vibración. El proceso de calibración consistió en la comparación del primer modo de vibración analítico y experimental para lo cual se modificaron parámetros como la rigidez de la estructura que no fue modelada.



### 2.1.1.2. “Control De Vibraciones Para Casas De Tierra En Perú” (Tesis de Investigación Pregrado)

Giraldo Iriarte, Fernando Alberto, Universidad Nacional De Ingeniería, Lima, 2010.

#### **Resumen:**

Se estudia el entorno rural de la unidad minera, identificando el tipo de vivienda existente en la zona, así como un análisis estructural de las viviendas con peligro de daño por voladura. Así mediante el estudio se podrá determinar el nivel de vibración y de frecuencia que produciría algún daño en la propiedad. Se ha realizado un análisis del tipo de casas de tierra, tanto con simulación como con los programas de análisis estructural.

#### **CONCLUSIONES:**

1. El potencial de efectos perjudiciales de una voladura depende de diversas características de las vibraciones, o de su conjugación: amplitud, frecuencia, duración, cantidad de ocurrencias, etc. vs. Las propiedades de comportamiento dinámico de los sistemas que excitan (frecuencia de resonancia y resistencia, principalmente). En suma, es el sistema con las componentes fuente-suelo transmisor-estructura el que determina en conjunto el efecto del fenómeno vibratorio.

La frecuencia de resonancia obtenida en las mediciones de campo nos da un rango de valores que oscila entre los 10 y 17 Hz, lo cual está por encima de los 4 – 11 Hz considerada mundialmente para protección de estructuras. La frecuencia de resonancia está en función de las propiedades de los materiales que construyen la estructura y también de acuerdo a dimensiones de la estructura que se pretende cautelar. Por ejemplo: Una zona de roca entre suave a media y con gran número de fallas y fracturas que nos indica que la vibración se mitiga bastante por el paso por todos esos lados.



2. La normativa peruana de vibraciones es una conversión de la normativa americana de la "Office Surface Mining", la cual ha sido diseñada para otro tipo de realidad y otros tipos de estructuras por lo que su aplicación en la zona peruana, debe tener modificaciones. Las normativas alemanas y suecas son más conservadoras que las americanas y debido al tipo de estructuras presentes en nuestro territorio son más útiles para las casas del tipo tierra.
  
3. En los registros obtenidos en las casas podemos ver que en el caso de tener algún material o equipos sobre armarios, anaqueles. Los elementos no estructurales obtendrán una frecuencia de resonancia a niveles bajos de 2 a 4 Hz, los cuales pueden alarmar a los pobladores de las viviendas creyendo que la vibración puede dañar sus casas.

### **2.1.2. ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL**

#### **2.1.2.1. Estudio del comportamiento dinámico de tres edificios de concreto de la pontificia universidad javeriana mediante vibraciones ambientales. (Tesis de Investigación Pregrado)**

Emiliani Ramos Nicolas Simon & Rincón Rubiano Jason Fabian, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2012.

#### **Resumen:**

El comportamiento dinámico en el rango elástico de tres edificios puestos en pie hace más de 40 años. Dichos edificios fueron construidos mediante técnicas y normativas poco exigentes, las cuales, hoy en día hacen que exista gran incertidumbre sobre el comportamiento de estos edificios.

La medición de vibraciones ambientales y ciertos cálculos pueden ayudar a permitir la estimación del periodo fundamental de vibración de un edificio o estructura. La determinación del periodo fundamental de vibración de la estructura se considera importante para poder llevar a cabo la calibración de





modelos matemáticos que simulen el comportamiento dinámico real de los edificios.

Para el presente estudio, se hizo necesaria la extracción de núcleos de las columnas de cada uno de los edificios para así poder tener datos reales de valores esenciales para la modelación de los edificios, tales como la densidad y los módulos de elasticidad de los materiales.

A partir de los modelos calibrados, se podrá llegar a conclusiones y recomendaciones relacionadas con la ocupación de la estructura, con los cambios arquitectónicos que esta ha tenido durante los años, y su configuración estructural.

### **Conclusión**

- La medición de las vibraciones ambientales realizada en los diferentes niveles de los edificios nos permitió estimar las frecuencias fundamentales de vibración de estos mismos. Se concluyó que los periodos fundamentales estimados están dentro del rango de valores típicos para esta clase de edificios ya que estos se encuentran cerca de aquellos estimados mediante la fórmula empírica.
- El análisis espectral que se realizó utilizando la microzonificación sísmica de Bogotá, permitió concluir que los edificios Félix Restrepo y Carlos Ortiz. Se encuentran dentro del valor de deriva admisible

#### **2.1.2.2. Análisis de vibraciones en una casa de máquinas de la central hidroeléctrica basada en la interacción fluido- estructura usando métodos numéricos.**

(Revista de Investigación).

Liao-jun ZHANG, Water Science and Engineering, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing. P. R. China, 2010.

El Estudio muestra el análisis de una estructura de casa de máquinas evaluada durante el proceso de operación de los equipos hidromecánicos, mediante una



simulación se logra recrear el paso del fluido desde que llega a la casa de máquinas hasta que es liberado en la zona de descarga buscando identificar los pisos críticos de la estructura es así que haciendo uso de un análisis tiempo historia se identifican desplazamientos máximos para cada nivel, ha sido necesario realizar un análisis de vibración de la estructura de concreto armado en el dominio del tiempo. Algunas conclusiones se extraen a continuación:

### **Conclusión:**

(1) Teniendo en cuenta el efecto de la turbulencia con la que se desplaza el fluido en la estructura de la central hidroeléctrica, se ha buscado determinar las magnitudes de la vibración que esta causa, mediante la respuesta tiempo-historia del flujo turbulento durante su recorrido.

(2) El análisis muestra que las respuestas máximas ocurrieron al nivel de piso de turbina, y que las vibraciones cumplen las especificaciones correspondientes con la vibración hidráulico – mecánica y no causan daños significativos a la estructura.

(3) Se ha comprobado con el análisis espectral, que las vibraciones ocurridas al nivel de piso son causadas principalmente por el movimiento dinámico de la turbina hidráulica, más que por otro tipo de influencia.

## **2.2. BASES TEÓRICO-CIENTÍFICAS**

### **CONCEPTOS BÁSICOS DE DINÁMICA**

#### **2.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ESTRUCTURAS**

##### **2.2.1.1. MASA**

Según (Reyes, 1998, págs. 8-10); La masa,  $m$ , es una medida de la cantidad de materia de un cuerpo, es independiente de su localización, el objeto puede estar en el ecuador o en el polo, sumergido en agua, o en la Luna. En un sistema estructural el total de la masa estará definido por los componentes estructurales o no, es independiente de la geometría.

Es importante diferenciar el concepto de peso, ( $W$ ), que se atribuye a la fuerza de atracción gravitacional que la tierra impone a un cuerpo con una aceleración ( $g$ ) y tiene un valor aproximado de  $9.81 \text{ m/s}^2$  ( $= 9806.65 \text{ mm/s}^2$ , por acuerdo



internacional, para ser exactos). Por lo tanto el peso  $W$  que tiene una masa en la tierra, al nivel del mar, es igual al producto ( $W = mg$ ).

Unidades:

- Masa, (  $M$  ) Ton\*seg<sup>2</sup>/m.

(CASSANO, 2009); Cuando se introduce en un sistema la masa, la propiedad de inercia de ella tiende a retrasar la respuesta respecto a la solicitud exterior. La acción de la carga exterior introduce al sistema energía en forma de trabajo externo como consecuencia de la carga aplicada se manifiesta a través del desplazamiento que dicha carga provoca, energía que se almacena internamente en dos modalidades: i) Energía de deformación, y ii) Energía cinética.

La masa adquiere velocidad y en este proceso absorbe parte de energía externa que ofrece la carga exterior aplicada. Cuando deja de actuar la carga exterior, el trabajo exterior transferido estará almacenado.

En los problemas elásticos bajo cargas dinámicas, la energía interna del sistema está constituida por la suma de dos componentes: la energía interna de deformación y la energía cinética. Si no hay fricción, el total de la energía externa suministrada por la carga aplicada se transformará en energía interna de deformación y en energía cinética en proporciones que varían en función del tiempo.

La respuesta dinámica puede traer como consecuencia que su valor máximo represente una amplificación o una reducción respecto a la que se produciría si el sistema no tuviera inercia.

En el problema dinámico, se muestra que la respuesta de una estructura ante la acción de una fuerza externa, aunque esta varíe en el tiempo, genera fuerzas de inercia proporcionales a la masa. La fuerza de inercia se opone al desplazamiento, por lo tanto el sistema desarrolla energía cinética, que modifica la posición de equilibrio y deja vibraciones remanentes.

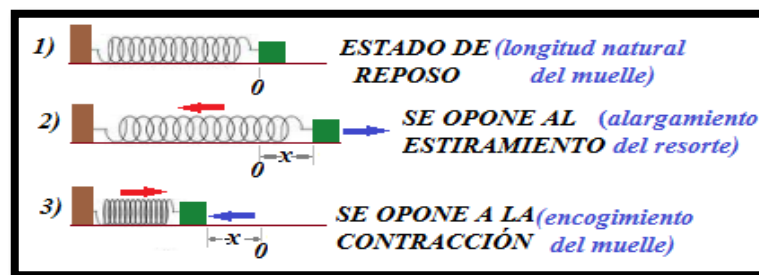
### 2.2.1.2. RIGIDEZ

(Reyes, 1998, págs. 8 - 10), Es la propiedad de un cuerpo, elemento o estructura de oponerse a las deformaciones. También podría definirse como la capacidad de soportar cargas o tensiones sin deformarse o desplazarse excesivamente. La rigidez se define como la relación entre las fuerzas externas y las deformaciones que ellas inducen en el cuerpo.

Unidades:

- Rigidez ( K ) Ton/m.

FIGURA N° 1: Rigidez del elemento.



FUENTE: <http://www.aulafacil.com/cursos/l30298/ciencia/fisica/trabajo-y-energia/la-fuerza-elastica-de-un-resorte-otra-fuerza-conservativa>.

#### 2.2.1.2.1. MECANISMO ELÁSTICO DESCRITO POR LA LEY DE HOOKE

(Reyes, 1998, pág. 9), El caso más simple para explicar la relación entre la fuerza que resiste el resorte y la deformación entre sus extremos tiene la forma mostrada en la Figura N°1. Corresponde a un resorte helicoidal, cuando el resorte se estira debido a la aplicación de una fuerza externa en uno de sus extremos, opuesta a ella se genera una fuerza interna, que intenta restaurar la deformación del elemento, a medida que el elemento es deformado la energía se almacena en este y genera energía potencial elástica que se define como el trabajo necesario para devolver la forma original del elemento.

La rigidez permite tener una medida de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material durante el proceso en el que el sistema almacena y libera energía potencial, está en función de propiedades de los materiales y características geométricas del elemento como: las dimensiones

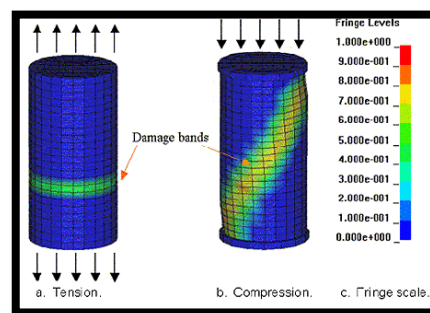
geométricas; la longitud, la sección transversal, el material del que está fabricado, condiciones de apoyo del sistema.

### 2.2.1.2.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

(Navarro, 2013); Son las características inherentes, que permiten diferenciar un material de otro, como lo son;

- **Coefficiente de dilatación térmica;** El coeficiente de dilatación es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente experimenta un cambio de temperatura que lleva consigo una dilatación térmica, es inversamente proporcional a la temperatura del material;  
$$1/(T^\circ \text{ del material}).$$
- **Resistencia a la compresión ( $F'c$ ) Kg/cm<sup>2</sup>,** es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento, en un ensayo de compresión, se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta.

FIGURA N° 2: Daño registrado en probetas sometidas a compresión.



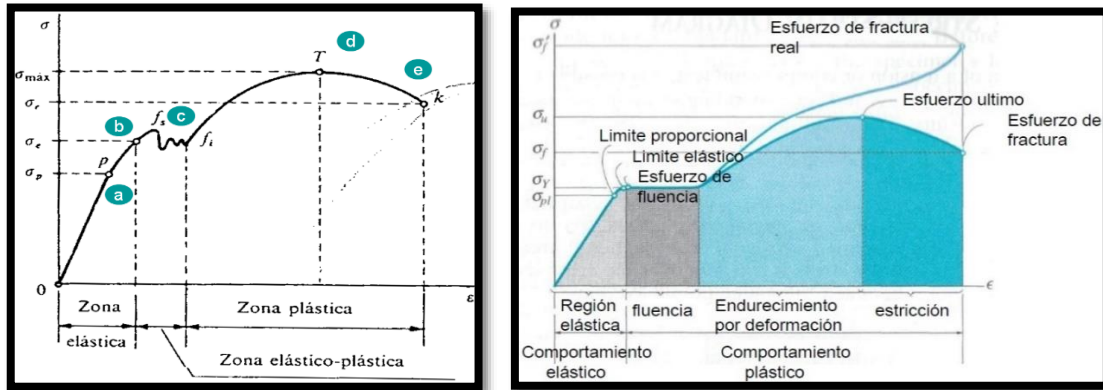
Fuente:<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/05063/chapt3.cfm>.

- **El módulo de Young (E)**

(Navarro, 2013); Se define como la medida de rigidez de un material elástico, simula matemáticamente el comportamiento mecánico de un material, tiene en cuenta que todo esfuerzo produce una deformación, dentro del límite elástico. En un diagrama es la curva resultante graficada con los valores del esfuerzo y la correspondiente deformación unitaria en

el espécimen calculado a partir de los datos de un ensayo de tracción o de compresión.

FIGURA N° 3. Diagrama esfuerzo – deformación unitaria.



Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>.

Según: (Torre, 2005)

a) Límite de proporcionalidad:

Se observa en la figura N°3, que va desde el origen O hasta el punto llamado límite de proporcionalidad, es un segmento de recta rectilíneo, de donde se deduce la tan conocida relación de proporcionalidad entre la tensión y la deformación enunciada por Robert Hooke. Cabe resaltar que, más allá la deformación deja de ser proporcional a la tensión.

b) Limite de elasticidad o limite elástico:

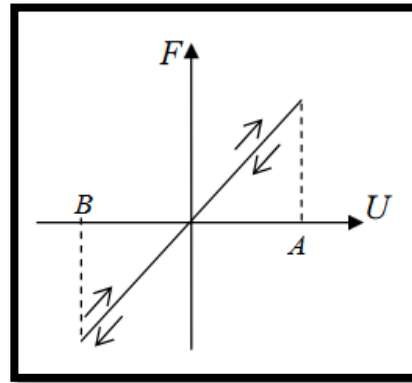
Es la tensión más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación residual llamada deformación permanente.

**FIGURA N° 4:** Desplazamientos registrados durante carga y descarga aplicando la ley de Hooke.

$F$  = Fuerza.

$U$  = Desplazamiento.

$B, A$  = Valores de la energía en un ciclo de carga y descarga



**FUENTE:** (Balachandran, 2006, pág. 35)

c) Punto de fluencia:

Es aquel donde en el aparece un considerable alargamiento o fluencia del material sin el correspondiente aumento de carga que, incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia. Sin embargo, el fenómeno de la fluencia es característico del acero al carbono, mientras que hay otros tipos de aceros, aleaciones y otros metales y materiales diversos, en los que no manifiesta.

d) Esfuerzo máximo:

Es la máxima ordenada en la curva esfuerzo-deformación.

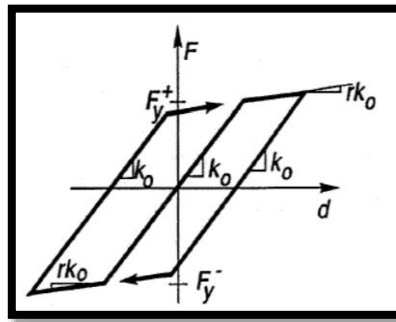
e) Esfuerzo de Rotura:

Verdadero esfuerzo generado en un material durante la rotura.

(Navarro, 2013); Uno de los modelos más usados para representar la relación fuerza-desplazamiento es el modelo elastoplástico o bilineal. Como por ejemplo el acero, se adopta frecuentemente para modelar otro tipo de materiales debido a su simplicidad.

Los valores de rigidez se mantienen constantes, independientemente del daño o reducción de la rigidez del edificio.

FIGURA N° 5: Modelo Elastoplástico.



Fuente: (Navarro, 2013)

### Calculo del módulo de Young

Para el concreto es directamente proporcional a la resistencia a la compresión ( $F'c$ ) se hallará mediante la fórmula:

$$E = 15000 * \sqrt{F'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}.$$

El cálculo correspondiente al acero muestra que este valor está en función al grado que se esté usando.

- **Peso Específico ( $\gamma$ );** Es el valor correspondiente a la relación entre el peso que ocupa un material en una unidad de volumen. para el concreto el valor promedio es de 2400 kg/cm<sup>3</sup>, para el acero para el acero 7800 kg/cm<sup>3</sup>.
- **Módulo de Poisson ( $\nu$ );** El coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. Definido por la constante elástica, definida como la relación entre la deformación transversal y la longitudinal.

$$\nu = \frac{\text{Deformación transversal}}{\text{Deformación longitudinal}}$$



- **Módulo de elasticidad en cortante (G):** para el concreto es directamente proporcional al módulo de Young del concreto, definido por:  $0.416 * E$ , puede ser hallado también como el esfuerzo de corte / deformación de corte.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Para el acero el módulo de corte se halla, por la siguiente fórmula:  $0.4 * E_c$ , asumiendo un valor de 0.25 para el coeficiente de Poisson.

- **Módulo de fluencia de acero ( $f'y$ );** este módulo varía según el tipo de acero que se esté usando, representado en las siguientes unidades - Kg/cm<sup>2</sup>.

### 2.2.1.2.3. CÁLCULO DE LA RIGIDEZ DE UN SISTEMA EMPOTRADO

La rigidez a cortante es la relación entre los desplazamientos verticales de un extremo de una viga y el esfuerzo cortante aplicado en los extremos para provocar dicho desplazamiento. La rigidez de un elemento que termina empotrado en sus apoyos, (existe traslación pero no rotación), al cual se le aplica una carga lateral en el apoyo, se determinará usando la fórmula:

$$\text{Rigidez} = \frac{I_x * E * 12}{h^3}$$
$$E = 15000 * \sqrt{f'c}.$$
$$I = \text{Inercia}.$$
$$h = \text{altura del elemento}.$$

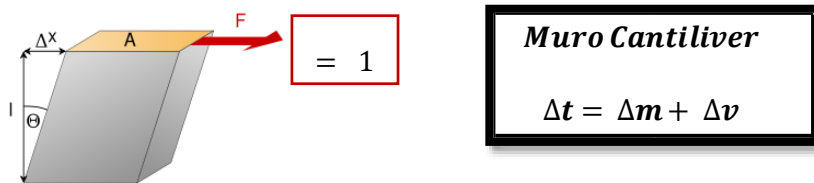
Calculo de la Inercia:

$I_x =$  Inercia de una sección rectangular  
 $l =$  Largo.  
 $h =$  Ancho.

$$I_x = \frac{l x h^3}{12}$$

**Cálculo de rigidez para muros cantiléver**

Se considera un muro cantiléver cuando no hay vigas de acoplamiento. Los muros estructurales sin algún apoyo en la parte superior poseen rigidez a fuerzas cortantes y de flexión en la metodología propuesta por: (Amrhein, pág. 70), donde se determina la deformación de un muro producida por una carga unitaria horizontal aplicada en el nivel superior del muro, al que denomina como muro cantiléver:



$$\Delta t = \Delta m + \Delta v = \frac{P * h^3}{3 * Ec * I} + \frac{1.2 * P * h}{A * Ev}$$

Δm = deflexion por momento flexionante, m.

Δv = deflexion por fuerza cortante, m.

P = fuerza lateral en el muro, Ton.

h = altura del muro, m.

A = sección transversal del muro, m2.

I = momento de inercia de la seccion transversal del muro , en dirección de flexión, m4.

Ec = Módulo de elasticidad en compresión (concreto), Ton/m2.

Ev = Módulo de elasticidad en cortante, Ton/m2.

Módulo de Elasticidad del concreto (Ec) = 15000 \* √F'c

Módulo de Elasticidad en Cortante (Ev) = G = 0.4 X Ec

Se asume Em y Ev son constantes,  
 Ev (modulo en cortante) = 0.4\*Ec; donde existe una misma resistencia del material a través del muro. Si se asume también Ec = 2487468.59 ton / m2, el espesor del muro es 1 m. y P = 1 Ton.

La rigidez en un muro Cantiléver es directamente proporcional a la fuerza unitaria que se le aplica:

$$\text{rigidez de muros} = k = \frac{1}{\Delta t}$$

$k$  = Rigidez de un Muro Cantilever.

$\Delta t$  = Deflexión Total.

### 2.2.1.3. AMORTIGUAMIENTO

Según: (CHOPRA, 2014, pág. 281). El amortiguamiento se define como la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía. Todo cuerpo en movimiento, experimenta una disminución en el tiempo de este último, la razón está asociada con la pérdida de la energía presente en el sistema. Esta pérdida de energía es producida por fuerzas de amortiguamiento o de fricción que obran sobre el sistema. La energía, ya sea cinética o potencial, se transforma en otras formas de energía tales como calor o ruido. Estos mecanismos de transformación de energía son complejos y no están totalmente entendidos, aún hoy en día.

#### 2.2.2.3.1. ORIGEN DE LAS FUERZAS DE AMORTIGUAMIENTO

Las fuerzas de amortiguamiento están producidas en las estructuras por diversas causas, entre las que pueden citarse las siguientes. (Timoshenko y Young 1948, Barbat y Miquel Canet 1994):

##### a) Amortiguamiento de coulomb o fricción seca

(Barbat., 2008, pág. 44); Este tipo de amortiguamiento causado por una fuerza de fricción entre dos superficies sólidas, La fuerza de fricción es igual al producto de la fuerza normal a la superficie  $N$ , y el coeficiente de fricción  $u$ . Se supone que el amortiguamiento de Coulomb es independiente de la velocidad del movimiento, una vez éste se inicia. Siempre se opone al movimiento, por lo tanto tiene el signo contrario al de la velocidad.

##### b) Amortiguamiento viscoso equivalente

Según: (CHOPRA, 2014, pág. 281). El amortiguamiento viscoso equivalente destinado a modelar las amplitudes de disipación de energía de deformación, al

límite elástico de la estructura. Este modelo consta de una masa concentrada, que va perdiendo velocidad bajo la acción de una fuerza de amortiguamiento proporcional a su velocidad:

$$F_a = c\dot{x}$$

Dónde:  $F_a$ , es la fuerza de oposición al movimiento,  $C$  es el factor de amortiguamiento y  $\dot{x}$  es la primera derivada temporal del desplazamiento  $\dot{x}$ , es decir, la velocidad.

Según: (Barbat., 2008, pág. 44). A menudo se usa en el cálculo dinámico de estructuras un amortiguamiento viscoso, basado en el modelo Kelvin Voight y que es proporcional a la velocidad las razones más importantes de su uso son por una parte su simplicidad y por otra la suposición que hace; de que caracteriza el amortiguamiento global de toda la estructura. Se supone que produce la misma disipación de energía que el amortiguamiento real de la estructura con un mecanismo de pérdida de energía homogéneo en la misma.

### c) Amortiguamiento estructural o histerético

Se presenta como una respuesta del comportamiento de los materiales constitutivos. Se define, entonces, como la capacidad de absorber las acciones externas gracias a una correcta configuración de sus secciones transversales (dimensiones, cuantía de acero, resistencia etc.) ocasionado por la fricción interna molecular, cuando se deforma un cuerpo sólido.

#### 2.2.2.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

Según: (Barbat., 2008, pág. 44). Al suponer un amortiguamiento de tipo viscoso – crítico, está definido como una fracción del amortiguamiento:

$$C = \xi * C_c$$

$$C_c = 2m\omega_n = 2\sqrt{km}$$

Donde "C" es el coeficiente de amortiguamiento del sistema con unidades Ton.s/m, "k" es el sistema de rigidez, "m" es la masa del sistema, " $\omega_n$ " es la frecuencia natural del sistema, y donde " $\xi$ " es el factor de amortiguamiento, este factor es una cantidad adimensional.

### 2.2.2.3.3. FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO ( $\xi$ )

Según: (Balachandran, 2006, pág. 80), (Charles, 1979) El parámetro es denominado como coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico. Este valor, varía en estructuras del 2% al 10%, dependiendo del sistema estructural. En la práctica, se han adoptado valores promedio del 3-5%. Valores cercanos al 5% para edificios de concreto, acero y madera, mientras que para edificaciones en mampostería se han adoptado valores cercanos al 3%.

El ratio de amortiguamiento está dado por:

$$\xi = \frac{c}{2 * m * \omega_n} = \frac{c}{2 \sqrt{km}}$$

Según (Reyes, 1998, págs. 22-24);

- $\xi = 1$ ;  $0 < \zeta < 1$ ; llamado sistema sub amortiguado.
- $\xi > 1$ ; es un sistema sobre amortiguado.
- $\xi = 1$ ; llamado amortiguamiento crítico.

Sí;  $C = C_{cr}$ , es decir,  $\xi = 1$ , el sistema presenta un amortiguamiento crítico. Este caso no constituye una vibración, dado que el sistema retorna a su posición de equilibrio sin oscilar.

Sí;  $C > C_{cr}$ , es decir,  $\xi > 1$ , el sistema presenta un amortiguamiento supercrítico, que tampoco constituye una vibración, ya que el sistema retorna lentamente a su posición de equilibrio sin vibrar (Barbat y Miquel Canet, 1994).

Sí;  $C < C_{cr}$ , es decir,  $\xi < 1$ , el sistema presenta un amortiguamiento sub - crítico. En este caso el sistema oscila sobre su posición de equilibrio con un decremento progresivo de su amplitud, es el habitual en estructuras de Ingeniería Civil sometidas a acciones dinámicas este tipo de amortiguamiento puede definirse

mejor mediante la relación  $\xi = C / C_c$ , expresado previamente. De estas tres posibles soluciones sólo el caso sub - crítico, constituye una vibración libre, y por lo tanto, éste es el caso de interés.

Tabla N° 2: Porcentaje de Amortiguamiento Crítico.

Nivel de esfuerzo	Tipo y condiciones de la estructura	Porcentaje de amortiguamiento crítico
Esfuerzo de trabajo, no mayor de la mitad del punto de fluencia, aproximadamente.	Tuberías vitales	1 a 2
	Acero soldado, concreto pretensado, concreto armado levemente fisurado	2 a 3
	Concreto armado altamente agrietado	3 a 5
	Acero remachado o empernado, estructuras de madera clavadas o empernadas	5 a 7
Justamente debajo o en el punto de fluencia.	Tubería de servicio público	2 a 3
	Acero soldado, concreto pretensado con pérdida parcial del pretensado	5 a 7
	Concreto pretensado con pérdida completa del pretensado	7 a 10
	Concreto armado	7 a 10
	Acero remachado y empernado, estructuras de madera empernadas	10 a 15
	Estructuras de madera clavadas	15 a 20

Fuente: (CHOPRA, 2014, pág. 452)

#### 2.2.2.3.4. SISTEMAS CON AMORTIGUAMIENTO PROPORCIONAL-RAYLEIGH

Según: (CHOPRA, 2014, pág. 455) La determinación del amortiguamiento no resulta práctica, pues a diferencia del módulo de elasticidad que entra en el cálculo de rigidez, el coeficiente de amortiguamiento no puede ser calculado desde las dimensiones de los elementos estructurales y del tamaño de la estructura, esto no es posible por la dificultad que representa identificar los mecanismos de disipación de energía de vibración en las estructuras.

En vista de que las propiedades de amortiguamiento de los materiales no están bien establecidas. El amortiguamiento para una estructura debe determinarse a partir de todos los mecanismos de disipación de energía debe tomar en cuenta la parte significativa de la energía disipada por la fricción entre las conexiones

de acero, la apertura y cierre de micro grietas en el concreto, los esfuerzos en los elementos no estructurales (muros divisorios, equipo mecánico, elementos de protección contra incendios, etc.), la fricción entre la propia estructura y los elementos no estructurales y otros mecanismos similares, algunos de los cuales son difíciles de identificar.

Durante el proceso de amortiguamiento la vibración libre disminuye sostenidamente en amplitud, puede ser especificado para cada modo de vibración. Se muestra la variación del amortiguamiento en relación a las frecuencias fundamentales de la estructura

### Ecuación del Amortiguamiento Rayleigh:

$$C \text{ (rayleigh)} = \alpha * M + \beta * K \quad (a.1)$$

$C \text{ (rayleigh)}$  = Amortiguamiento Rayleigh.

$M$  = Masa.

$K$  = Rigidez.

$\alpha$  = Coeficiente asociado a la masa.

$\beta$  = Coeficiente asociado a la rigidez.

“ $\alpha$ ” y “ $\beta$ ” son coeficientes calculados para dar el nivel requerido de amortiguamiento viscoso a dos frecuencias diferentes, generalmente a las correspondientes al primer y segundo modos de vibración.

Se considera un amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez, este último apela a la intuición dado que puede interpretarse para modelar la disipación de energía derivada de las deformaciones de los entrepisos. En contraste el amortiguamiento proporcional a la masa es difícil de justificar físicamente debido a que el amortiguamiento del aire que puede usarse en este modelo es demasiado pequeño para la mayoría de estructuras.

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\omega_i\lambda_j - \omega_j\lambda_i)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (a.2)$$

$$\beta = \frac{2(\omega_i \lambda_i - \omega_j \lambda_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (a.3)$$

Donde  $\omega_i$  es la frecuencia natural del modo de vibración "i",  $\omega_j$  es la frecuencia del modo de vibración "j" y " $\lambda_i$ ", " $\lambda_j$ ", es la fracción de amortiguamiento critico requerida del modo de vibración "i", "j", respectivamente. La popularidad de este modelo se debe a que usa las matrices de masa y rigidez de la estructura, las cuales son previamente conocidas.

Amortiguamiento proporcional a la masa:

$$C(\text{rayleigh}) = \alpha * M$$

Y la fracción de amortiguamiento modal

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2} * \frac{1}{\omega_n}$$

Amortiguamiento proporcional a la rigidez:

$$C = \beta * K$$

Y la fracción de amortiguamiento modal

$$\xi_n = \frac{\beta * \omega_n}{2}$$

Así la fracción de amortiguamiento para el n - ésimio modo de vibración ( $\omega_n$ ) de tal sistema es:

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2} * \frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta * \omega_n}{2}$$

La fracción de amortiguamiento para cualquier otro modo varia con la frecuencia natural las fracciones de amortiguamiento deben elegirse de manera que garanticen valores razonables para las fracciones de amortiguamiento en todos los modos que contribuyen de manera significativa a la respuesta.





#### **2.2.2.3.4. IMPORTANCIA DEL AMORTIGUAMIENTO EN LA DINÁMICA**

Hay casos en que las máximas tensiones no dependen del amortiguamiento mientras que en otros casos el amortiguamiento juega un papel fundamental en la amplitud de la respuesta dinámica.

Por el contrario, en el caso de movimientos vibratorios sostenidos de tipo periódico de larga duración en el tiempo (frente al período  $T$ ) el amortiguamiento puede tener gran incidencia en la magnitud de la respuesta dependiendo de la frecuencia de la excitación en comparación con la frecuencia natural del sistema. El amortiguamiento cobra un rol decisivo en la amplitud de la respuesta, especialmente cuando la frecuencia natural del sistema y la excitación son muy próximas entre sí (resonancia). Por lo tanto, las fuerzas disipativas deben ser tenidas en cuenta en los casos de cargas oscilatorias de larga duración, aunque no siempre tendrán incidencia apreciable en la magnitud de la respuesta.

#### **2.2.2. GRADOS DE LIBERTAD**

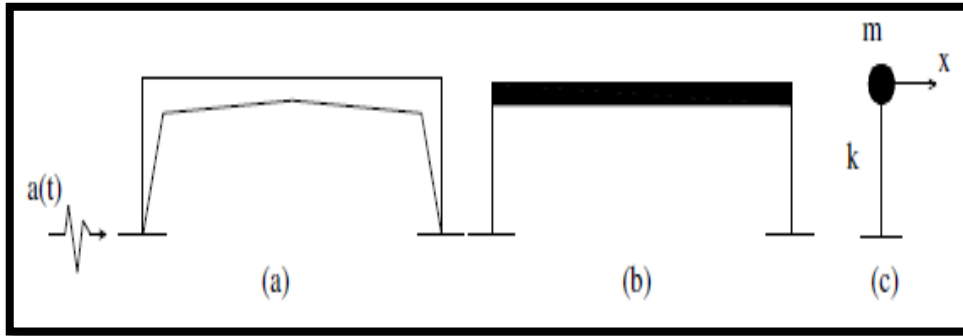
Según: (Reyes, 1998, pág. 5). El número de grados de libertad de un sistema, desde el punto de vista de la dinámica, corresponde al número mínimo de coordenadas necesarias para definir la posición en el espacio y en el tiempo de todas las partículas de masa del sistema. Cuando se trata de sistemas rígidos, en los cuales no puede haber desplazamiento relativo entre las partículas de masa, las propiedades de la masa se pueden describir referidas a su centro de masa. Esto conduce a lo que se conoce como sistemas de masa concentrada. Cuando la masa hace parte de un elemento flexible tenemos un sistema de masa distribuida y por consiguiente se puede hablar de un número infinito de grados de libertad.

Aquellos sistemas con un grado de libertad, estarán modelados como sistemas con una sola coordenada de desplazamiento, pueden ser representadas como sigue:

una masa ( $m$ ) que representa la propiedad de la inercia de la estructura, un elemento resorte ( $k$ ) que representa las fuerzas internas el sistema y la capacidad de la estructura de almacenar la energía potencial, elemento de

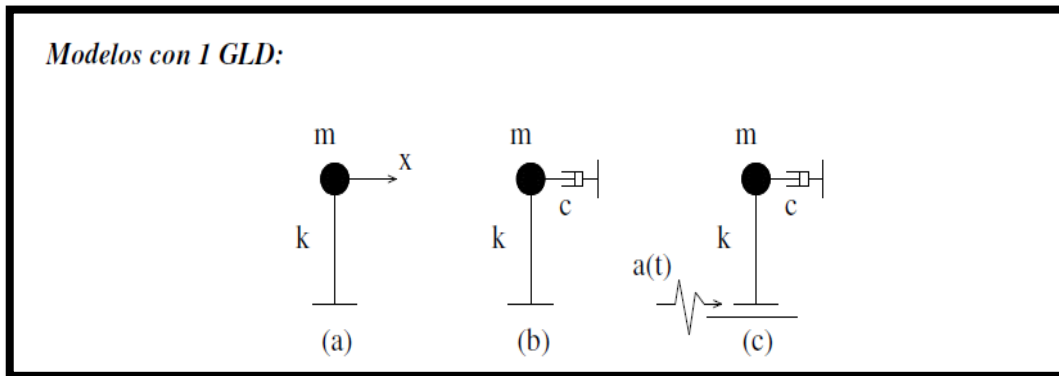
amortiguación (c) las características friccionantes y las pérdidas de energía de la estructura, y puede estar sometido a una fuerza de excitación  $f(t)$  que representa fuerzas exteriores que actúan sobre el sistema estructural en función del tiempo, cada uno de estos componentes actúa independientemente en un modelo matemático.

**FIGURA N° 6:** Estructura modelizada como un grado de libertad. a) Pórtico, b) Pórtico con la masa concentrada al nivel de viga. c) Modelo dinámico.



Fuente: (CASSANO, 2009)

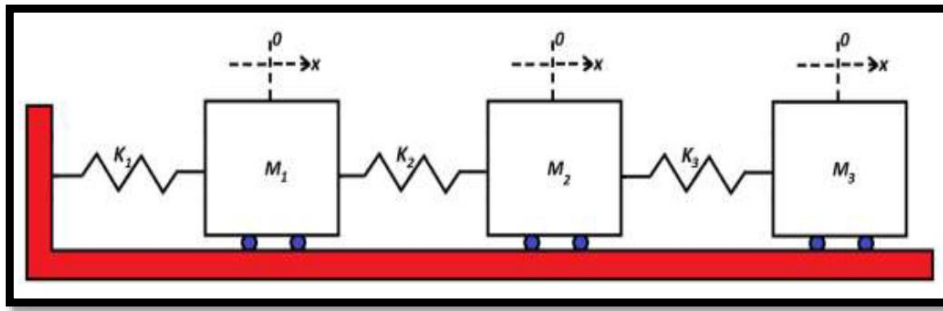
**FIGURA N° 7:** Modelo con un grado de libertad. a) modelo conservativo, b) modelo con amortiguamiento c) modelo sísmico.



Fuente: (CASSANO, 2009)

Según (Reyes, 1998, págs. 332- 333); Para un sistema con varios grados de libertad no amortiguado. Es, básicamente, un sistema con más de una masa y más de una rigidez, como aquel mostrado en la siguiente figura.

FIGURA N° 8: Esquema de un oscilador con tres grados de libertad.



Fuente: (RAMOS EMILIANI & RINCÓN RUBIANO, 2012)

### 2.2.3. SISTEMAS DINÁMICOS

#### 2.2.4. VIBRACIÓN LIBRE

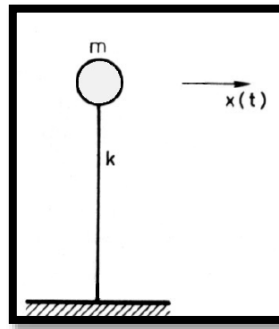
(ALEX H. BARBAT., págs. 52-54). Se dice que una estructura experimenta vibración libre cuando es perturbada de su posición de equilibrio estático y después se deja vibrar sin ninguna excitación dinámica externa. Se usará para introducir nociones de frecuencia de vibración natural, también para definir las características dinámicas de un sistema de 1 grado de libertad.

##### 2.2.4.1.1. SISTEMAS NO AMORTIGUADOS

(Ing Nicola Tarque, 2003); Los casos de vibraciones sin fuerzas de amortiguamiento son físicamente imposibles, pero posibles desde el punto de vista conceptual. En estos casos la ecuación del movimiento se representa como:

$$m \ddot{x} + kx = 0; \quad (1.1)$$

$$\ddot{x} + \omega_n x = 0; \quad (1.2)$$

**FIGURA N° 9: Modelo de un grado de libertad no amortiguado.**

Fuente: (CASSANO, 2009)

Para establecer la ecuación diferencial se establece como posible solución:

$$x = A \cos \omega_n t; \quad (1.3)$$

$$x = B \cos \omega_n t; \quad (1.4)$$

Los valores A y B están determinados por valores conocidos de movimiento del sistema que casi invariablemente son el desplazamiento  $x_0$  y la velocidad  $\dot{x}_0(t)$ , al iniciar el movimiento ó sea en el instante  $t = 0$ .

Estas condiciones se conocen como “condiciones iniciales” y el problema de resolver la ecuación diferencial para sus condiciones iniciales se conoce como problema de valor inicial.

Después de sustituir  $t = 0$  en condiciones iniciales;  $x = x_0$ ;  $\dot{x} = V_0$  en las ecuaciones (1.3) y (1.4).

$$x_0 = A; \quad V_0 = B\omega_n \quad (1.5).$$

Mientras “ $\omega_n$ ” es un valor de una propiedad física del sistema. De la ecuación (1.2) y (1.3).

$$(-m \omega_n^2 + k) A \cos \omega_n t = 0; \quad (1.6)$$

La ecuación anterior debe cumplir en cada instante de tiempo que el factor entre paréntesis debe ser 0. Donde  $\omega$  define la frecuencia circular del sistema:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad (1.7)$$

Debido a que las ecuaciones (1.3) y (1.4) son respuestas de la ecuación (1.2) y que esta ecuación diferencial es lineal, la superposición de estas dos soluciones origina una solución general para esta ecuación diferencial de segundo orden teniendo en cuenta las constantes de integración A y B.

Entonces, la solución general de la ecuación diferencial:

$$x(t) = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (1.8)$$

Si se deriva ambos miembros de la ecuación (1.8), se obtiene una expresión que permite calcular la velocidad de la vibración:

$$\dot{x}(t) = -A \omega_n \sin(\omega_n t) + B \omega_n \cos(\omega_n t) \quad (1.9)$$

El término  $\omega_n$  representa la frecuencia circular natural de vibración y se expresa en radianes/segundos.

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega_n t - \phi) \quad (1.10)$$

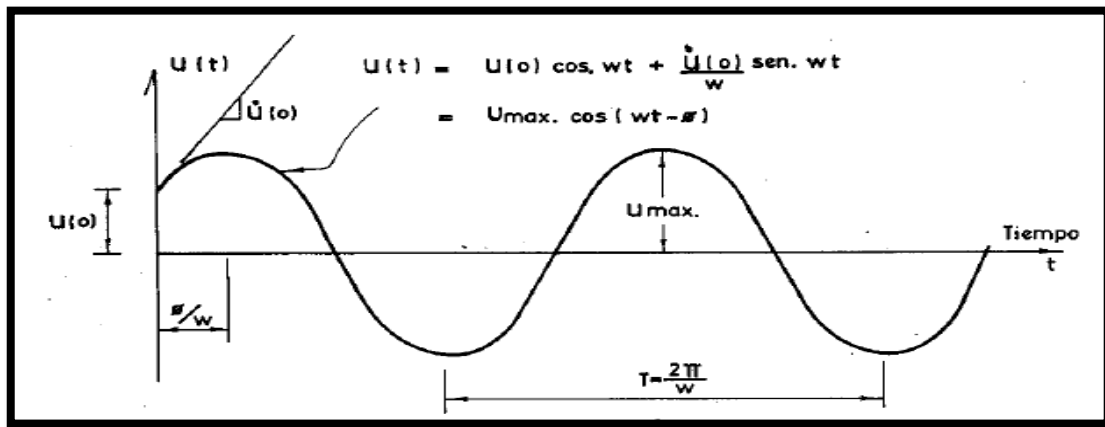
La ecuación (1.11) describe la respuesta del sistema como un movimiento armónico simple, que también se expresa como:

$$x_{\max} = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{[x_0]^2 + [V_0/\omega_n]^2} \quad (1.11)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) = \arctan\left(\frac{V_0}{\omega_n * x(0)}\right) \quad (1.12)$$

El término  $x_{\max}$ , representa la amplitud de las oscilaciones y  $\phi$  representa el ángulo de fase. El cociente  $\phi / \omega_n$  representa el tiempo del sistema en adquirir el máximo desplazamiento ( $x_{\max}$ ). La figura muestra la variación del desplazamiento en el tiempo.

FIGURA N° 10: Vibraciones libres no amortiguadas.

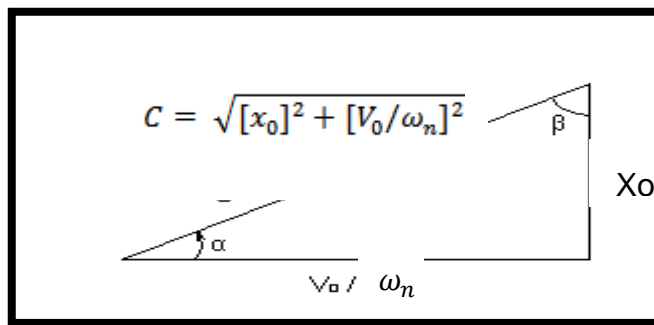


Fuente: (Ing Nicola Tarque, 2003)

**a) AMPLITUD DEL MOVIMIENTO**

(Paz, 1992, págs. 16-17); Examinaremos la Ec. (1.8) describe el movimiento vibratorio del oscilador simple sin amortiguación, una simple transformación trigonométrica nos muestra que podemos escribir esta ecuación en formas equivalentes.

FIGURA N° 11: Respuesta en vibración libre sin amortiguación.



FUENTE: (Paz, 1992, pág. 17).

$V_0$  = velocidad inicial. (m/seg)

$\omega_n$  = frecuencia angular del sistema . (rad/seg.)

$x_0$  = desplazamiento inicial. (m.)

Entonces:  $x(t) = C * sen(\omega_n t + \alpha)$  (1.13)

$x(t) = C * sen(\omega_n t + \beta)$  (1.14)

Dónde:

$$X = C \cos(\omega_n t + \alpha)$$

$$C = \sqrt{X_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega_n}\right)^2} \quad (1.15)$$

$$\tan \alpha = \frac{x_0}{\frac{v_0}{\omega_n}} \quad (1.16)$$

$$\tan \beta = \frac{\frac{v_0}{\omega_n}}{x_0} \quad (1.17)$$

La manera más simple de obtener las ecuaciones (1.9) y (1.10) es multiplicar y dividir la ecuación (1.8) por el factor ( C ) dado en la ecuación (1.11) y definir (  $\alpha$  ) o (  $\beta$  ) por la ecuación (1.14;1.15) por lo tanto:

$$x(t) = C * \left(\frac{x_0}{C}\right) (\cos\omega_n t + \frac{v_0}{C} (\sen\omega_n t)) \quad (1.18)$$

Obtenemos con la ayuda del grafico de respuesta en vibración libre sin amortiguación. Si:

$$\sen\alpha = \frac{x_0}{C} \quad \cos\alpha = \frac{\frac{v_0}{\omega_n}}{C}$$

### b) PERIODO NATURAL (T)

Según; (Paz, 1992, pág. 14); Si examinamos la ec (1.8); el movimiento descrito en esta ecuación es armónico y por lo tanto es periódico, puede ser expresado por una función seno o coseno de la misma frecuencia  $\omega_n$ , el periodo puede ser fácilmente calculado ya que las funciones seno y coseno tienen un periodo de  $2\pi$ , una estructura quedaría representada solamente por su periodo fundamental de vibración el periodo "T" del movimiento está determinado por:

$$\omega_n * T = 2\pi \quad \text{ó} \quad T=2\pi/\omega_n \quad (1.17)$$

### DEFINICIÓN:

El periodo fundamental representa el tiempo requerido para que la estructura complete un ciclo en movimiento armónico simple. El periodo es expresado en segundos por ciclo o simplemente en segundos, entendiéndose que se trata de

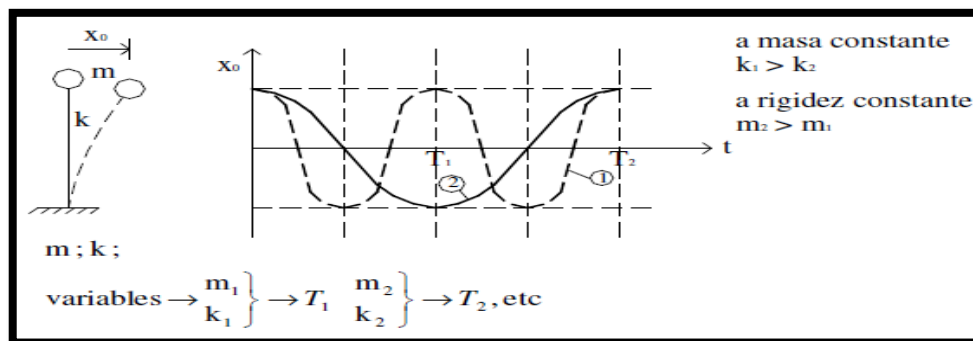
segundos por ciclo. El término natural se emplea para enfatizar las propiedades naturales de la estructura, dependientes de su masa y rigidez.

Las características dinámicas más importantes de una estructura son los periodos naturales de vibración y el amortiguamiento. El periodo natural es siempre importante e influye en todos los casos de cargas dinámicas, mientras que el amortiguamiento en algunos casos puede no ser importante y en otros casos no.

Ante una acción exterior, distintas estructuras reaccionarán de formas diferentes. Esta respuesta está íntimamente relacionada con las formas o modos de vibrar y sus correspondientes frecuencias o periodos propios.

Los periodos y formas de vibrar dependen de las características geométricas y de materiales (rigidez) y de la inercia que la estructura opone al movimiento (masa).

**FIGURA N° 12: Velocidad de reacción, diferentes "T" periodos.**



Fuente: (CASSANO, 2009)

### CÁLCULO:

En una estructura, la masa está asociada usualmente con la carga muerta del edificio (peso propio y cargas permanentes) y la rigidez está directamente relacionada con el sistema estructural del edificio, sean columnas y diafragmas de piso para estructuras aporricadas y muros y placas en el caso de estructuras en mampostería estructural. Según expone el ingeniero Luis Enrique García Reyes, en su libro Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico, se han



reportado los siguientes rangos de valores usuales tanto para estructuras residenciales como para muros de 1 y 2 pisos:

**TABLA N° 3: Valores típicos de periodo para estructuras y muros de 1 y 2 pisos.**

	T(s)	f(Hz)
<b>Estructuras.</b>	0.1-0.2	5-10
<b>Muros.</b>	0.05-0.09	12-20

FUENTE: (Reyes, 1998, pág. 93).

(Balachandran, 2006, pág. 79), el valor recíproco del periodo es la frecuencia natural,  $f$ , de la ec (1.9). El valor que pueda tomar la frecuencia natural depende de las propiedades del sistema y están en función de la inercia, rigidez y amortiguamiento del sistema, independiente de tiempo externo, dependiente de las fuerzas impuestas al sistema.

Para sistemas de un grado de libertad, un incremento en la rigidez o reducción en la masa o momento de inercia; incrementan la frecuencia natural, así una reducción de la rigidez o un incremento de la masa, o momento de inercia reducirá el valor de la frecuencia natural, de manera equivalente el mejor desplazamiento estático tendrá una menor frecuencia natural.

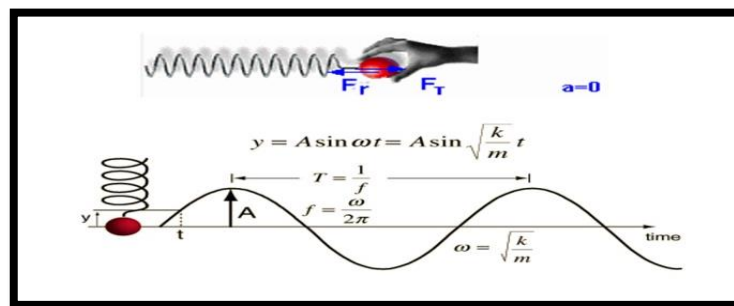
$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (1.18)$$

La frecuencia natural se expresa en hercios o ciclos por segundo (cps) debido a que la cantidad  $\omega_n$  solo difiere de la frecuencia natural  $f$  en el factor constante  $2\pi$ , también algunas veces se le denomina frecuencia natural. Para distinguir entre estas dos expresiones de la frecuencia natural. Se puede llamar  $\omega_n$  a la frecuencia circular o angular, a menudo estas dos cantidades se distinguen por el contexto o por las unidades, la frecuencia natural  $f$  se expresa en cps, como se ha iniciado mientras que la frecuencia circular  $\omega_n$  se da en radianes por segundo (rad/seg).

**c).- FRECUENCIA CIRCULAR****DEFINICIÓN:**

La velocidad angular es una medida de la velocidad de rotación. Se define como el cambio del desplazamiento angular por una unidad de tiempo. Aunque, se la define para el movimiento de rotación del sólido rígido, también se la emplea en la cinemática de la partícula o punto material, especialmente cuando esta se mueve sobre una trayectoria cerrada (circular, etc). Para un objeto que gira alrededor de un eje, cada punto del objeto tiene la misma velocidad angular. La velocidad tangencial de cualquier punto es proporcional a su distancia del eje de rotación. Medido como rad/seg.

**FIGURA N° 13: Gráfica Del Comportamiento De Una Oscilador Simple Sin Amortiguamiento.**



FUENTE: <http://mecanica-unefa.blogspot.pe/2011/06/unidad-12-vibraciones-mecanicas.html>.

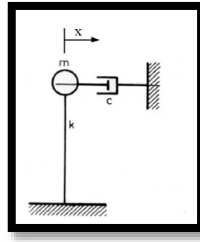
**d).- FRECUENCIA NATURAL****DEFINICIÓN:**

Está definido como el número de revoluciones circulares en un intervalo de tiempo dado. Donde un sólido alterado de su posición de descanso tiende a vibrar a ciertas frecuencias denominadas naturales o resonantes cuando éste es excitado. Para cada frecuencia natural, el sólido adquiere una determinada forma denominada forma modal. El análisis de frecuencia calcula las frecuencias naturales y las formas modales asociadas. Las unidades para expresar su magnitud se describe en Hz lo que equivale a un ciclo/seg.

### 2.2.4.1.2. SISTEMAS AMORTIGUADOS

(Ing Nicola Tarque, 2003); Todos los sistemas presentan un cierto grado de amortiguamiento, de lo contrario oscilarían eternamente sin variar su amplitud. El amortiguamiento en las estructuras atenúa las oscilaciones gradualmente hasta detenerlas.

**FIGURA N° 14. Modelo un grado de libertad con amortiguamiento.**



Fuente: (CASSANO, 2009)

Si se asume que la estructura del ejemplo de la pérgola posee amortiguamiento viscoso, se tiene la siguiente ecuación diferencial que describe el movimiento amortiguado en vibración libre como:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0; \quad (2.1)$$

La constante de amortiguamiento  $C$ , representa la energía que se disipa en un ciclo de vibración libre o en un ciclo de vibración bajo excitación armónica. La ecuación (2.1).

La solución de esta ecuación diferencial en función del tiempo para vibraciones libres amortiguadas está dada por la expresión:

$$x(t) = e^{-\xi \omega_n t} (A \cos(\omega_a t) + B \sin(\omega_a t)) \quad (2.2)$$

Donde:

$\xi$  = Factor de amortiguamiento = 0.05.

$\omega_n$  = Frecuencia circular del sistema rad/seg.

$\omega_a$  = Frecuencia angular amortiguada (rad/seg).

A, B = Las constantes de la ecuación (2.2) dependen de las condiciones iniciales y se calculan con:

$$A = x(0)$$

$$B = \frac{\dot{x}(0) + x(0)\xi\omega_a}{\omega_a}$$

Reemplazando los valores de A y B en la ecuación:

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left( x_0 \cos(\omega_a t) + \left( \frac{v_0 + \xi x_0 \omega_n}{\omega_a} \right) \text{sen}(\omega_a t) \right) \quad (2.3)$$

Donde:

$\omega_a$  = Frecuencia angular amortiguada (rad/seg).

$$\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

$\xi$  = Factor de amortiguamiento = 0.05.

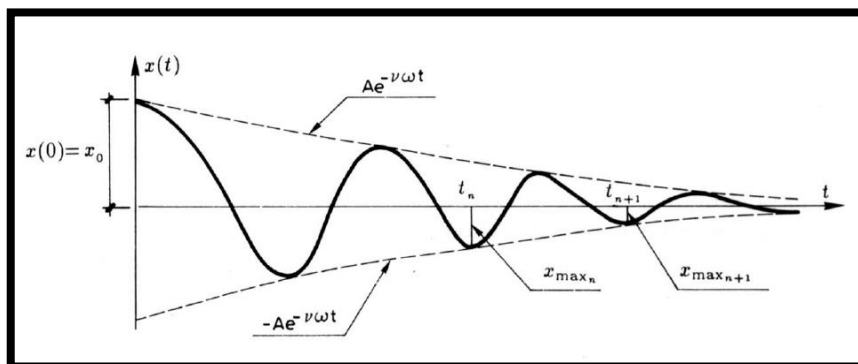
$$\xi = \frac{C}{2m\omega_n}$$

$\omega_n$  = Frecuencia angular del sistema (rad/seg).

$v_0 = \dot{x}(0)$  = Corresponde a la velocidad inicial.

$x_0 = x(0)$  = Corresponde a la posición inicial.

**FIGURA N° 15: Vibraciones libres amortiguadas.**



Fuente: (CASSANO, 2009).

La ecuación del movimiento amortiguado también se puede expresar como:

$$x(t) = x_{max} * e^{-\xi \omega_n t} (\cos(\omega_d t - \phi)) \quad (2.4)$$

Donde:

$$x_{max} = \sqrt{\left[ \frac{\dot{x}(0) + x(0)\xi\omega_n}{\omega_d} \right]^2 + [x(0)]^2}$$

$v_0 = \dot{X}$  = Corresponde a la velocidad inicial.

$x_0$  = Corresponde a la posición inicial.

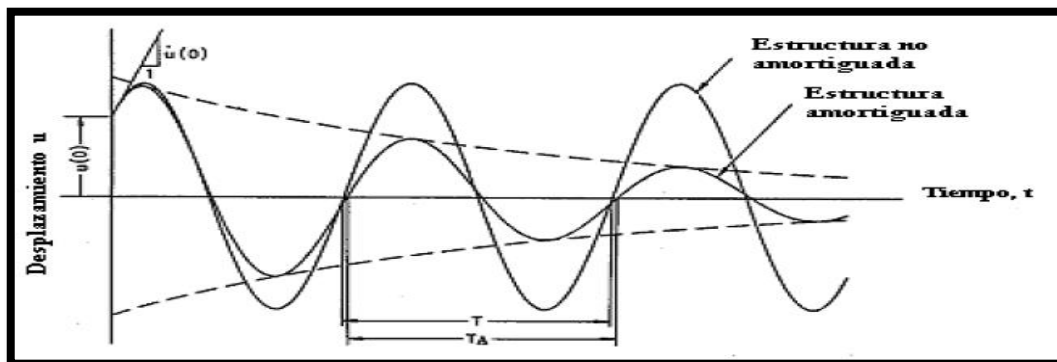
$\omega_n$  = Frecuencia angular del sistema.

$$\phi = \text{atan} \left[ \frac{\dot{x}(0) + x(0)\xi\omega_n}{\omega_d} \right]$$

$\phi$  = Ángulo de fase.

La figura muestra gráficamente la ecuación (2.2), y su relación con la respuesta del sistema no amortiguado bajo iguales condiciones iniciales.

**FIGURA N° 16: Efectos del amortiguamiento en las vibraciones libres.**



Fuente: (Ing Nicola Tarque, 2003)

En el caso amortiguado, el sistema oscila con un periodo ligeramente mayor que el del caso no amortiguado. La amplitud de las oscilaciones amortiguadas decrece en forma exponencial.

El periodo de la vibración amortiguada se relaciona con el de la vibración no amortiguada mediante la expresión:

$$T_a = \frac{T}{\sqrt{1 - \xi^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sqrt{m/k}; \quad (2.5)$$

Para la mayoría de las estructuras el factor del amortiguamiento ( $\xi$ ) es menor a 0.2, por lo que el período amortiguado ( $T_a$ ) es prácticamente igual al período natural no amortiguado ( $T$ ).

Según: (Ing Nicola Tarque, 2003); el amortiguamiento en estructuras en vibración libre produce oscilaciones de amplitud exponencialmente decrecientes, y de períodos ligeramente mayores al de los casos no amortiguados.

Los sistemas estructurales amortiguados de varios grados de libertad se idealizan considerando un amortiguamiento viscoso. Estos sistemas se perturban desde su posición de equilibrio y presentan un decaimiento de su amplitud, hasta lograr el equilibrio estático.

El periodo amortiguado ( $T_a$ ), la frecuencia circular ( $\omega_a$ ) y la frecuencia cíclica ( $f_a$ ), de cualquiera de los "n modos de vibración, se relacionan al igual que los casos de sistemas sin amortiguamiento.

### 2.2.5. VIBRACIÓN FORZADA

(Reyes, 1998, págs. 27-31); Toda estructura se ve afectada numerosas veces durante su vida útil por efectos dinámicos que van desde magnitudes despreciables, hasta efectos que pueden poner en peligro su estabilidad. Dentro de los tipos de excitación dinámica que pueden afectar una estructura, o un elemento estructural, por ello es posible reconocer las siguientes fuentes de excitación dinámica:

Causada por equipos mecánicos - Dentro de este grupo están los efectos causados por maquinarias y equipos que tengan componentes que roten o se desplacen periódicamente.

Causada por impacto - El hecho de que una masa sufra una colisión con otra, induce una fuerza impulsiva aplicada sobre las dos masas, la cual induce vibraciones.

Causada por explosiones - Una explosión produce ondas de presión en el aire, o movimientos del terreno. -ambos efectos afectan estructuras localizadas cerca del lugar de la explosión.

Causada por el viento - La intensidad de las presiones que ejercen el viento sobre las estructuras varía en el tiempo. Esto induce efectos vibratorios sobre ellas.

Causada por olas - En las estructuras hidráulicas las olas inducen efectos dinámicos correspondientes a las variaciones del empuje hidráulico sobre ellas.

Causada por sismos - El efecto sobre las estructuras de los movimientos del terreno producidos por la ocurrencia de un sismo conduce a vibraciones importantes de la estructura.

#### 2.2.5.1. ECUACIÓN DE MOVIMIENTO Y EQUILIBRIO DINÁMICO

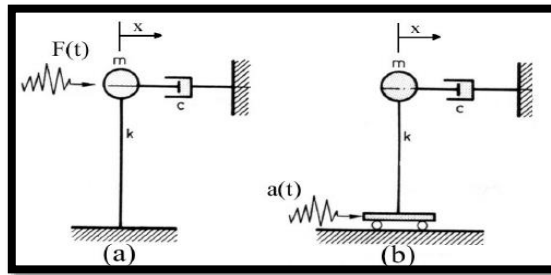
Para: (Wilson, 2014); según el principio de d'alembert se logra explicar el equilibrio de fuerzas de un sistema de varios grados de libertad con masa concentrada, en función del tiempo puede expresarse a través de la siguiente relación:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

Dónde:

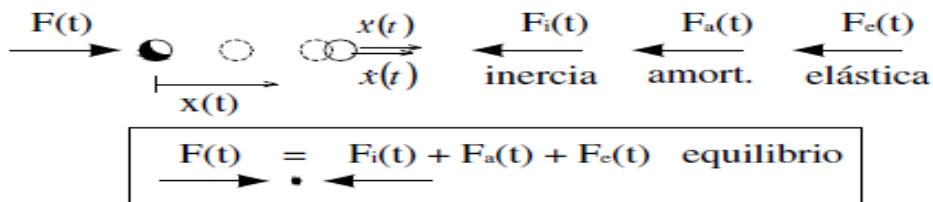
M = es la matriz de masa (concentrada o consistente), C es la matriz de amortiguamiento viscoso (incluido para aproximar la disipación de energía en la estructura real) y K es la matriz de rigidez estática para el sistema de los elementos estructurales los vectores que dependen del tiempo  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ ,  $x(t)$ , Son los desplazamientos nodales absolutos, velocidades nodales absolutas y aceleraciones nodales absolutas respectivamente, generados por una fuerza F(t).

FIGURA N° 17. Principio de D´alembert, a) Fuerza aplicada. b) Modelo sísmico.



Fuente: (CASSANO, 2009)

Realizando la sumatoria vectorial de cada una de las fuerzas y utilizando el principio de D'Alembert puede plantearse la siguiente ecuación después de remplazar las definiciones de las diferentes fuerzas:

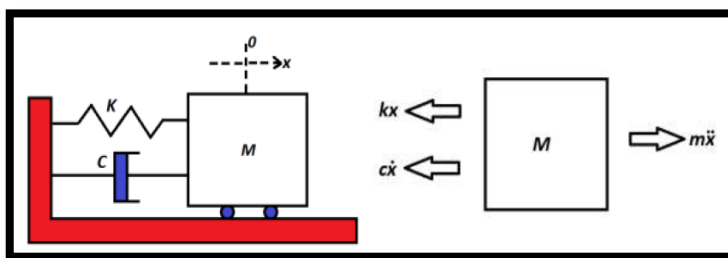


Según: (Paz, 1992, págs. 10-13); Indica que un sistema puede ser puesto en estado de equilibrio dinámico agregando a las fuerzas externas, una fuerza ficticia conocida como inercia, fuerzas elástica y fuerzas de disipación de energía.

**2.2.5.2. OSCILADORES SIMPLES.**

Según: (Paz, 1992, pág. 15). Las características de un oscilador simple usualmente se modelan como un sistema que tiene una masa cualquiera M, por un resorte con constante K y un amortiguador con constante C que condicionan el movimiento.

FIGURA N° 18: Sistema Lineal Amortiguado De Un Grado De Libertad.







**FUENTE:** (RAMOS EMILIANI & RINCÓN RUBIANO, 2012)

Según: (Paz, 1992, pág. 15) Al plantear una aplicación sencilla de una fuerza sobre la masa, obtenemos las fuerzas que actúan sobre ella.

En el sistema lineal amortiguado, la fuerza del amortiguador es directamente proporcional a la velocidad relativa entre los dos extremos de este. Esta fuerza esta descrita por la siguiente ecuación:

$$F_a = c \dot{x}$$

Donde:

$F_a$ = fuerza producida por el amortiguador.

$C$  = constante de amortiguador.

$\dot{x}$  = velocidad relativa entre los extremos del amortiguador.

Otra de estas fuerzas corresponde a la fuerza del resorte que aplicando la ley de Hooke se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$F_r = k x$$

Donde:

$F_r$  = fuerza producida por el resorte.

$k$  = constante de resorte.

$x$  = desplazamiento relativo entre los extremos del resorte.

La tercera fuerza que actúa sobre el sistema de un grado de libertad es la fuerza inercial producida por la aceleración de la masa, descrita por la siguiente ecuación:

$$F_i = m \ddot{x}$$

Donde:

$F_i$ = fuerza de inercia producida por el movimiento.

$m$  = masa.

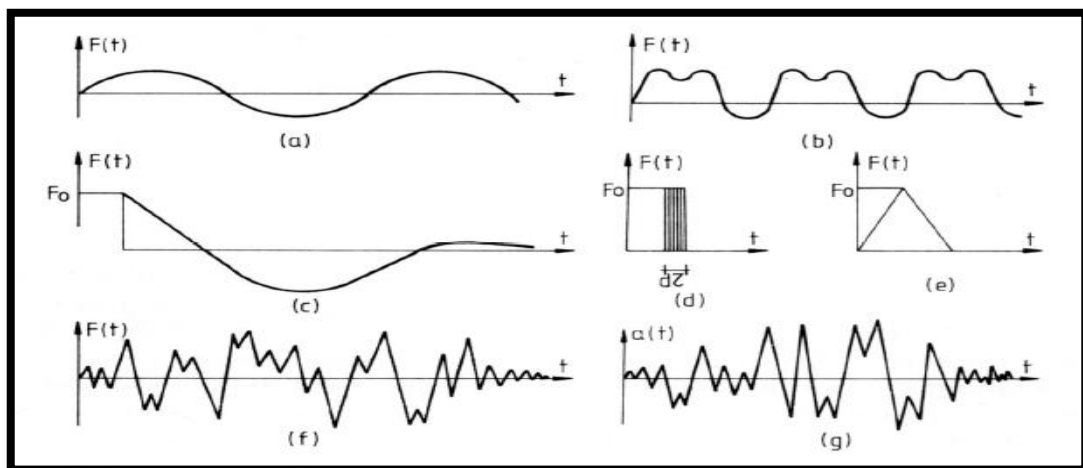
## 2.2.6. RESPUESTA DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

### 2.2.6.1. EXCITACIÓN ARMÓNICA

(Paz, 1992, págs. 33-37). El movimiento de estructuras ante excitaciones armónicas es decir que están sujetas a fuerzas o desplazamientos cuyas magnitudes pueden ser representadas por una función seno o coseno del tiempo. Este tipo de excitación produce uno de los movimientos más importantes en el estudio de vibraciones mecánicas, así como en aplicaciones de dinámica estructural.

En muchos casos las estructuras están sometidas a la acción de maquinaria en rotación, que produce excitaciones armónicas.

**FIGURA N° 19: Tipos de cargas dinámicas. a) Armónica b) periódicas c) cuasi periódica d, e) fuerzas impulsivas f) carga dinámica general g) aceleración sísmica del terreno**



Fuente: (CASSANO, 2009)

(CHOPRA, 2014, págs. 66-89); Se estudia entonces el caso en que la estructura se encuentra sometida a una fuerza externa variable armónicamente en el tiempo. La ecuación (3.1) muestra ésta expresión:

$$F(t) = F_0 \text{sen}(\bar{\omega}t) \quad (3.1)$$

El término  $(F_0)$  representa la magnitud máxima de la fuerza externa, que varía según la función  $\text{sen}(\bar{\omega}t)$  donde  $(\bar{\omega})$  es la frecuencia circular de excitación de la fuerza externa.

### 2.2.6.1.1. SISTEMAS SIN AMORTIGUACIÓN

(Paz, 1992, págs. 39 - 43). La fuerza ( $F_0$ ) aplicada al oscilador simple de la figura es armónica y está dada por  $F_0 \text{sen}(\bar{\omega}t)$  donde ( $\bar{\omega}$ ) es la frecuencia circular de excitación de la fuerza externa. La ecuación diferencial que se obtiene sumando todas las fuerzas en el diagrama de cuerpo libre.

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \text{sen}(\bar{\omega}t) \quad (3.2)$$

La solución de la ecuación puede ser expresada como:

$$x(t) = x_c(t) + x_p(t) \quad (3.3)$$

Donde  $x_c(t)$  es la solución complementaria que satisface a la ecuación homogénea o sea, la ecuación (3.2) con el segundo miembro igualado a cero;  $x_p(t)$  es la solución particular de la ecuación no homogénea, ecuación (3.2). La solución complementaria viene dada por la ecuación (1.8) como:

$$x_c(t) = A\cos(\omega_n t) + B\text{sen}(\omega_n t) \quad (3.4)$$

Dónde: frecuencia natural del sistema  $\omega_n = \sqrt{k/m}$

La naturaleza de la función forzada en la ecuación (3.2) sugiere que se tome como solución particular:

$$x_p(t) = x \text{sen } \bar{\omega}t \quad (3.5)$$

Donde  $x$  es el valor máximo o amplitud de la solución particular. La aplicación de la ecuación (3.5) en la ecuación (3.2) seguida de la simplificación de factores comunes da:

$$-m\bar{\omega}^2 x + kx = F_0 \quad (3.6)$$

$$x = \frac{F_0/k}{(1 - r^2)} \quad (3.7)$$

En la cual  $r$  (razón de frecuencias) es la razón entre la frecuencia de la fuerza aplicada  $\bar{\omega}$  y la frecuencia natural ( $\omega_n$ ) de vibración del sistema, o sea:

$$r = \frac{\bar{\omega}}{\omega_n} \quad (3.8)$$

Combinando las ecuaciones (3.4), (3.5), (3.6) en la ecuación (3.3) resulta:

$$x(t) = A\cos(\omega_n t) + B\sin(\omega_n t) + \frac{F_0}{k(1-r^2)} \sin(\bar{\omega}t) \quad (3.9)$$

Si las condiciones iniciales en el instante  $t = 0$ , se toman iguales a cero ( $x_0 = 0$ ,  $v_0 = 0$ ), las constantes de integración determinadas para la ecuación, aplicadas a la siguiente ecuación (3.10):

$$x(t) = \frac{F_0}{k(1-r^2)} \sin(\bar{\omega}t - r * \sin\omega t) \quad (3.10)$$

En la ecuación (3.10) se puede ver que la respuesta viene dada por la superposición de dos términos armónicos de frecuencias diferentes. Por lo tanto, el movimiento resultante no es armónico; sin embargo, en casos reales, fuerzas de amortiguación estarán siempre en el sistema y harán que el segundo término, con la frecuencia libre del sistema, desaparezca eventualmente. Por esta razón, este término se denomina respuesta transitoria.

El término con la frecuencia forzada  $\bar{\omega}$  en la ecuación (3.10) se conoce con el nombre de respuesta permanente.

$$x(t) = \frac{F_0/k}{(1-r^2)} (\sin \bar{\omega}t) \quad (3.11)$$

Es evidente que en el caso de un sistema sin amortiguación, la componente transitoria de la solución no desaparece y por lo tanto, la respuesta está dada por dos términos de la ecuación (3.10). Se puede observar también en la misma ecuación o en la ecuación (3.11), que cuando la frecuencia forzada,  $\bar{\omega}$ , es igual a la frecuencia natural,  $\omega_n$ , ( $r = 1$ ), la amplitud del movimiento tiende a aumentar infinitamente. Un sistema que actúa bajo una excitación externa con una

frecuencia forzada  $\bar{\omega}$  que coincide con la frecuencia natural,  $\omega_n$ , se dice que está en resonancia.

En esta circunstancia la amplitud se incrementa gradualmente hasta el infinito. Sin embargo, los materiales comúnmente usados en la práctica están sujetos a límites de resistencia y los fallos estructurales ocurrirán mucho antes de que las amplitudes puedan alcanzar valores extremadamente altos.

### 2.2.6.1.2. SISTEMAS CON AMORTIGUACIÓN

Por lo tanto, la ecuación diferencial del movimiento amortiguado es:

$$m\ddot{x} + kx + c\dot{x} = F_0 \text{sen}(\bar{\omega}t) \quad (3.12)$$

La solución de esta ecuación diferencial no homogénea está dada por:

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} [A \cos(\omega_a t) + B \text{sen}(\omega_a t)] +$$

$$+ \frac{F_0}{k} [(1 - r^2)^2 + ((2\xi r^2)^2)]^{-1} [(1 - r^2) \text{sen}(\bar{\omega}t) - 2\xi r * \cos(\bar{\omega}t)] \quad (3.13)$$

Donde:

$\xi$  = Factor de amortiguamiento = 0.05.

El parámetro ( $r$ ) representa la razón entre la frecuencia circular de excitación ( $\bar{\omega}$ ), frecuencia amortiguada y la frecuencia natural ( $\omega_n$ ).

La expresión:

$$A \cos(\bar{\omega}t) + B \text{sen}(\bar{\omega}t)]$$

Del primer sumando, representa una vibración libre amortiguada conocida como respuesta transitoria, debido a que su amplitud se disipa en el tiempo. Luego de que la respuesta transitoria se disipa, la estructura vibra en un estado denominado respuesta de régimen permanente, durante el tiempo que dure la carga armónica.

### 2.2.6.1.3. RESPUESTA MÁXIMA

Las máximas deformaciones se pueden producir antes de que la estructura alcance el régimen permanente. Si se simplifica la respuesta transitoria, la ecuación (3.3) queda como:

$$x(t) = \frac{F_0}{k} [(1 - r^2)^2 + (2\xi r^2)^2]^{-1/2} [(1 - r^2) \text{sen}(\bar{\omega}t) - 2\xi r \text{cos}(\bar{\omega}t)] \quad (3.14)$$

Operando algebraicamente la ecuación (3.5), se obtiene la respuesta de la estructura para un movimiento armónico simple de frecuencia, desfasado con respecto a la fuerza externa ( $F(0)$ )

$$x(t) = x_{\max} \text{sen}(\bar{\omega}t - \phi) \quad (3.15)$$

Donde:

$x_{\max}$ : es la respuesta máxima:

$$x_{\max} = \frac{F_0}{k} * [(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2]^{-1/2} \quad (3.16)$$

El término  $x_{\max}$ , representa el máximo desplazamiento de la estructura, y ( $\phi$ ) el ángulo de fase que se calcula con:

$$\phi = \text{atan}[2\xi r / (1 - r^2)] \quad (3.17)$$

El cociente ( $\phi / \omega_n$ ) es el tiempo de retraso de la respuesta con respecto a la excitación. La figura N°18 muestra la variación en el tiempo de la fuerza externa  $F(t)$  y el desplazamiento de la estructura  $x(t)$ .

FIGURA N° 20: Desplazamiento inducido por fuerza armónica.



Fuente: (Ing Nicola Tarque, 2003).

Si se analiza la ecuación (3.7) se observa que el término  $(F_0 / k)$  representa el desplazamiento que se produce en la estructura, si la fuerza externa se aplica en forma estática, es decir, si:  $F(t) = F(0)$ . Los términos restantes de la ecuación (3.7) indican el efecto de haber aplicado la carga en la forma dinámica, por lo tanto, se puede escribir:

$$x_{\text{max}} = x_{\text{estatico}} * R_d \quad (3.18)$$

Dónde: Desplazamiento estático ( $x_{\text{estático}}$ ) es:

$$x_{\text{estatico}} = F_0/k \quad (3.19)$$

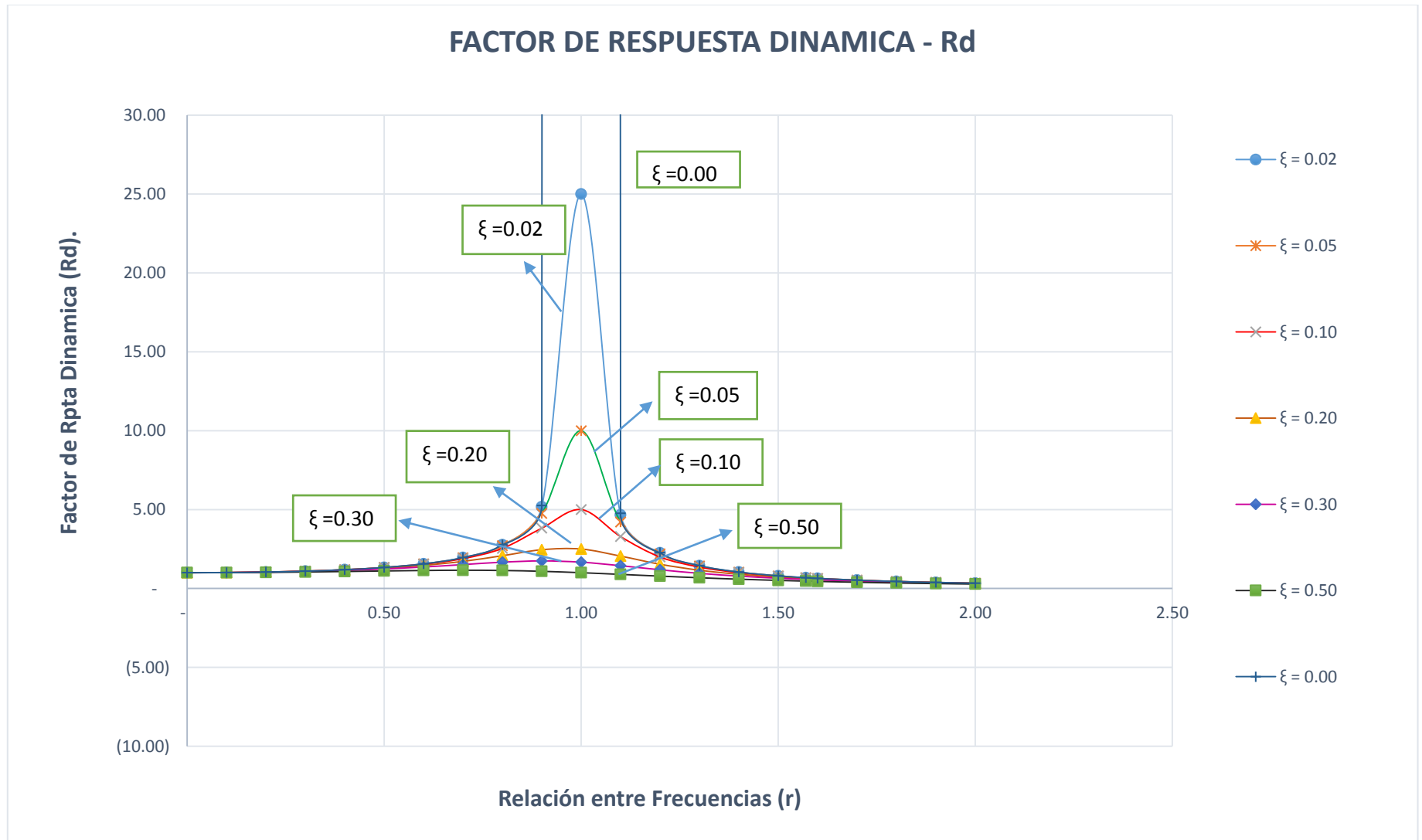
#### 2.2.6.1.4. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN

El término  $(R_d)$  (ec 3.11), se denomina factor de magnificación dinámica, que depende sólo de la relación de frecuencias ( $r = \bar{\omega} / \omega_n$ ) y del factor de amortiguamiento ( $\xi$ ). Físicamente este factor representa cuanto se amplifica la respuesta estática por el efecto de aplicar una carga dinámica.

$$R_d = [(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2]^{-1/2} \quad (3.20)$$

En la figura se aprecia la variación del factor de magnificación dinámica ( $R_d$ ) con respecto a la relación de frecuencias ( $r$ ), para determinados valores de amortiguamiento (recordar que para la mayoría de las estructuras de concreto armado, la relación de amortiguamiento  $\xi < 0.2$ ).

FIGURA N° 21: Factor de amplificación dinámica.



Fuente: Elaboración propia.



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE".

(Ing Nicola Tarque, 2003); Se observa de la figura, que si la frecuencia natural del sistema ( $\omega_n$ ) es mucho mayor que la frecuencia de excitación ( $\bar{\omega}$ ), es decir ( $r < 1$ ), la deformación de la estructura es prácticamente igual a la deflexión estática, independientemente del amortiguamiento. Se considera en este caso que el efecto dinámico es despreciable.

Si por el contrario, la frecuencia natural del sistema ( $\omega_n$ ) es mucho menor que la frecuencia de excitación ( $\bar{\omega}$ ), es decir ( $r > 1$ ), la fuerza externa varía rápidamente en comparación con la respuesta de la estructura. Por lo tanto, el factor de amplificación dinámica ( $R_d$ ) tiende a cero, es decir, la masa del sistema controla la respuesta de la estructura.

Para valores de la frecuencia de excitación cercanos a la frecuencia natural del sistema (por ejemplo, para valores de ( $r$ ) comprendidos entre 0.25 y 2.5), la respuesta de la estructura depende del factor de amortiguamiento, ( $\xi$ ). Para valores de ( $r$ ) muy cercanos a la unidad, o cuando las frecuencias de excitación y natural valores pequeños de amortiguamiento. En el caso ideal en que ( $r = 1$ ) y ( $\xi = 0$ ), la deformación de la estructura es máxima, y se dice que la estructura "entra en resonancia".

La frecuencia de resonancia se puede calcular con la expresión:

$$\omega_{resonancia} = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi} \quad (3.21)$$

De la ecuación (3.21) se concluye que para valores pequeños de amortiguamiento ( $\xi$ ), la frecuencia de resonancia es prácticamente igual a la frecuencia natural del sistema ( $\omega_n$ ).

Por lo tanto, el factor de amplificación dinámica ( $R_d$ ) correspondiente se calcula para ( $r = 1$ ) en la ecuación (3.20), con la expresión aproximada:

$$R_d = \frac{1}{2\xi}, \quad (3.22)$$

Hipótesis simplificativas:

- i- En estructuras civiles,  $0,002 < \xi < 0,2$ , por lo que puede reemplazarse ( $\omega_a$  por  $\omega_n$ ).
- ii- La función coseno puede reemplazarse, sin que ello implique grandes variaciones en los valores máximos, por una tipo seno.

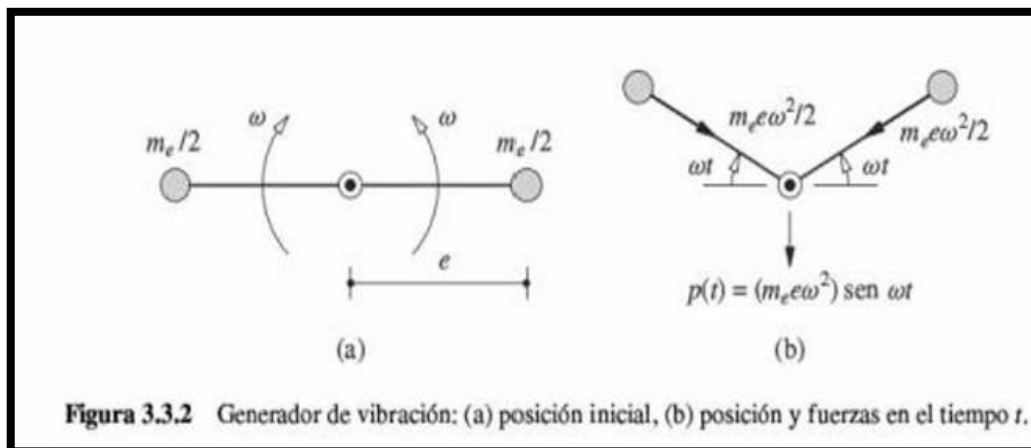
### 2.2.6.1.5. RESPUESTA ANTE UN GENERADOR DE VIBRACIÓN

(CHOPRA, 2014, pág. 85). Los generadores de vibración (o máquinas de agitación) proporcionan una fuente de excitación armónica. En esta sección se presentan los resultados teóricos para la respuesta estacionaria de un sistema de 1GDL ante una fuerza armónica causada por un generador de vibraciones.

#### Generador de Vibración

Un generador de vibración que tiene la forma de dos cestas planas que giran en direcciones opuestas alrededor de un eje vertical. Las dos masas "m" actúan como masas concentradas con excentricidad = e, sus localizaciones en el momento  $t = 0$ . Se muestran en (a) y en algún tiempo t en (b).

FIGURA N° 22: Generador de Vibración a) posición inicial, b) posición y fuerzas en el tiempo,t.



Fuente: (CHOPRA, 2014, pág. 85)

Los componentes x de las fuerzas de inercia de las masas en rotación se combinan para producir una fuerza.

$$F_o = m * e_o * \bar{w}^2 * (\text{sen } \bar{w}t) \quad (3.23)$$

Si se atornilla el generador de vibraciones a la estructura que debe excitarse, esta fuerza puede ser transmitida a la estructura. La amplitud de la fuerza armónica es proporcional al cuadrado de la frecuencia de excitación. Por lo tanto, la generación de la fuerza en frecuencias bajas resulta difícil y poco práctica si se desea obtener la respuesta estática de una estructura.

La forma de una excitación armónica, por lo tanto se describe la siguiente ecuación:

$$F(t) = F_o * \text{sen}(\bar{w}t) \quad (3.24)$$

$F_o$  = Amplitud máxima del movimiento.

$\bar{w}$  = Frecuencia de excitación.

La respuesta a un movimiento armónico posee una solución particular que representa la naturaleza de la función forzada, se toma como:  $X_p = x \text{sen}(\bar{w}t)$

Donde  $x$  = máximo valor o amplitud de la solución particular, derivando en términos de velocidad y aceleración. Reemplazamos en la ecuación de equilibrio dinámico, se obtiene:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m * x * \bar{w}^2 \text{sen}(\bar{w}t) \quad (3.25)$$

Esta última ecuación tiene la misma forma para el movimiento del oscilador simple excitado armónicamente por una fuerza de amplitud  $F_o$  y donde  $x$  es la distancia entre el eje y la masa rotante, a la cual llamaremos ( $e_o$ ):

$$F_o \text{sen}(\bar{w}t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (3.26)$$

$$F_o * \text{sen}(\bar{w}t) = m * e_o * \bar{w}^2 * \text{sen}(\bar{w}t) \quad (3.27)$$

La amplitud del desplazamiento en estado estacionario de un sistema de 1GDL están dadas por los valores máximos de las ecuaciones (3.26) y (3.27) con:

$$F_o = m * e_o * \bar{w}^2 \quad (3.28)$$

## Respuesta Estructural

Si se supone que la masa excéntrica "m", es pequeña en comparación con la masa m de la estructura, la ecuación que controla el movimiento de un sistema de 1GDL excitado por un generador de vibración es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m * eo * \bar{w}^2 * sen(\bar{w}t) \quad (3.29)$$

### 2.2.6.2. EXCITACIONES TRANSITORIAS

(Paz, 1992, págs. 67-68); Las estructuras reales están frecuentemente sujetas a cargas las cuales no son armónicas.

Físicamente el impacto necesariamente involucra conservación de energía. Cuando un objeto en movimiento golpea una estructura, la fuerza que frena la masa satisface la conservación de momento y energía. La energía cinética del cuerpo que impacta será parcialmente convertida en energía de deformación en el punto específico, y en parte será disipada; por fricción y deformación plástica local. Además, la energía de deformación es 'radiada' a través de ondas de esfuerzo. Se asume que la rigidez implica el cambio instantáneo de la velocidad al producirse un impacto, por lo tanto, implica la aceleración infinita y una fuerza infinita. En las estructuras reales la pérdida de aceleración está limitada por la deformación elástica y plástica, que en efecto amortiguan el golpe, y son importantes para hacer una estimación razonable de la capacidad local o rigidez en el punto de impacto.

Cuando el impacto es una condición de servicio de rutina, la estructura debe seguir siendo elástico o casi. En muchos problemas de diseño mecánico o estructural, es un requisito probar que la estructura permanece sustancialmente intacta, a pesar de que se le ha dañado de alguna manera. La deformación plástica local puede ser tolerada, siempre que la respuesta global sea casi elástica y puede ser calculado en base a un equilibrio de energía.

#### 2.2.6.2.1. RESPUESTA ELÁSTICA

(Reyes, 1998, págs. 31-34); El modelo más simple y conservador es asumir que la estructura sigue siendo perfectamente elástica y que la energía cinética de entrada se convierte completamente en energía de deformación dentro de la

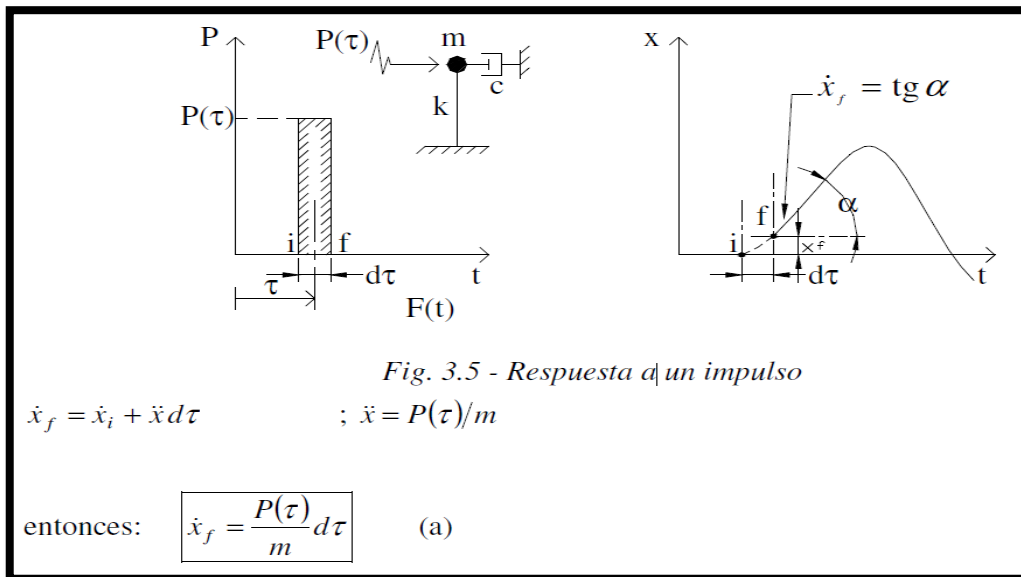
estructura. Un simple cuerpo elástico, normalmente un resorte con constante de rigidez,  $k$ , impactado donde una masa,  $m$ , inicia su movimiento con una velocidad,  $V$ . La fuerza de impacto,  $F$ , representada por el resorte y su opuesta reacción actúan para frenar la masa y comprimir el resorte a una máxima distancia. El cálculo simula el trabajo que se ha generado por la energía cinética de entrada.

Al momento de ocurrir el impacto un objeto pesado se detendrá más rápidamente a diferencia de uno que no lo es. La duración será más pequeño y la fuerza más grande. La estimación de la duración es más una medida de la escala de tiempo.

**2.2.6.2.1. CARGA IMPULSIVA E INTEGRAL DE DUHAMEL PARA SISTEMAS AMORTIGUADOS**

(Paz, 1992, pág. 68); Una carga impulsiva es una carga que se aplica durante un corto tiempo de duración. Consideremos que un sistema de un grado de libertad está sujeto a una carga impulsiva ( $F(t)$ ). El impulso resultante en un tiempo ( $t$ ) durante el intervalo  $dt$ , está representado por el área sombreada mostrada en la figura N°23.

**FIGURA N° 23: Carga de impulso.**



Fuente: (CASSANO, 2009).

Este impulso actuando sobre el cuerpo de masa ( $m$ ), produce un cambio en la velocidad el cual puede ser determinado con la segunda ley de Newton, como:

$$F(t) = m * a = m \frac{dv}{dt}$$

La magnitud del impulso, es equivalente a la masa multiplicada por un cambio en la velocidad ( $\Delta v$ ). Al aplicar lo anterior a un sistema elástico de un grado de libertad imponiendo un impulso a la masa del sistema, o sea una fuerza de magnitud definida durante un intervalo de tiempo muy corto, se le está produciendo un cambio de velocidad ( $\Delta v$ ), este incremento de la velocidad puede ser considerado como una velocidad inicial de la masa en el tiempo ( $t$ ).

#### 2.2.6.2.2. EFECTOS DE LA FORMA DE PULSO

(CHOPRA, 2014, págs. 151-153); Los espectros de choque para tres tipos de pulsos de formas: rectangular, medio-ciclo sinusoidal y triangular, cada uno con el mismo valor de fuerza máxima ( $P(t)$ ).

1.- Para un valor dado de amplitud de impulso de carga, el factor de amplificación dinámica, es el máximo para el caso de impulso rectangular seguido por el de media onda sinusoidal y el pulso triangular. Esto se puede atribuir a la cantidad de impulso bajo el área del gráfico de fuerza-tiempo.

2.- El factor de amplificación dinámica, durante un impulso rectangular alcanza el máximo valor y permanece especialmente para sistemas con periodo alto, más allá de dos veces la duración del pulso.

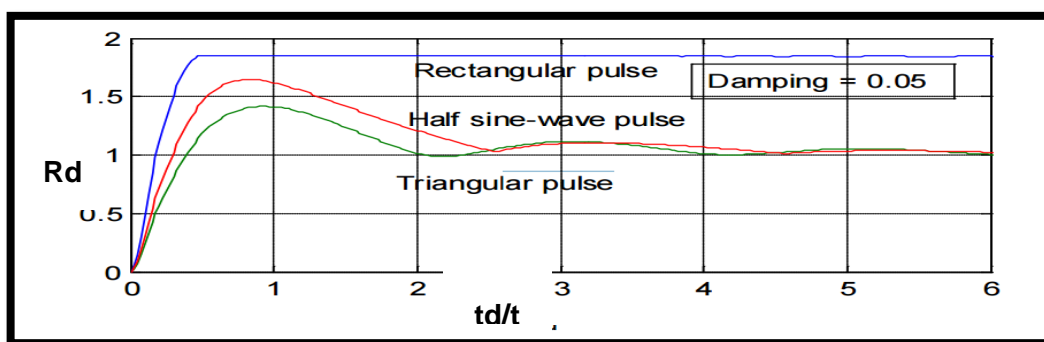
3.- El incremento de amortiguación, reduce los valores del factor de amplificación dinámica, para todas las cargas de impulso. Reducción es proporcional al cambio en la amortiguación.

4.- La duración de la fuerza de impulso ( $t_d$ ); se aproxima al periodo fundamental de la estructura, la amplitud de la vibración se vuelve máxima.

El pulso rectangular, en el que la fuerza aumenta repentinamente de cero a ( $P(0)$ ), produce la mayor deformación. El pulso triangular en el que el aumento de la fuerza es en un principio el más lento de los tres pulsos, produce la menor

deformación. El pulso sinusoidal de medio ciclo, en el que la fuerza se incrementa inicialmente a una tasa intermedia, provoca una deformación que para muchos valores de  $(td/T)$  es mayor que la respuesta al pulso triangular. Si la duración del pulso ( $td$ ) es más corta que  $(T/2)$ , la respuesta máxima absoluta del sistema se produce durante su fase de vibración libre y está controlada por la integral de tiempo del pulso. A medida que la duración del pulso se vuelve demasiado corta en comparación con el periodo natural del sistema, se convierte en un impulso puro de magnitud.

**FIGURA N° 24: Representación de tipos de fuerzas de pulso**



**Fuente:** <http://www.ijser.org/researchpaper%5CEffect-of-Damping-on-Shock-Spectra-of-Impulse-Loads.pdf>.

Donde:

$R_d$  = factor de amplificación.

$td$  = tiempo de duración de la carga.

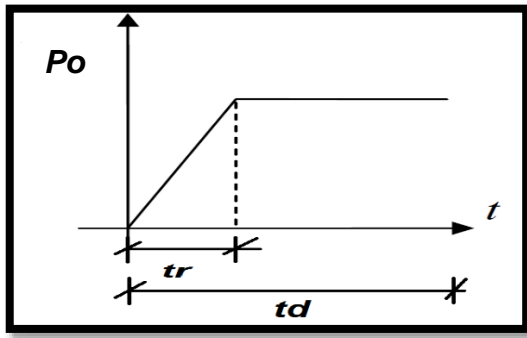
$T$  = periodo fundamental de vibración estructural.

## FUERZA ESCALONADA CON TIEMPO DE CRECIMIENTO FINITO

### 2.2.6.2.3. FUNCIÓN RAMPA

(CHOPRA, 2014, págs. 131-135); Una variación de respuesta de la fuerza de impacto es el paso rampa, donde mientras la aplicación de la fuerza sea gradual, la amplificación de la fuerza será menos severa.

FIGURA N° 25: Fuerza de pulso tipo rampa.



Donde:

$F(t)$  = Fuerza aplicada.

$t_r$  = Tiempo de elevación de la carga.

$t_d$  = Tiempo de duración de la carga.

Fuente: elaboración propia.

La fuerza aplicada ( $P(0)$ ) aumenta linealmente con el tiempo. La fuerza aplicada se define como:

$$P(t) = P_0 \frac{t}{t_r}$$

$$m\ddot{x} + kx = P_0 \frac{t}{t_r}$$

Donde:

$t$  = tiempo.

$t_r$  = tiempo de elevación de la carga.

En la realidad una fuerza nunca puede aplicarse súbitamente; por ello, es interesante considerar una fuerza dinámica creciente de tiempo finito pero que permanezca constante a partir de ese momento.

$$p(t) = \begin{cases} P_0 \left( \frac{t}{t_r} \right); & t \leq t_r \\ P_0; & t \geq t_r \end{cases}$$





La excitación tiene dos fases: la fase creciente o de elevación y la fase constante.

La relación entre el tiempo de elevación de la fuerza y el periodo natural. El análisis se organiza en dos fases:

1.- Fase de vibración forzada; durante esta fase el sistema está sometido a una fuerza escalonada.

2.- Fase de vibración libre; después de que la fuerza termina en el tiempo que dura el pulso, el sistema experimenta una vibración libre.

1. Si: ( $t_r < T/4$ ); (es decir, un tiempo de crecimiento relativamente corto), lo que implica que la estructura recibe la excitación como una fuerza aplicada de forma súbita.

2. Si: ( $t_r > 3T$ ); (es decir, un tiempo de crecimiento relativamente largo), lo que implica que esta excitación afecta a la estructura como una fuerza estática.

(CHOPRA, 2014, págs. 151-153); Generalmente, se cumple que mientras el incremento de fuerza sea gradual, el tiempo de duración sea largo entonces el factor de amplificación aplicado en la estructura será más cercano a un caso estático.

- Si el tiempo de duración del pulso ( $t_d$ ) es más larga que ( $T/2$ ) la deformación máxima absoluta se produce durante la fase de vibración libre controlada por la integral de tiempo de pulso.
- Si el tiempo de duración del pulso ( $t_d$ ) es más corto que ( $T/2$ ) la deformación máxima absoluta se produce durante su fase de pulso.

Para un sistema sin amortiguamiento que inicia desde el reposo, la respuesta durante la fase creciente está dada por la ecuación:

$$x(t) = (x \text{ estatica}) \left( \frac{t}{t_r} - \frac{\text{sen } \omega_n * t}{\omega_n * t_r} \right)$$

Donde:

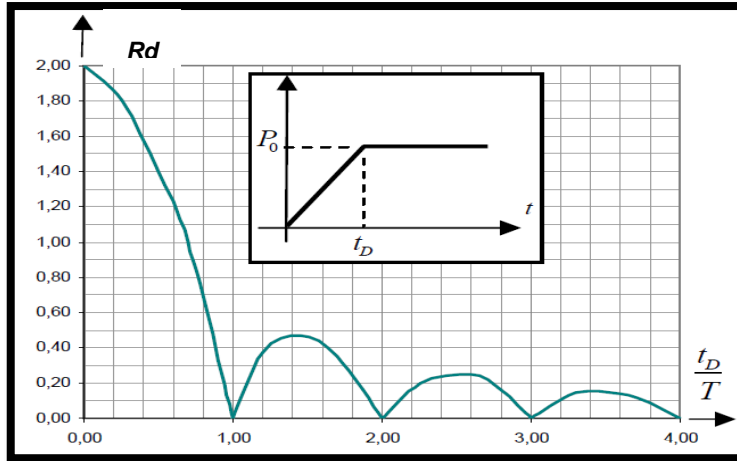
$x \text{ estat}$  = Desplazamiento estático ( $P_0 / K$ ).

$\omega_n$  = Frecuencia natural del sistema.

$t_r$  = Tiempo de elevación de carga.

$t$  = Tiempo.

FIGURA N° 26: Factor de amplificación dinámica para una fuerza de pulso.



Fuente: (CHOPRA, 2014).

#### 2.2.5.2.4. EFECTOS DEL AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

(CHOPRA, 2014, págs. 154-156); Si la excitación es un pulso único, el efecto del amortiguamiento en la respuesta máxima no suele ser importante, a menos que el sistema tenga un gran amortiguamiento. El amortiguamiento tiene una influencia importante en la respuesta máxima de los sistemas en estado estacionario de la excitación sea armónica en resonancia o cerca de ella.

En contraste, la energía disipada por el amortiguamiento es pequeña en los sistemas que se someten a excitaciones tipo pulso o transitorias, considere un sistema amortiguado viscosamente. El amortiguamiento no es tan influyente debido a la energía disipada acumulada en varios ciclos de vibración y esta fuerza ocurre antes de alcanzar el estado estacionario.

#### 2.2.6.3. EXCITACIÓN SÍSMICA

##### 2.2.6.3.1. FUERZAS SÍSMICAS

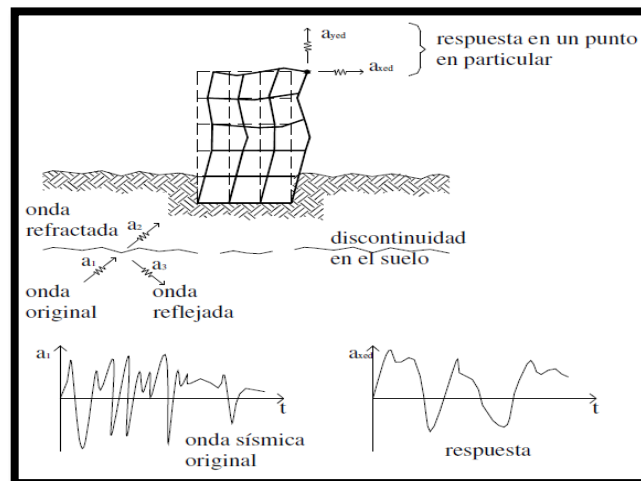
(CASSANO, 2009); La carga sísmica es la fuerza de inercia de la estructura cuya magnitud y distribución en la estructura cambia continuamente en el tiempo,  $t$ , desde el comienzo de la vibración. Como fenómeno de la dinámica, la fuerza

sísmica depende de la distribución de masa y rigidez a lo largo de la estructura. Además, como las estructuras se han diseñado típicamente para responder de manera inelástica bajo la vibración, la fuerza sísmica también depende de la manera en que la plasticidad se extiende a través de la estructura. Estos dos factores son críticos en la determinación de la máxima magnitud y la distribución de la fuerza sísmica y deben ser considerados en cualquier enfoque que intenta cuantificar la fuerza sísmica.

A diferencia de la carga de gravedad y la carga de viento, la carga sísmica en una estructura se genera por la deformación de la estructura en el momento en que esta vibra. Por consiguiente, la carga sísmica es parte de la dinámica de la estructura y se rige por la Segunda Ley de Newton. La gravedad y la carga efectiva de viento se rigen por la Tercera Ley de Newton.

El factor dinámico debe capturar el hecho de que la fuerza sísmica representa una ampliación o la amplificación de la vibración del terreno debido a un efecto de resonancia de la estructura, y que los cambios máximos de amplificación con el período de vibración libre de la estructura. Como se recordará, el período de vibración libre,  $T = \sqrt{M / K}$  para una estructura elástica.

**FIGURA N° 27: Filtrado de una señal sísmica.**



Fuente: (CASSANO, 2009).

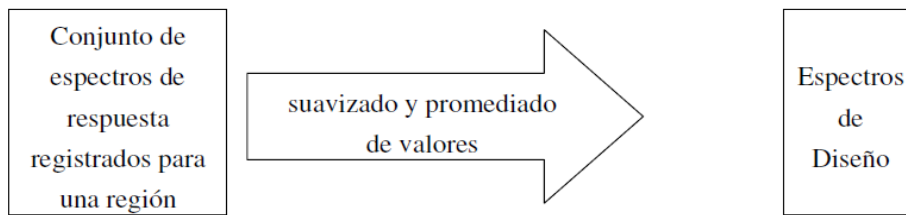
## INFORMACIÓN SÍSMICA BÁSICA

### 2.2.6.3.2. ESPECTROS DE DISEÑO EN LA DIRECCIÓN HORIZONTAL

(Navarro, 2013); Las fuerzas de diseño horizontal se definen desde la respuesta de aceleración máxima de la estructura, bajo un terremoto esperado, que se representa con el espectro de aceleración de la estructura.

En el plano horizontal, la acción sísmica actúa simultáneamente y de forma independiente en dos direcciones ortogonales que tienen el mismo espectro de respuesta.

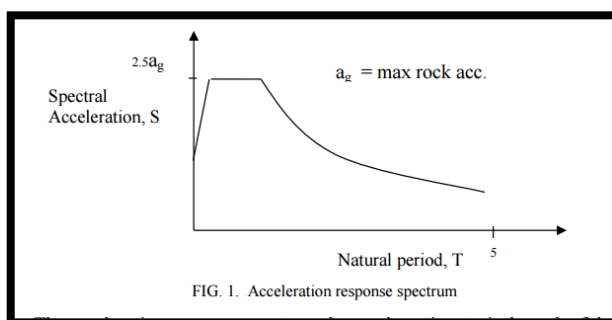
**FIGURA N° 28: Obtención del Espectro de Diseño.**



(CASSANO, 2009); El espectro de respuesta de aceleración es un gráfico típico de la aceleración máxima promediada y suavizada de estructuras elásticas fundadas sobre la roca, debido a un terremoto. Observe que el aumento máximo de la aceleración de la roca es de aproximadamente 2,5.

El gráfico de la aceleración máxima como una función de la vibración libre o período natural se llama el espectro de respuesta de aceleración.

**FIGURA N° 29: Aclaración del Espectro de Respuesta.**



Fuente: <http://richardpclarke.tripod.com/seismicload1.pdf>.

Nótese también que las estructuras con un pequeño periodo (es decir, alta rigidez o estructuras más pequeñas) experimentan un incremento mayor de la



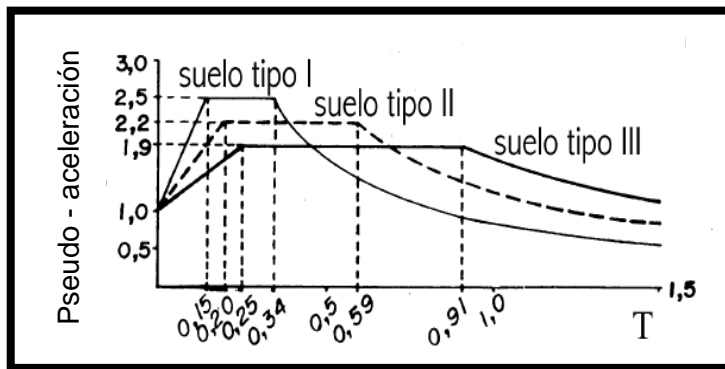
aceleración del suelo, y que después de la meseta la ampliación disminuye rápidamente.

Se entiende que existe una aceleración adicional debido a la resonancia del suelo como la aceleración del terreno se hace más periódica entonces el período se alarga. Se creía que el efecto de resonancia del suelo sólo fue significativo para estas estructuras de períodos más largos. Sin embargo, recientemente se reconoció que el efecto de resonancia del suelo también se produce en el rango de corto período, especialmente en sitios blandos. Por tanto, es importante tener en cuenta estos hechos mediante la definición del espectro en términos de dos factores - el corto periodo de aceleración, y la aceleración en un período más largo. Por convención, los espectros se describen en los períodos de 0,2 segundo y 1.0 segundo. El otro factor importante - el efecto de la propagación de la plasticidad o elasticidad de toda la estructura se considera ahora. Como la fuerza sísmica aumenta, los rendimientos de la estructura, pues causa que dicha estructura entre en el rango dúctil sucesivamente, hasta que la estructura ya no puede soportar toda la fuerza.

Las aceleraciones espectrales de diseño son los valores utilizados para el cálculo de la fuerza del sismo de diseño. Debe mencionarse aquí que este nivel de la fuerza sísmica corresponde a un terremoto moderado y para lo que el comportamiento previsto de la estructura es tal que los elementos no estructurales no caen sobre los ocupantes, y los elementos estructurales pueden ser reparables.

Las aceleraciones espectrales de diseño también consideran la amplificación de la vibración de la roca (donde el terremoto se origina) debido al suelo que cubre la roca.

Antes del uso de la aceleración espectral para definir el cortante en la base, se utilizó la aceleración del terreno. Sin embargo, se reconoció que la aceleración del suelo no se correlaciona con el daño estructural, así como la aceleración espectral, por lo que la aceleración espectral se utiliza en lugar de la aceleración del suelo.

**FIGURA N° 30: Espectro elástico de respuesta.**

Fuente: <http://richardpclarke.tripod.com/seismicload1.pdf>.

Para obtener el espectro de diseño tan sólo resta ajustarlo a las características de la estructura que se va a calcular, incorporando mediante un coeficiente empírico dado en la E030 el efecto del amortiguamiento (si  $\xi = 0,05$ ) y de la ductilidad de la estructura.

#### 2.2.6.3.3. DEFINICIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA USANDO NORMATIVAS

(ALEX H. BARBAT., pág. 84); Partiendo de una información sísmica básica sobre el emplazamiento geográfico de la edificación, las características locales del terreno de cimentación, la importancia estratégica de la construcción (e.g., hospitales e infraestructuras básicas se consideran construcciones de especial importancia) y la vida útil de la estructura, la E-030 define la acción sísmica mediante su espectro elástico de respuesta en aceleraciones. Posteriormente, dicho espectro es corregido de acuerdo a las características de amortiguamiento y ductilidad de la estructura, obteniéndose de esta manera el espectro de diseño en base al que calcular los desplazamientos modales máximos y, a partir de ellos, el resto de las variables (esfuerzos, tensiones, etc.).

#### 2.2.6.3.4. NORMATIVA SISMO RESISTENTE PERUANA (030 1998).

(ALEX H. BARBAT., págs. 84 - 85); La normativa peruana propone una expresión para determinar el cortante en la base:

$$V = \frac{ZUCS}{R} * W$$



Donde similarmente a la normativa UBC. Z, es un factor de zona, U es un factor de uso o importancia. S es un factor de suelo y C es un coeficiente sísmico, R es el factor de reducción por ductilidad y redundancia estructural y W es el peso del edificio, adicionalmente se debe verificar  $C/R \geq 0.1$ .

El factor de zona (Z) varía entre 0.1 y 0.45 y corresponde a la aceleración, máxima del terreno con una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años. El factor de importancia del edificio, U, varía entre 1.5 para edificios esenciales hasta 1 para edificios comunes. El factor de suelo, S, en función a la zona y el suelo varía entre 0.80 y 2 para suelos de roca o suelos muy rígidos y suelos flexibles y entre las zona 1 hasta la 4. El factor de amplificación sísmica, C, se define por las siguientes expresiones:

1.-  $T < T_p$ ;  $C = 2.5$ .

2.-  $T_p < T < T_I$ ;  $C = 2.5 * (T_p / T)$ .

3.-  $T > T_I$ ;  $C = 2.5 * (T_p * T_I / T^2)$

C = coeficiente de amplificación sísmica.

T = Periodo.

$T_p$  = Periodo que define la plataforma del factor "C".

$T_I$  = Periodo de la zona del factor "c" con desplazamiento constante.

Y corresponde a la amplificación dinámica de la aceleración en la base. Su valor máximo se limita 2.5. El factor -  $T_p$  es un periodo ligado el tipo de terreno que varía entre 0.3 a 1 para suelos rígidos y flexibles, respectivamente. El factor t es el periodo fundamental del edificio. El coeficiente de reducción de fuerzas por ductilidad e hiperestatismo se define en función del sistema estructural para cargas laterales y verticales. Los edificios de acero, los pórticos dúctiles de hormigón armado y el sistema dual tienen la máxima reducción correspondiente a 10 y no tienen limitación de altura. Estructuras en base a muros, de cortante de hormigón armado tienen un coeficiente de reducción de 8, también sin limitación de altura.



La mampostería armada o confinada se limita hasta 15 m. con un coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas de 6 y las construcciones de madera se limitan a 8 m. con una reducción de 7. Todos estos valores corresponden a estructuras regulares si no lo son el coeficiente de reducción son válidos solo si los coeficientes de reducción se reduce como mínimo a un 75 % de los valores anteriores. Por otra parte, se indica que los coeficientes de reducción son válidos solo si los elementos estructurales permiten la disipación pero no se indica claramente cuáles son los requisitos que proporcionan claramente ductilidad, por lo que se interpreta que pertenecen a detalles similares a los de los pórticos dúctiles del ACI.

Los límites al desplazamiento de entrepiso son 0.007, 0.01, 0.05, 0,01 para edificios de hormigón armado, acero, mampostería y madera respectivamente. El desplazamiento a verificar corresponde al obtenido de análisis estructural sin considerar el factor de reducción R o multiplicando por R el desplazamiento máximo obtenido por las cargas laterales reducidas.

#### 2.2.6.3.5. EXCITACIÓN SÍSMICA

(Ing Nicola Tarque, 2003, págs. 15-20), Si se analiza el edificio de dos pisos bajo un movimiento sísmico en su base, como se ilustra, el desplazamiento total del primer y segundo piso, respectivamente, son:

$$x_1(t) = x_g(t) + x_1(t) \quad (4.1)$$

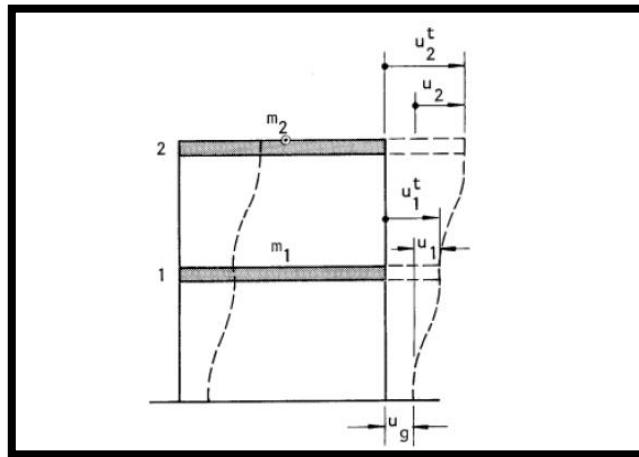
$$x_2(t) = x_g(t) + x_2(t) \quad (4.2)$$

$x_g(t)$  = desplazamiento del suelo.

$x_1, x_2(t)$  = desplazamiento del primer piso y segundo piso respectivamente.

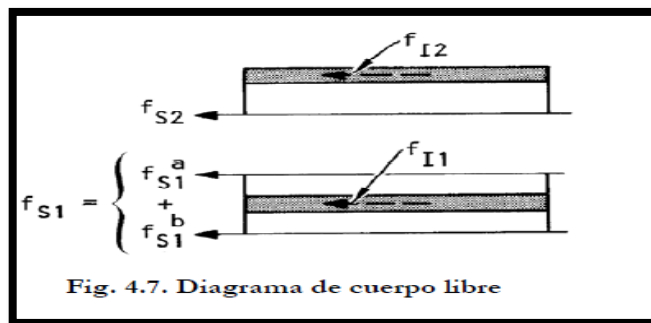


FIGURA N° 31: Edificio de dos pisos sometido a excitación sísmica.



Fuente: (CHOPRA, 2014)

FIGURA N° 32: Diagrama de cuerpo libre.



(Ing Nicola Tarque, 2003)

De acuerdo al diagrama de cuerpo libre mostrado las ecuaciones de equilibrio dinámico son:

$$f_{I1} + f_{S1} = 0 \quad (4.3)$$

$$f_{I2} + f_{S2} = 0 \quad (4.4)$$

Donde las masas ( $m_1$  y  $m_2$ ) de acuerdo a las aceleraciones impuestas, presentan las siguientes fuerzas de inercia:

$$f_{I1} = m_1 \ddot{x}_{1t} \quad (4.5)$$

$$f_{I2} = m_2 \ddot{x}_{2t} \quad (4.6)$$

Las ecuaciones (4.5) y (4.6) se pueden expresar como:

$$f_{11} = m_1(\ddot{x}_g + \ddot{x}_1) \quad (4.7)$$

$$f_{12} = m_2(\ddot{x}_g + \ddot{x}_2) \quad (4.8)$$

Entonces, las ecuaciones de equilibrio dinámico sin amortiguamiento son:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2(x_1 - x_2) = -m_1 \ddot{x}_g(t) \quad (4.9)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_1 - x_2) = -m_2 \ddot{x}_g(t) \quad (4.10)$$

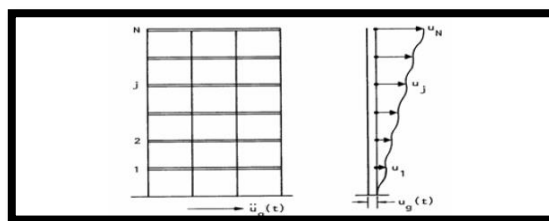
Estas expresiones se escriben de forma genérica como:

$$m \ddot{x} + kx = -M1 \ddot{x}_g(t); \quad (4.11)$$

En la ecuación (4.11), el vector desplazamiento se representa por ( $x$ ), el vector aceleración por ( $\ddot{x}$ ), y las matrices de masa y de rigidez por ( $m$ ) y ( $k$ ), respectivamente. El vector ( $1$ ) representa el desplazamiento resultante de la masa que se obtiene al aplicar estáticamente un desplazamiento unitario en la base del edificio. Finalmente, si se considera que la estructura presenta amortiguamiento viscoso, se debe considerar la matriz de amortiguamiento por el vector velocidad en la ecuación de movimiento.

La ecuación (4.11) se puede generalizar para un edificio de corte de N pisos, como el mostrado:

**FIGURA N° 33: Edificio de N pisos sometido a movimientos sísmicos.**



Fuente: (Ing Nicola Tarque, 2003)

En este caso si el edificio de N pisos, se encuentra sometido a una excitación en su base, todo el bloque del edificio presenta un movimiento de cuerpo rígido de desplazamiento ( $\ddot{x}_g(t)$ ), más una configuración deformada representada por: ( $x_j(t)$ ) con valores de  $j=1, \dots, N$ ; relativos.

Por lo tanto, la ecuación general del movimiento para el edificio de N pisos es:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -M \ddot{x}_g(t); \quad (4.12)$$

Donde la fuerza externa se representa con la siguiente expresión:

$$P_{EFFECTIVO}(t) = -M \ddot{x}_g(t) \quad (4.13)$$

(Ing Nicola Tarque, 2003); En conclusión, el desplazamiento total de cada nivel se expresa como la suma del desplazamiento total de la base del edificio, más el desplazamiento producido por la fuerza efectiva aplicada en cada nivel.

Donde el término del segundo miembro de la ecuación representa una fuerza externa equivalente a la excitación sísmica ( $\ddot{x}(t)$ ), que se representa como la aceleración en la base de la estructura en función del tiempo.

#### 2.2.6.3.6. RESPUESTA A UNA EXCITACIÓN SÍSMICA

(Ing Nicola Tarque, 2003, pág. 36); La ecuación del movimiento de edificios sometidos a excitación sísmica en su base, en función a las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, se define con la expresión:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -1 \times m \times \ddot{x} \quad (4.14)$$

Dada la complejidad de la ecuación (3.15) y la gran variabilidad que presenta la aceleración del suelo ( $\ddot{x}(t)$ ), la evaluación en forma analítica del desplazamiento ( $x(t)$ ), es prácticamente imposible.

Si bien existen varios métodos numéricos para calcular (generalmente empleando programas de computadora) la respuesta de la estructura en función del tiempo.

Las fuerzas internas como los cortantes y momentos, asociados a las deformaciones de un edificio de varios pisos, se determinan mediante el método de fuerzas laterales equivalentes. Estas son fuerzas externas que pueden ser aplicadas como cargas estáticas en función a un determinado desplazamiento  $x(t)$ .

$$F_n(t) = k * x(t). \quad (4.15)$$

$K$  = Rigidez del modo de vibración.

$x(t)$  = Desplazamiento correspondiente al modo de vibración.

Por lo tanto, cualquier fuerza interna se puede determinar por medio de un análisis estático de la estructura sujeta a un sistema equivalente de fuerzas laterales. Por ejemplo, la fuerza cortante ( $V_n$ ) y el momento en la base ( $M_n$ ) de una estructura se evalúan con las expresiones:

$$V_n(t) = \sum_{j=1}^N F(t) \quad (4.16)$$

$$M_n(t) = \sum_{j=1}^N h_j * F(t) \quad (4.17)$$

Donde:

$F(t)$  = Fuerzas laterales equivalentes para el n-ésimo modo de vibración.

$h_j$  = Altura del j-ésimo piso a la base.

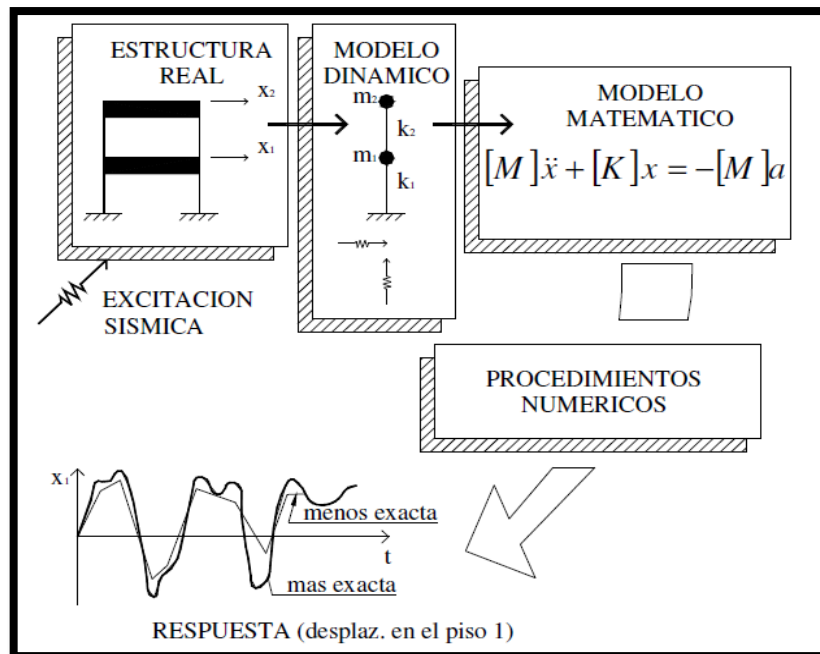
$V_n$  = Fuerzas cortantes.

$M_n$  = Momentos torsores.

#### 2.2.6.4. MODELOS DINÁMICOS

Según (Barbat., 2008); Desde el punto de vista del cálculo numérico, la respuesta de una estructura es el resultado de filtrar la serial de excitación, en este caso sísmica, a través de la misma estructura. La obtención de dicha respuesta, puede ser un análisis sísmico requiere la definición previa tanto del movimiento del terreno como de las características estructurales. El sujeto de análisis no es la propia estructura sino un modelo mecánico de la misma que en este caso es uno dinámico. La definición real del modelo depende del tipo de estructura analizado y pretende no solo proporcionar una descripción realista de su comportamiento, sino también desarrollar una serie de relaciones entre las acciones y la respuesta que describan el modelo matemático del problema. Las características a tener en cuenta en la definición del modelo matemático son la masa, el amortiguamiento, y la rigidez de la estructura.

FIGURA N° 34: Modelo de una estructura.

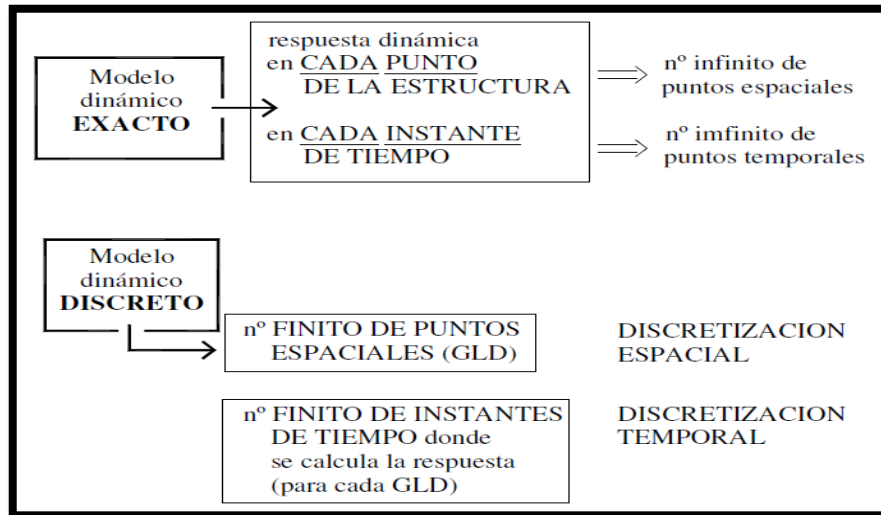


Fuente: (CASSANO, 2009)

(CASSANO, 2009); La respuesta dinámica depende además de otras propiedades como la capacidad de disipar energía por deformación plástica y las variaciones de las propiedades de los materiales causadas por la velocidad con

que se aplica la carga. Éstos y otros factores pueden ser importantes en algunos problemas, pero los más relevantes en todos los casos, son en definitiva el periodo natural y el amortiguamiento del sistema.

FIGURA N° 35: Modelos dinámicos.



Fuente: (CASSANO, 2009)

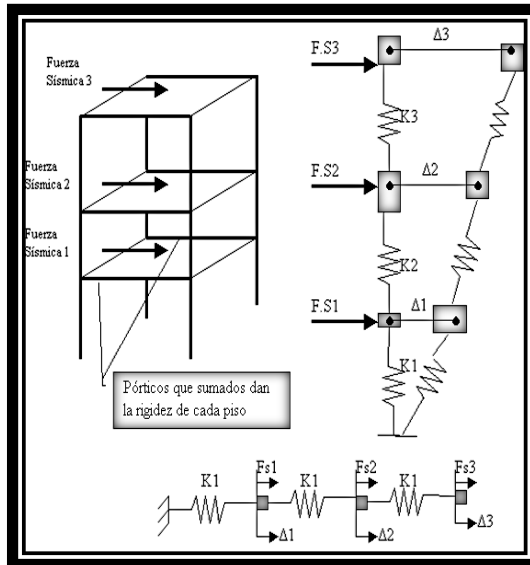
#### 2.2.6.4.1. MÉTODOS DE MODELADO DINÁMICO

Según: (Reyes, 1998, págs. 5-7) La masa se distribuye en todo el edificio, pero se idealizará como si estuviera concentrada en los niveles de los pisos. Este supuesto suele ser apropiado para edificios con varios niveles, porque la mayor parte de la masa del edificio se encuentra, en efecto, al nivel de los pisos.

La idealización de masas para un edificio de varios niveles se complica si el diafragma de piso no puede suponerse rígido en su propio plano (por ejemplo, en un sistema de piso con viguetas de madera y láminas de madera). La masa del diafragma debe entonces asignarse a los nodos individuales. Las cargas muertas y vivas distribuidas al nivel del piso se asignan a los nodos en ese piso de acuerdo con sus áreas tributarias correspondientes. Del mismo modo, los pesos distribuidos de los elementos estructurales y no estructurales en los entresijos deben distribuirse en los nodos en las partes superior e inferior del nivel de acuerdo a la estática. A demás, en la formulación de las propiedades de rigidez. De la estructura, también debe reconocerse la flexibilidad del diafragma;

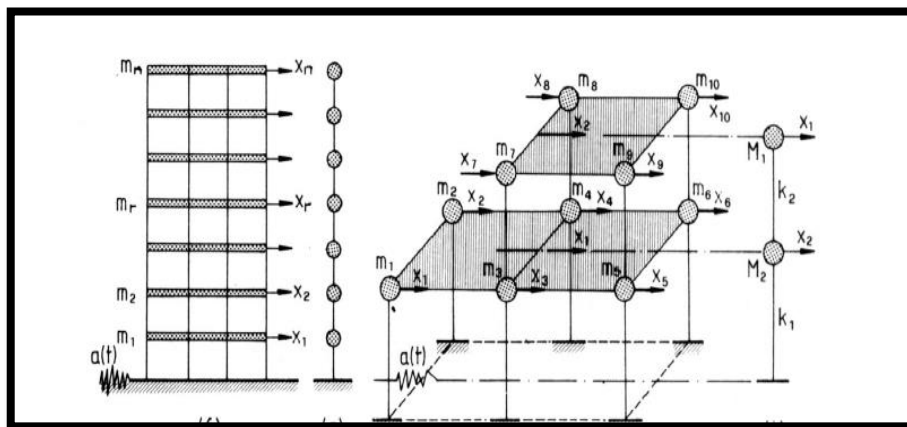
para este propósito, el método de los elementos finitos es eficaz en la idealización de diafragmas flexibles.

**FIGURA N° 36: Sistema de varios grados de libertad.**



**FUENTE:** (Charleson, 2012). **Red Internacional Para El Diseño De Ciudades Sísmicamente Resilientes.** [Figura]. [http://15wceesslatin.blogspot.com/2012\\_08\\_01\\_archive](http://15wceesslatin.blogspot.com/2012_08_01_archive).

**FIGURA N° 37: Modelo dinámico de un pórtico cortante.**

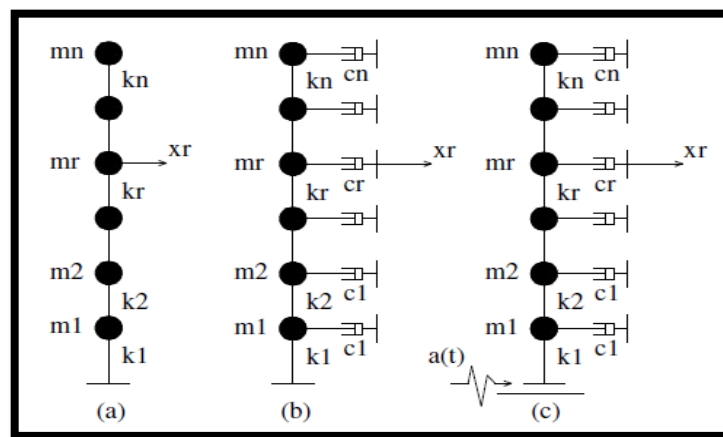


Fuente: (CASSANO, 2009)

Según; (CHOPRA, 2014, págs. 353-354); Antes de definir las fuerzas es necesario discretizar la estructura y definir grados de libertad. Una estructura reticular puede idealizarse como un conjunto de elementos (vigas, columnas, muros) interconectados en puntos nodales o nodos. Los desplazamientos de los nodos son los grados de libertad. En general, un nodo en un marco plano de dos

dimensiones tiene tres grados de libertad (dos traslaciones y una rotación). Para la idealización de esta estructura, se asume que los elementos estructurales como vigas y columnas carecen de masa, concentrándose sólo en las losas de entrepiso de cada nivel. El conjunto estructural de losas y vigas se consideran rígidas, en comparación de las columnas que se consideran flexibles para deformaciones laterales, pero rígidas verticalmente. Este modelo idealizado de la estructura de dos pisos, se conoce como edificio de corte. El modelo de edificio de corte es el más empleado en el estudio de la dinámica de estructuras de varios pisos.

**FIGURA N° 38: Modelo de varios grados de libertad. A) modelo conservativo. B) modelo con amortiguamiento. C) modelo sísmico.**



**Fuente:** (CASSANO, 2009)

Según (Reyes, 1998, pág. 332), La matriz de masa es obtenida dividiendo los pesos por la aceleración de la gravedad. Ésta puede expresarse de diferentes maneras. se ha optado por una matriz de masas concentradas: las masas se suponen concentradas en el centro de masas al nivel de piso (conocido como diafragma rígido), asociada con los tres grados de libertad en cada diafragma rígido, pues se asumen dos movimientos de traslación y uno de rotación. Este método es el más adecuado para el análisis de estructuras. Si planteamos la matriz diagonal de masa para un sistema de 3 grados de libertad, del sistema ilustrado en la figura anterior obtendríamos lo siguiente:

$$[M]= \begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 \\ 0 & 0 & m3 \end{bmatrix}$$



Si de igual manera planteamos la ecuación de rigidez del sistema obtenemos lo siguiente:

$$[K]=\begin{bmatrix} k1 + k2 & -k2 & 0 \\ -k2 & k2 + k3 & -k3 \\ 0 & -k3 & k3 \end{bmatrix}$$

De esta manera, las ecuaciones de movimiento son:

$$\begin{bmatrix} m1 & 0 & 0 \\ 0 & m2 & 0 \\ 0 & 0 & m3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_3 \\ \ddot{U}_2 \\ \ddot{U}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k1 + k2 & -k2 & 0 \\ -k2 & k2 + k3 & -k3 \\ 0 & -k3 & k3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_3 \\ U_2 \\ U_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Como se observa, existen determinadas características en las matrices que determinan la ecuación del movimiento. Por ejemplo, la matriz de masas es del tipo diagonal, y las matrices de rigidez y amortiguamiento son simétricas.

#### 2.2.6.4.2. RESPUESTA DINÁMICA DE UN SISTEMA.

(CASSANO, 2009); Cuando una estructura se encuentra sometida a un movimiento producido por fuerzas externas o de excitación en su base, su posición de equilibrio se interrumpe por la aparición de fuerzas de inercia que afectan a las masas de entrepiso. Entonces, la respuesta de una estructura en vibración libre se describe por el vector desplazamiento  $x(t)$ , que varía en el tiempo.

Los sistemas estructurales de varios grados de libertad no presentan un único movimiento armónico simple con una sola frecuencia de vibración. Por el contrario, no sólo los desplazamientos varían con el tiempo, sino también la configuración deformada de la estructura.

Cada una de las formas de vibración son conocidas como modos naturales de vibración ( $\phi_n$ ). Cada modo presenta un periodo natural de vibración ( $T$ ) característico.

(Navarro, 2013); El cálculo de los modos y frecuencias naturales de vibración, en el análisis del comportamiento elástico de las estructuras cumplen un rol importante en la evaluación de la respuesta dinámica, ya que se encuentran relacionados con la forma que el sistema responde ante una sollicitación.

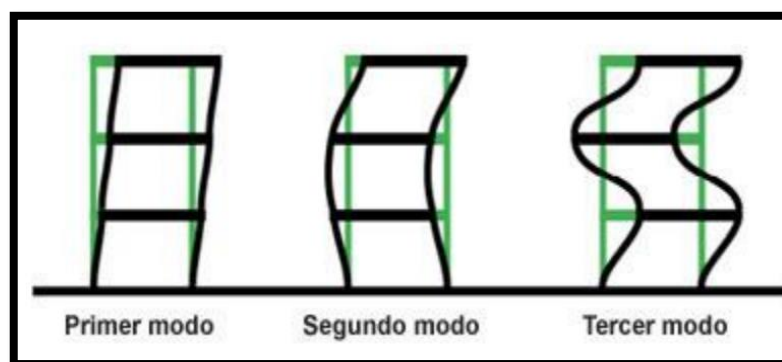
El vector  $\{\phi_n\}$  define sólo la deformada de la estructura vibrando con su correspondiente periodo natural. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el vector  $\{\phi_n\}$  no define los valores de desplazamientos de entrepiso. Para conocer estos desplazamientos se deben conocer las amplitudes de los movimientos.

Los valores de los modos generalmente se normalizan considerando como valor unitario el desplazamiento correspondiente al último nivel. También se pueden normalizar considerando el valor total de la masa como unitario. Sin embargo, cualquier parámetro de normalización no afecta al resultado final del análisis de la respuesta dinámica.

#### 2.2.6.4.3. MODOS DE VIBRACIÓN DE UN EDIFICIO – ANÁLISIS MODAL

(Navarro, 2013); Los edificios, así como las estructuras de cualquier material, poseen diferentes formas de vibrar frente a cargas dinámicas. Estos modos de vibrar se producen a diferentes periodos, por lo que durante un terremoto, pueden afectar la estructura en mayor o menor medida, dependiendo del contenido frecuencial de la fuerza aplicada. Estas formas de vibrar se conocen como modos de vibración. En la forma más básica, las estructuras oscilan de un lado hacia otro, esto corresponde con el modo fundamental o primer modo de vibración. Considerando el edificio como un cuerpo tridimensional, los modos de vibración pueden ser rotacionales o torsionales. Para edificios regulares en altura y elevación, y sin irregularidades en la distribución de masas y rigideces, el principal modo de vibración se corresponderá con el fundamental.

FIGURA N° 39: Tres primeros modos de vibración de una estructura.



Fuente: [https://www.wbdg.org/resources/seismic\\_design.php](https://www.wbdg.org/resources/seismic_design.php)



Para encontrar los modos de vibración, con sus correspondientes periodos o frecuencias, hay que resolver el problema de análisis modal de las ecuaciones dinámicas de movimiento para un sistema de múltiples grados de libertad en el caso de oscilación libre. El análisis modal se reduce a un problema de autovalores (también conocidos como valores propios o eigenvalues) y autovectores (también conocidos como vectores propios o eigenvectors). La interpretación física de los autovalores y autovectores representan las frecuencias y modos de vibración, respectivamente. Generalmente, los modos de vibración que interesan corresponden a las menores frecuencias, ya que suelen ser los modos predominantes en la vibración de la estructura.

En el análisis modal se suele considerar que el amortiguamiento es nulo, ya que presenta una muy buena aproximación y simplifica bastante los cálculos, de esta manera la ecuación dinámica de un sistema de múltiples grados de libertad en el caso de vibración libre.

#### **2.2.6.4.4. ANÁLISIS ESPECTRAL**

(Ing Nicola Tarque, 2003, págs. 39-41); Los valores máximos de la respuesta estructural de un edificio frente a un movimiento sísmico, generalmente son usados para calcular las fuerzas internas máximas de la estructura.

Por ejemplo, un modelo de un edificio de corte de  $n$  pisos, para el cual se han calculados los periodos de cada uno de sus modos naturales de vibración. La máxima respuesta en el  $n$ -ésimo modo natural de vibración.

Para cada uno de estos parámetros espectrales y para cada modo de análisis, corresponde a un determinado periodo natural ( $T$ ) y una razón de amortiguamiento ( $\xi$ ).

#### **2.2.6.4.5. CRITERIO DE COMBINACIÓN DE LA RESPUESTA MODAL**

(MINISTERIO DE VIVIENDA, 2016) Art 18.2.C. Mediante los criterios de combinación que se indican, se podrá obtener la respuesta máxima esperada designada por ( $r$ ) tanto para las fuerzas internas en los elementos componentes de la estructura, como para los parámetros globales del edificio como fuerza

cortante en la base, cortantes de entrepiso, momentos de volteo, desplazamiento total y relativo de entrepiso.

Representa la respuesta elástica máxima esperada (N) corresponde al efecto conjunto de diferentes modos de vibración empleados (Ni) podrá determinarse usando la combinación cuadrática completa (CQC), que representa la forma de combinar la respuesta de los diferentes valores calculados para cada modo.

Método de la Combinación Cuadrática Completa

$$N = \sqrt{\sum \sum r_i \rho_{ij} r_j}$$

Donde (**Ni** y **Nj**) representan las respuestas modales máximas del parámetro de estudio para los modos **i**, **j** respectivamente, mientras que (**P ij**) corresponde al parámetro de relación entre ambos modos, los coeficientes de correlación están dados por:

$$P_{ij} = \frac{8\xi^2(1+\lambda)\lambda^{3/2}}{(1-\lambda^2)^2 + 4\xi^2(1+\lambda)^2}$$

$\xi$  = Fracción de amortiguamiento crítico = 0.05 se puede suponer para todos los modos igual.

$\lambda$  = Relación entre frecuencias  $\omega_i$  y  $\omega_j$ .

$\omega_i, \omega_j$  = Frecuencias angulares de los modos i,j.

Alternativamente la respuesta máxima podrá estimarse mediante la expresión:

$$N = 0.25 * \sum_{i=1}^m |r_i| + 0.75 * \sqrt{\sum_{i=1}^m r_i^2}$$

En cada dirección se consideran aquellos modos de vibración cuya suma de masas efectivas sea por lo menos el 90% de la masa de la estructura, pero deberá tomarse en cuenta por lo menos los tres primeros modos predominantes en la dirección de análisis.

### 2.2.7. PARÁMETROS ESTRUCTURALES GLOBALES

Los parámetros que caracterizan la respuesta modal máxima de un edificio de cortante, por ejemplo; en un sistema cuenta con “ n ” grados de libertad, donde el análisis se realizará de acuerdo a las ecuaciones de movimiento con respecto al número de modos que el sistema posea, de las características más importantes de la respuesta se analizaran las siguientes: fuerzas sísmicas equivalentes modales en las plantas, los corrimientos modales de dichas plantas y el cortante modal en la base, parámetros importantes en el diseño de una estructura como: cortantes modales de piso, momento modal de vuelco y momento modal de torsión, un concepto que permite determinar de manera rigurosa el número de modos de vibración que se deben incluir en el análisis, es el de peso efectivo modal.

#### 2.2.7.1. PESO EFECTIVO MODAL

La carga muerta involucra el peso de los componentes estructurales de un edificio atribuidos al peso volumétrico del material que los constituya. En base a propiedades del concreto armado como la relación entre la densidad 2.4 ton/m<sup>3</sup> y el volumen correspondiente de los elementos estructurales como: muros, columnas. Vigas, losas.

$$\text{Peso} = \text{Peso Específico (material)} * \text{Volumen}$$

La carga viva sísmica es el peso de los objetos que se fijan al edificio por unidad de área. Como el movimiento de las personas dentro del edificio se diferencia de los elementos que constituyen la estructura, la carga viva causada por la gente no está incluido en la carga sísmica. Sólo los objetos fijos en el edificio se incluyen, ya que se mueven junto con el edificio, y los objetos que puedan deslizarse en el caso de los terremotos. Pero es difícil decidir si es fijo o no para todos los objetos en el edificio. Por lo tanto, la media de pesos de los objetos fijos para el área de carga en la Tabla N°4, que se puede utilizar como la carga viva sísmica en una Casa de Máquinas.

- La sobrecarga útil será asignada a cada piso según (Ketchikan Public Facilities, 10 - 2010), muestra la siguiente tabla:

Tabla N° 4: Carga viva uniforme.

ÁREA DE CARGA	SOBRECARGA ÚTIL – ton/m <sup>2</sup>
Sala de equipos.	0.50
Piso de mantenimiento.	0.50
Piso de turbina.	1.00
Piso de equipo mecánico y eléctrico.	1.00

Fuente: (Ketchikan Public Facilities, 10 - 2010)

Según (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2016, págs. 20-21); El peso (  $P$  ), se calculará adicionando a la carga permanente y total de la Edificación un porcentaje de la carga viva o sobrecarga que se determinará de la siguiente manera:

- a. En edificaciones de las categorías A y B, se tomará el 50 % de la carga viva.

$$Peso\ Total = CM + 0.5 (CV)$$

- b. En edificaciones de la categoría C, se tomará el 25 % de la carga viva.
- c. En depósitos, el 80 % del peso total que es posible almacenar.
- d. En azoteas y techos en general se tomará el 25 % de la carga viva.
- e. En estructuras de tanques, silos y estructuras similares se considerará el 100 % de la carga que puede contener.

#### 2.2.7.2. FUERZA CORTANTE EN LA BASE “V”

(CHOPRA, 2014, págs. 197-200); La fuerza cortante en la base, es la fuerza sísmica utilizada para el diseño de una estructura considerando que esta se encuentra en el rango elástico. Sin embargo, se puede llegar a confundir con la fuerza sísmica máxima, entonces la fuerza cortante se define como la fuerza sísmica que actúa en el sistema capaz de lograr que la primera rotula plástica se forme. La razón por la que no se usa la fuerza sísmica máxima es porque la distancia entre ambas se puede utilizar para abastecer especialmente miembros vulnerables de la estructura.

El factor de ductilidad o factor de redundancia considerando como la distancia entre la fuerza sísmica y la fuerza antes del colapso, juega un papel importante,

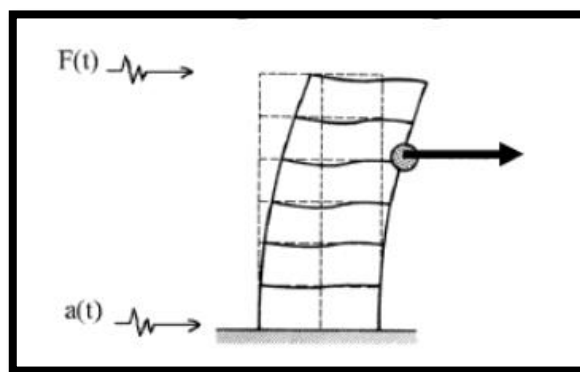
pues puede cambiar la respuesta e indicar el efecto de inelasticidad en la magnitud de la fuerza sísmica, puede ser determinado al dividir la aceleración ( $S_a$ ) por  $R$  (factor de ductilidad estructural). Lo que permite convertir un espectro elástico a un espectro inelástico.

Al incrementarse la formación de rotulas plásticas, el grafico de carga - desplazamiento se vuelve no lineal, cuando una rotula se forma, la rigidez reduce significativamente. A medida que se forma cada rotula de la estructura se redistribuyen los esfuerzos a otras secciones. Esto es cuando se produce la fuerza o resistencia máxima de la estructura.

La ecuación del cortante en la base inicia su cálculo en el espectro de respuesta para una estructura. Para una estructura de varios grados de libertad, puede ser modelada como un solo grado de libertad. Por lo tanto, el oscilador se modela con la primera modalidad de vibración que le corresponda.

(Wakabayashi, 1988, pág. 220); El cortante en la base ( $V$ ) se distribuye para cada piso, para calcular la fuerza lateral sísmica que actúa en cada uno. Los esfuerzos que se inducen por causa de esta fuerza lateral y cargas verticales, se suponen para verificar la seguridad estructural.

**FIGURA N° 40: Acción Sísmica Sobre Edificio.**



**FUENTE:** (Recarey Morfa, 2011). **Formulación de un método de distribución de fuerzas horizontales en edificios con entrepisos flexibles. Método RNA. [Figura].** Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2011000200005>.



Según (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2016, págs. 22-25); La fuerza cortante total en la base de la estructura, cuya magnitud y dirección, se determinarán por la siguiente expresión:

$$V = \frac{Z * U * C * S}{R} * W_i$$

Donde:

$V$  = Cortante Modal, Factor de zonificación =  $Z$ , Factor de ductilidad =  $R$ , Factor de uso =  $U$ , Parámetros de suelo =  $S$ , Factor de amplificación dinámica =  $C$  y otros factores en una forma similar a la del procedimiento de la fuerza equivalente.

Según: (Barbat., 2008, pág. 48); Se considera que la acción sísmica está definida mediante el espectro de respuesta en aceleraciones ( $S_a$ ) correspondiente a un movimiento del terreno a ( $t$ ). Relaciona el cortante modal en la base con la aceleración máxima de respuesta reducida por la aceleración de la gravedad.

La aceleración se puede obtener del espectro de diseño, el valor ( $S_a/g$ ); corresponde al coeficiente de diseño sísmico, ( $S_a = ZUCS / R$ ); determinado por el producto del:

Según: (Barbat., 2008, pág. 49);

$$V = W_i \frac{S_a}{g}$$

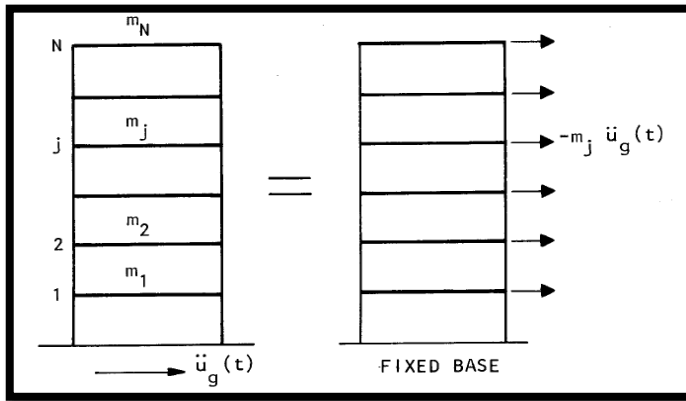
$W_i$  = Peso de la estructura.

$S_a$  = Pseudoaceleración máxima de respuesta.

$g$  = gravedad.



FIGURA N° 41: Sistema de oscilaciones equivalentes.



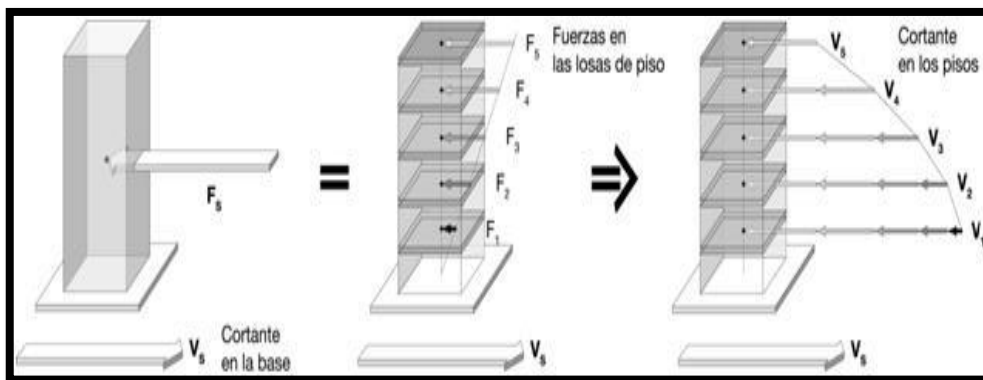
Fuente: (Ing Nicola Tarque, 2003)

2.2.7.2.1. FUERZA CORTANTE MÍNIMA

Según: (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2016), Para cada una de las direcciones consideradas en el análisis, la fuerza cortante en el primer entrepiso del edificio no podrá ser menor que el 80 % del valor calculado para la fuerza sísmica en altura, para estructuras regulares, ni menor que el 90 % para estructuras irregulares.

Si fuera necesario incrementar el cortante para cumplir los mínimos señalados, se deberán escalar proporcionalmente todos los otros resultados obtenidos, excepto los desplazamientos.

FIGURA N° 42: Fuerzas laterales y cortantes generadas debido al movimiento del terreno.



FUENTE: (Charleson, 2012). Red Internacional Para El Diseño De Ciudades Sísmicamente Resilientes. [Figura]. Recuperado de:

[http://15wceesslatin.blogspot.com/2012\\_08\\_01\\_archive](http://15wceesslatin.blogspot.com/2012_08_01_archive).



### **2.2.7.3. DESPLAZAMIENTO MODAL MÁXIMO.**

Según: Applied Technology Council ATC 40 Demanda (Desplazamiento): El movimiento del suelo durante un terremoto produce un patrón complejo de desplazamientos en la estructura que puede variar con el tiempo. Para una estructura dada y un movimiento del suelo, la demanda de desplazamiento es un estimado de la máxima respuesta esperada del edificio durante el movimiento del terreno.

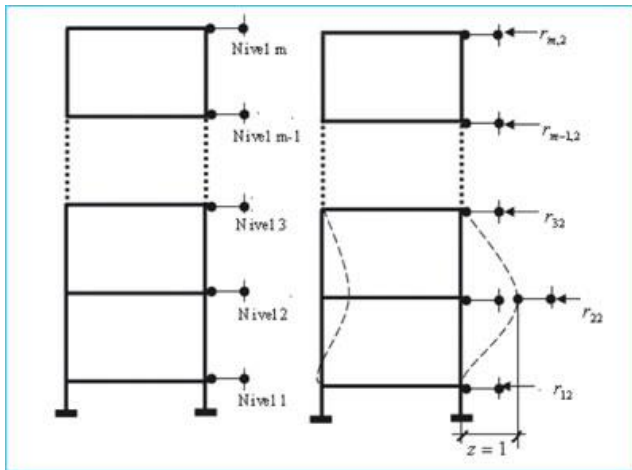
Según: (Barbat., 2008, pág. 49); Los desplazamientos modales máximos según todos los grados de libertad del modelo. La estructura tendrá desplazamientos dinámicos modales máximos que se presentan en cada modo individual, cuando el sismo actúa únicamente en la dirección  $x$  ó  $y$ .

#### **2.2.7.3.1. DEFLEXIÓN LATERAL. DERIVA O DISTORSIÓN**

(Wakabayashi, 1988, pág. 228); Puesto que una traslación lateral excesiva de los entrepisos causa fallas o inconvenientes en los miembros secundarios como ductos, muros de rellenos, cubos de escaleras y vidrios. La traslación lateral se limita a un valor específico, especifica el límite de  $1/150$  de la altura del entrepiso para edificios importantes y un centésimo para otros; mientras que el reglamento japonés y el UBC especifican un límite de  $1/200$  de la altura de entrepiso, a menos que el diseño demuestre que un mayor desplazamiento lateral es aceptable.

En el cálculo de la deflexión lateral usualmente se considera despreciar la contribución de los miembros secundarios no estructurales. La expansión y la contracción de las columnas flexionadas en estructuras esbeltas tienen un efecto relativamente grande en el desplazamiento lateral así como en la deflexión total lateral, por lo que deben considerarse.

**FIGURA N° 43: Desplazamientos de Entrepiso.**



**FUENTE:** (Recarey Morfa, 2011). **Formulación de un método de distribución de fuerzas horizontales en edificios con entrepisos flexibles. Método RNA.** [Figura]. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2011000200005>.

**DESPLAZAMIENTO LATERAL PERMISIBLE**

Durante el procedimiento de análisis el máximo desplazamiento relativo de entrepiso calculado según NTE 030 (diseño sismo-resistente), no deberá exceder la fracción de la altura de entrepiso (distorsión) que se indica, según el material predominante de la estructura:

**Tabla N° 5: Desplazamientos laterales permisibles.**

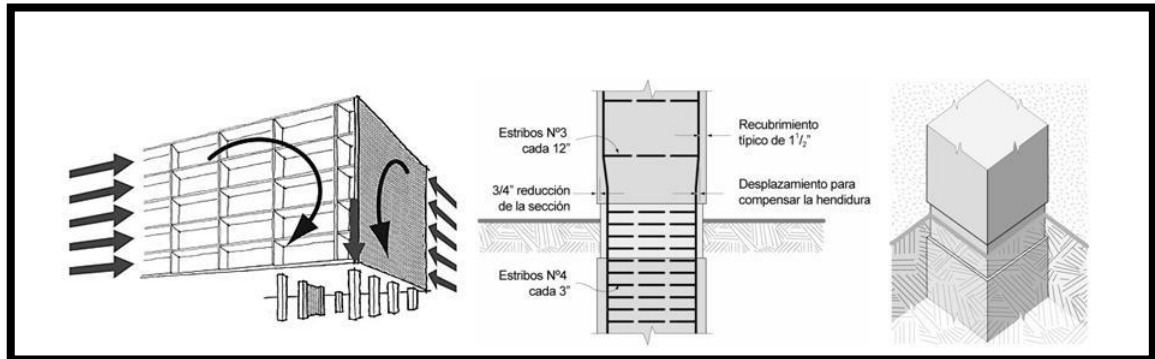
<b>Tabla N° 11</b>	
<b>LÍMITES PARA LA DISTORSIÓN DEL ENTREPISO</b>	
<b>Material Predominante</b>	<b>( <math>\Delta_r / h_{ei}</math> )</b>
Concreto Armado	0,007
Acero	0,010
Albañilería	0,005
Madera	0,010
Edificios de concreto armado con muros de ductilidad limitada	0,005

**FUENTE:** (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2016)

La norma Sismo - resistente E-030, considera que Para estructuras regulares, los desplazamientos laterales se calcularán multiplicando por 0,75 R los resultados obtenidos del análisis lineal y elástico con las solicitaciones sísmicas reducidas. Para estructuras irregulares, los desplazamientos laterales se

calcularán multiplicando por R los resultados obtenidos del análisis lineal elástico.

**FIGURA N° 44: Detalles en la parte inferior de las columnas.**



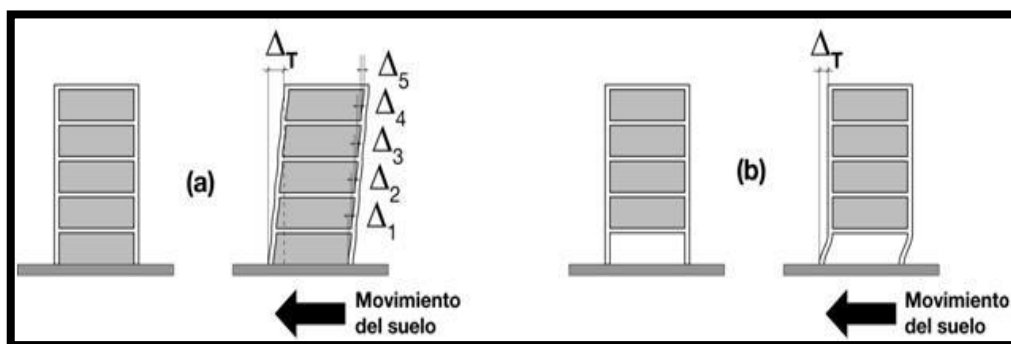
**FUENTE:** (Charleson, 2012). **Red Internacional Para El Diseño De Ciudades Sísmicamente Resilientes.** [Figura]. Recuperado de:

[http://15wceesslatin.blogspot.com/2012\\_08\\_01\\_archive](http://15wceesslatin.blogspot.com/2012_08_01_archive).

#### 2.2.7.3.2. EFECTO DE LA DERIVA EN UNA ESTRUCTURA:

Según: (ALEX H. BARBAT., pág. 48). Se usan desplazamientos entre - pisos para estimar los daños de elementos no estructurales y pueden ser calculados directamente en base a los probables valores pico de desplazamiento. El valor pico del esfuerzo cortante sería un buen estimado del índice de daño. El código actual sugiere un valor máximo de 0.007 de la relación de la deriva.

**FIGURA N° 45: Distribución de desplazamiento total generado.**



**FUENTE:** (Charleson, 2012). **Red Internacional Para El Diseño De Ciudades Sísmicamente Resilientes.** [Figura]. Recuperado de:

[http://15wceesslatin.blogspot.com/2012\\_08\\_01\\_archive](http://15wceesslatin.blogspot.com/2012_08_01_archive).

(Bhattacharjee, 2013); La deriva se define como la diferencia en la deflexión lateral entre dos pisos adyacentes. Deflexión lateral es el movimiento previsto de una estructura bajo cargas laterales, pueden tener efectos adversos sobre elementos estructurales, elementos no estructurales, y las estructuras adyacentes.

Cuando las fuerzas laterales se colocan sobre la estructura, la estructura responde y se mueve debido a esas fuerzas. En consecuencia, existe una relación entre el sistema lateral, fuerza de resistencia y su movimiento bajo cargas laterales.

Sin la debida consideración del movimiento esperado de la estructura, el sistema de resistencia de fuerza lateral podría experimentar un fallo prematuro y la correspondiente pérdida de fuerza pueden causar inestabilidad de la estructura y potencialmente resultar en el colapso. Elementos estructurales y conexiones que no forman parte del sistema de resistencia de la fuerza lateral, deben ser detallados para soportar las desviaciones y derivas máximos esperados. Que significa que experimentan las deflexiones y rotaciones similares a los del sistema de resistencia de fuerza lateral.

Según: (Barbat., 2008, pág. 49); Una característica de la respuesta estructural muy importante en el diseño es el desplazamiento relativo entre dos pisos sucesivos, llamado también desviación de piso el valor modal de dicha característica viene dado por:

$$\Delta_{ri} = X_{ri} - X_{(r-1)i}$$

Donde:

$\Delta_{ri}$  = Desplazamiento horizontal relativo entre los dos niveles que lo limitan

$X_{ri}$  = Coordenada relativa del piso "ri".

$X_{(r-1)i}$  = Coordenada relativa del piso inferior a "ri". Siendo su valor máximo ( $\Delta_{ri}$ ) máx.



### 2.2.8. VIBRACIONES

Como menciona en su investigación: (RAMOS EMILIANI & RINCÓN RUBIANO, 2012); Es un movimiento trepidatorio de vaivén desde una posición de equilibrio hasta otra de posición máxima, referido también como un movimiento repetitivo que permite a un cuerpo recuperar su posición original.

Los elementos que aportan inercia al sistema, guardan y alcanzan una energía cinética, la rigidez de los elementos acumula y libera energía potencial y el amortiguamiento de los elementos puede ser expresado como una pérdida de energía en el sistema, cada uno de estos componentes tiene una respuesta a la excitación muy diferente, el que puede aplicarse como fuerza o como momento, de manera que la respuesta del elemento se describe en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento, la inercia de los elementos se relacionan de manera directa entre la fuerza o momento, aplicado con la respuesta de aceleración, los elementos que aportan rigidez están caracterizados por la relación entre una fuerza aplicada y el correspondiente desplazamiento, y la disipación de energía en los elementos se caracteriza por la relación entre una fuerza aplicada o un momento y la respuesta de velocidad.

Los movimientos tanto cercanos como lejanos, son capaces de generar aceleraciones en una estructura. Estos movimientos pueden ser: sismos distantes o próximos, tráfico vehicular, cambios en la presión atmosférica, tránsito de personas, voladuras de canteras, hincado de pilotes, entre otras actividades del hombre o naturales. Estas vibraciones son, generalmente, procesos totalmente aleatorios, ya que todas vienen de fuentes muy diferentes tanto en origen como en intensidad. Un registro toma como datos la duración significativa de la señal y la define como el tiempo en segundos.

#### 2.2.8.1. TIPOS DE VIBRACIÓN

(Saavedra, 2007); Las vibraciones en estructuras pueden originarse por muchas fuentes externas, incluyendo construcciones industriales y actividades de transporte. La vibración puede ser continua (con amplitudes que varían o que se mantienen constantes en el tiempo), impulsiva (como cuando ocurren choques)



o intermitentes (con magnitudes que pueden ser ambas constantes y variantes con el tiempo). Ejemplos típicos de vibración y su fuente.

Las vibraciones en estructuras pueden ocurrir también desde fuentes internas (dentro de la estructura) como en una pista donde los movimientos de transito se desarrollan como parte de la estructura del sistema o fuentes de vibración mecánica en edificios.

Las vibraciones y la intensidad de sus efectos asociados son usualmente clasificados entre continuos, intermitentes e impulsivos como sigue:

Continuos: las vibraciones continúan ininterrumpidas por un periodo definido usualmente en tiempos establecidos en el día o en la noche.

Impulsivos: la vibración alcanza de manera brusca una magnitud pico seguida de un decaimiento amortiguado que puede o no se involucrado con severos ciclos de vibración dependiendo de la frecuencia y el amortiguamiento. Puede considerarse también como la aplicación repentina de varios ciclos de carga con la misma amplitud, con la característica de que el tiempo que duran es menor de 2 segundos.

Intermitentes: puede ser definida como la interrupción de un periodo continuo o la repetición de periodo de vibración impulsivo o vibración continua, que varían de manera significativa la amplitud podría ser originada por fuentes de impulso o fuentes repetitivas que operan de manera intermitente pero que podrían causar una vibración continua si actúan de manera continua por ejemplo: maquinaria intermitente, carriles de un tren, el tráfico, etc.

Vibración Continua	Vibración Impulsiva	Vibración Intermitente
Maquinaria, tráfico estacionado, actividades continuas de construcción como máquinas de sondeo en túneles.	No ocurren con frecuencia por ejemplo caída ocasional de maquinaria pesada carga y descarga ocasional.	Las actividades de construcción intermitentes como: el paso de vehículos pesados, impacto.

### 2.2.8.1.1. PARÁMETROS DE LA VIBRACIÓN

(Advanced Mechanical Engineering Solutions, 2015); La amplitud de los parámetros de vibración varía dependiendo de la frecuencia de medición, conociendo cualquiera de los parámetros de amplitud de vibración (aceleración, velocidad y desplazamiento), se pueden conocer el resto de parámetros.

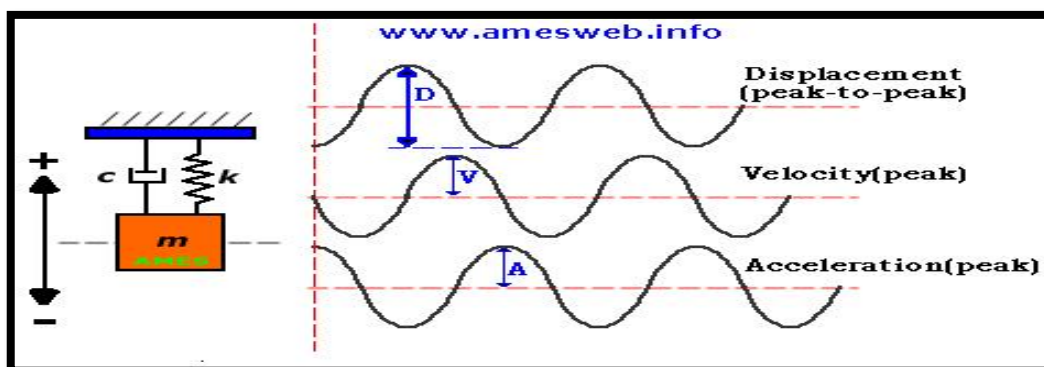
Las vibraciones nos dicen cómo las fuerzas actúan sobre la máquina. Necesitamos un sensor para convertir la vibración en señal eléctrica, que podamos procesar y almacenar. Si podemos medir la aceleración, se podrá integrar y ver los datos en unidades de velocidad.

Si se considera el movimiento armónico de una onda periódica, la cual se repite cada  $360^\circ$  o puede ser expresada de manera matemática cada  $2\pi$  radianes. Revisando el grafico correspondiente al desplazamiento, se puede definir un desplazamiento instantáneo en un tiempo específico usando la fórmula del movimiento sinusoidal.

Usando estas fórmulas del movimiento sinusoidal, asignando la frecuencia fundamental característica de un movimiento, se puede obtener los máximos valores de desplazamiento, velocidad y aceleración.

Es importante mencionar que los valores de aceleración muestran la amplitud del movimiento de los motores usando como unidad - G fuerza, relacionando los valores de masa y la amplitud de la aceleración, basándose en el principio de Isaac newton  $F = m \times a$ .

FIGURA N° 46: Movimiento sinusoidal



Fuente: <http://www.amesweb.info/SinusMotion/SinusMotion.aspx>.





**Frecuencia de vibración: ( $f=1/\text{tiempo}$ );** es el tiempo necesario para completar un ciclo vibratorio, si se requiere de un segundo para completar un ciclo, entonces durante un minuto se repetirá 60 veces o sea 60 ciclos por minuto.

**Desplazamiento:** el desplazamiento relaciona las fuerzas elásticas o rigidez que ocasionan fallas de flexión, y enfatiza en intervalos de frecuencia baja (<35 Hz.) la distancia total que describe la parte que vibra desde un extremo a otro se le denomina “desplazamiento pico a pico”, se expresa ordinariamente en el sistema internacional (SI), como micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), los sensores para su medición son comunes en máquinas de alta velocidad:

$$X = \frac{D \cdot \sin(2\pi ft)}{2}$$

Donde:

D = Desplazamiento pico a pico.

T = Tiempo en segundos.

f = Frecuencia en Hertz.

**Velocidad:** Se encuentra desfasada  $90^\circ$  del desplazamiento, nos relaciona la poca fuerza, donde la principal causa de falla será por fatiga y adicionalmente proporciona un énfasis igual en todas las frecuencias de vibración.

$$v = \pi f D * \cos(2\pi ft)$$

**Aceleración:** Se expresa normalmente en “g” pico, siendo una g la aceleración que produce la fuerza de gravedad en la superficie de la tierra ( $1g= 9.806 \text{ ms}^2$ ).

$$a = -2\pi f^2 D * \sin(2\pi ft)$$

#### 2.2.8.1.2. MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE TURBINA FRANCIS TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO

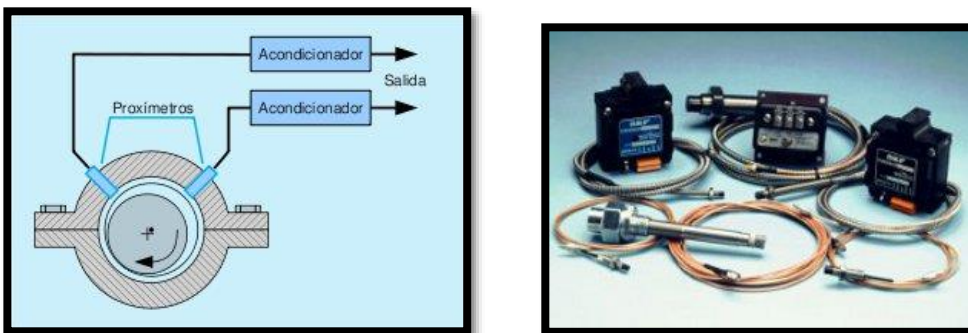
(HARBIN ELECTRICAL MACHINERY COMPANY LIMITED., 2015)

### Transductores de desplazamiento

- Marca : Beijing Huake Tongan Monitoring Technology.
- Modelo : Hs- 079 horizontal y vertical
- Rango de operación : 5 Hz - 10 kHz.
- Temperatura de operación : + 200 C°

Los sensores de desplazamiento también son conocidos como sondas de proximidad miden el movimiento relativo entre la punta del sensor y el eje de la turbina.

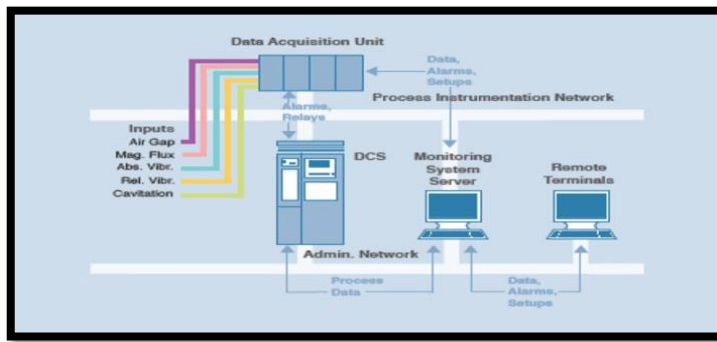
**FIGURA N° 47: Sensores de desplazamiento y transductores de corriente.**



Fuente:[http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores\\_desplazamiento.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores_desplazamiento.html).

Se usan sistemas de monitoreo para determinar la distancia relativa entre el eje y la turbina. Por lo general, se toma una lectura de la distancia, cuando el eje está en reposo, y cuando la turbina está en régimen nominal de funcionamiento, de esta información se detectan fricciones en el eje, y se produce un diagrama de órbitas.

- Mide el desplazamiento relativo entre el eje y la turbina.
- Son fiables, por estar montados en el interior de la turbina.
- Unidades: Las unidades del desplazamiento están en mm. o micrometros um.
- Los registros son procesados por programas computacionales que convierten la señal en tiempo real en datos de desplazamiento, velocidad y aceleración, mostrados en un sistema de monitoreo TN8000 UNIT MONITORING SYSTEM.

**FIGURA N° 48: Unidad de adquisición de datos.**

Fuente: <http://www.bkvibro.com/en/condition-monitoring/hydroelectric-power-plants.html>.

### 2.2.8.1.3. REGISTROS DE VIBRACIONES

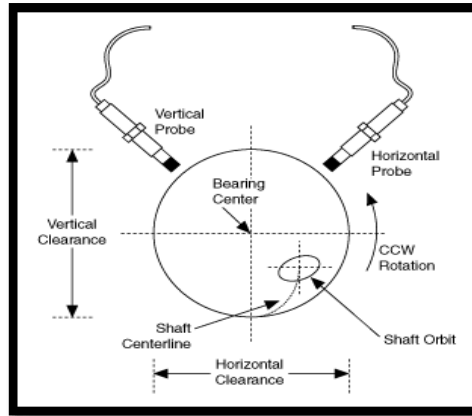
(RAMOS EMILIANI & RINCÓN RUBIANO, 2012)

- Un registro toma como datos la duración significativa de la señal y la define en función del tiempo en segundos
- La amplitud máxima la definimos en magnitudes como desplazamiento, velocidad o aceleración máxima que se vea registrada en la señal.
- La frecuencia dominante de una señal de vibraciones puede definirse como el número de ciclos por segundo asociado con los pulsos de mayor amplitud de la señal, sin importar si esta señal es de aceleraciones, velocidades o desplazamientos.

### 2.2.8.1.4. GRÁFICOS GENERADOS POR LA SEÑAL

(HARBIN ELECTRICAL MACHINERY COMPANY LIMITED., 2015), Los gráficos en base al tiempo permiten monitorear la turbo máquina, los cojinetes ante el caudal que circula. Algunas fallas mecánicas tienen formas características. Se puede comparar las imágenes adquiridas de una cierta señal con cualquier características conocidas para detectar fallas y diagnosticar problemas de la máquina. Las sondas de proximidad están ortogonalmente posicionadas que lleva a adquirir las señales de la órbita, base de tiempo, y los gráficos de la línea central del eje.

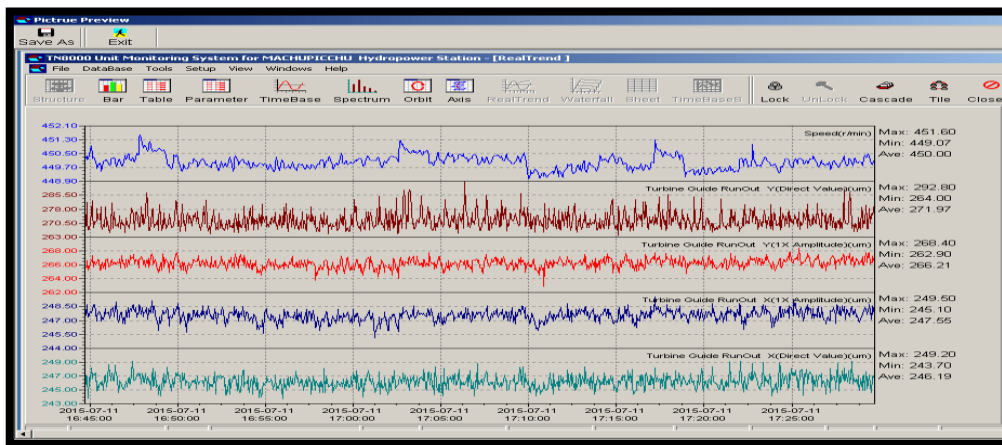
**FIGURA N° 49: Ubicación de sensores 90°**



Fuente: <http://www.precisionmicrodrives.com/tech-blog/2013/02/22/using-normalised-vibration-amplitudes>.

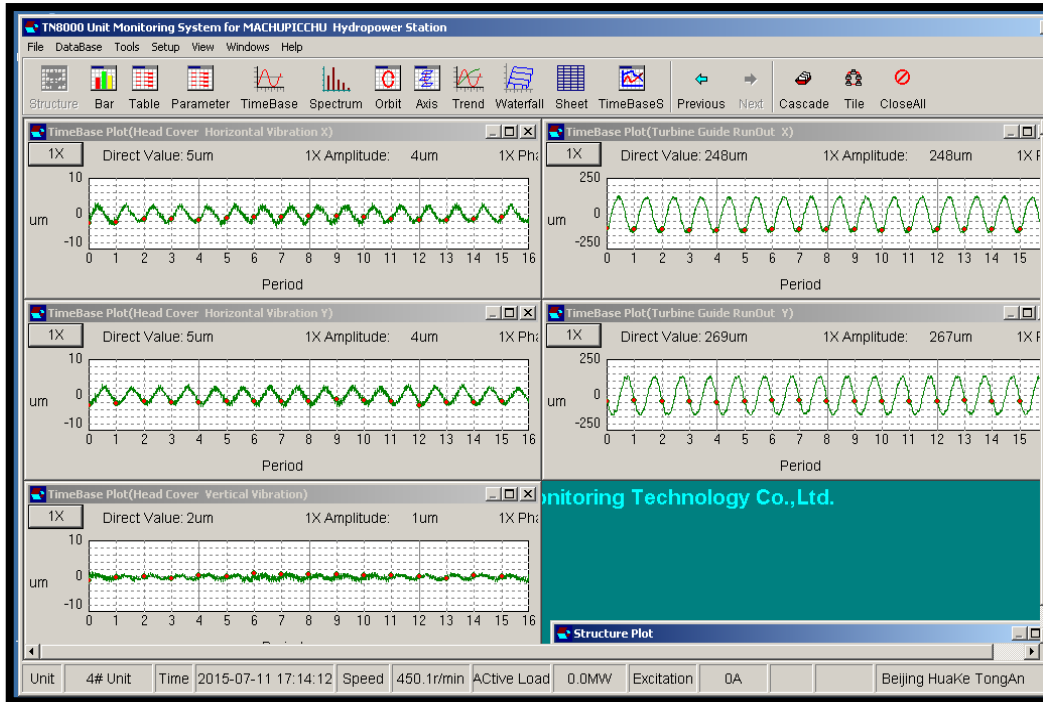
Un gráfico en base al tiempo muestra la amplitud de vibración de una o más revoluciones de un eje en función del tiempo. Permite obtener una imagen más clara de lo que adquiere un transductor individual en términos de amplitud de vibración. El siguiente grafico muestra una típica trama base de tiempo sin filtrar para el eje X y el eje Y.

**FIGURA N° 50: Monitoreo en tiempo real de la frecuencia de rotación, desplazamiento en ambas direcciones de la Turbina Hidráulica Francis.**



Fuente: Monitoreo de vibraciones Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

**FIGURA N° 51: Grafico en base al tiempo- desplazamiento de la Turbina.**



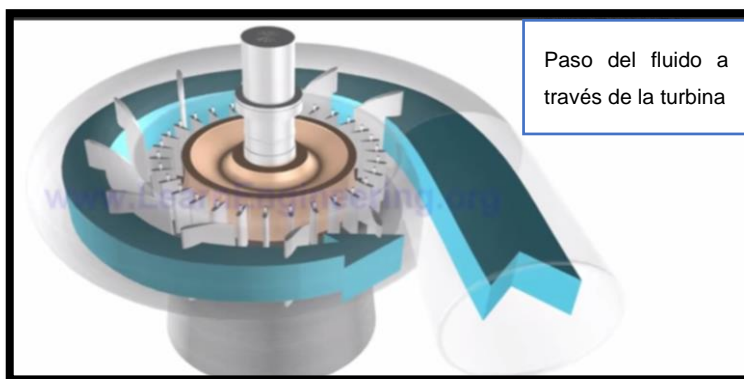
Fuente: Monitoreo de vibraciones Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

### 2.2.8.2. TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS

Según: (Dominguez, 1987, págs. 248-249); La turbina hidráulica Francis es una turbina de reacción y es de admisión total, es decir el agua entra en el rotor por toda su periferia. Los elementos fundamentales de esta turbina son un distribuidor formado por una corona de alabes que sirven para guiar el agua y regular el caudal con un rotor acoplado en el eje de la turbina.

El distribuidor es de mayor diámetro que el rotor y rodea al mismo, de modo que el movimiento del agua es centrípeto respecto al eje.

FIGURA N° 52: Turbina Francis.



**FUENTE:** (LEARN ENGINEERING, 2013). **TURBMACHINERY**. [Figura]. Recuperado de: <http://www.learnengineering.org/>.

### 2.2.8.2.1. ELEMENTOS PRINCIPALES DE UNA TURBINA HIDRÁULICA

Según: (Dominguez, 1987, págs. 248-249); Descripción de la estructura de la turbina – Turbina Francis con eje vertical.

**ESTATOR:** está constituido por la propia carcasa de la turbina. Al igual que el rotor, el estator está formado por una serie de coronas de alabes, dispuestos con un ángulo tal que canalizan el fluido hacia el rotor en la dirección más efectiva para la transformación de la energía cinética en mecánica.

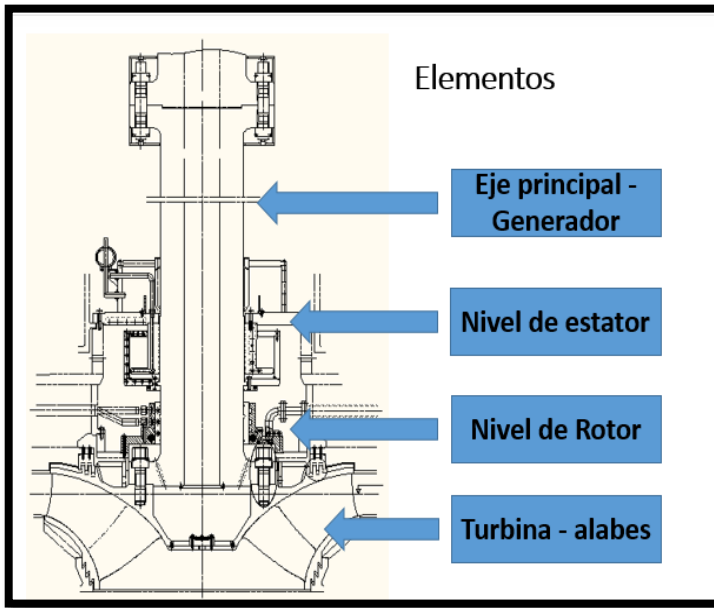
**ROTOR:** es un elemento móvil del sistema. La energía cinética desprendida en la turbina se convierte en energía mecánica en este elemento. El rotor está compuesto por una serie de coronas con alabes, se encuentran unidos solidariamente al eje de la turbina moviéndose con él, empieza y guía el movimiento del eje.

**TOBERAS:** el fluido es suministrado a la turbina a través de estos elementos. Su labor es conseguir una correcta distribución del fluido una vez que ingresa. Cambia la presión de trabajo por energía cinética.

Descripción de la estructura de la turbina  
--Eje vertical turbina Francis

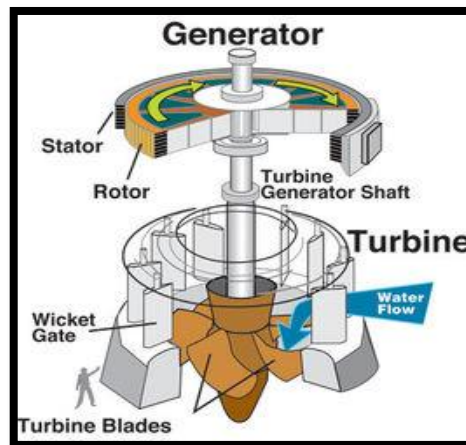


FIGURA N° 53: Elementos de una Turbina Francis.



Fuente: MACHUPICCHU hydropower station, training Julio 2015.

FIGURA N° 54: Partes de la turbina Francis.



FUENTE: (U.S. Army Corps of Engineers (U.S. Army Corps of Engineers) [Public domain], 2012). WaterTurbine.[Figura]. Recuperado: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Water\\_turbine.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Water_turbine.jpg).

#### 2.2.8.2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBO MÁQUINA

Según: (Ortiz, 2006, pág. 273); La maquinaria hidráulica basa su funcionamiento en el principio de la cantidad de movimiento, es decir cuando un fluido pasa a través de él, extraen continuamente energía del fluido y lo convierten en par aplicado a un eje que gira. Por tanto usa la energía del fluido para generar y transmitir potencia de manera continua.



En la teoría de las turbo máquinas se desprecia la fricción y se supone que el fluido escurre de manera perfecta a través de la máquina, como si existiera un número infinito de alabes imaginarios.

(ECURED, 2015); La velocidad de la turbina hidráulica es regulada de manera continua, durante este proceso se mantiene constante la magnitud del número de revoluciones por minuto a la que ha de girar el rodete de la turbina, lo que se logra, al regular el caudal de agua en cada instante, es el eje que transmite el giro uniforme con un número de revoluciones dentro de un margen que permitan el funcionamiento normal de la turbina.

### **2.2.8.3. PUENTE GRÚA**

#### **DESCRIPCIÓN**

Según: (Universidad Pública de Navarra, 2003); Los puentes grúa son máquinas destinadas al transporte de materiales y cargas en desplazamiento verticales y horizontales en el interior y exterior de industrias. Constan de una o dos vigas móviles sobre carriles, apoyadas en columnas a lo largo de dos paredes opuestas.

El puente grúa consta de una o dos vigas transversales a la luz de la estructura (vigas principales, responsables de izar la carga) y dos pares de vigas laterales (testeros), en dirección longitudinal a la estructura y que sirven de sujeción a las vigas principales y en donde van las ruedas. Para luces grandes y cargas elevadas se sustituyen las vigas de alma llena, por las más ligeras de celosía o en cajón rectangular.

#### **2.2.8.3.1. COMPONENTES DE UN PUENTE GRÚA**

Según (transrem, 2013):

- a).- El puente. Se desplaza a lo largo de la estructura.
- b).- el carro. Se desplaza sobre el puente y recorre transversalmente el largo de la estructura.
- c).- el gancho. Va puesto al carro mediante el cable principal, realizando los movimientos de subida y bajada de las cargas.

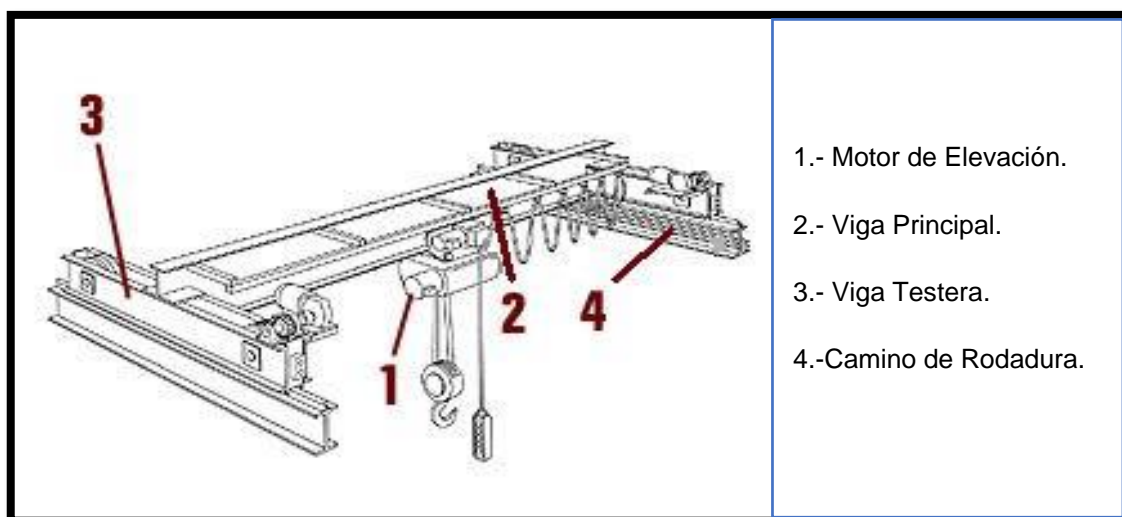


### 2.2.8.3.2. MOVIMIENTOS DEL PUENTE GRÚA

(Universidad Pública de Navarra, 2003); Los tres movimientos que realiza un puente grúa son:

- 1.- Traslación del puente. En dirección longitudinal a la nave. Se realiza mediante un grupo motor – reductor único, que arrastra los rodillos motores.
- 2.- Orientación del carro. Traslado de carro a lo largo del puente.
- 3.- Elevación – descenso. La carga es subida o bajada por efecto del motor que sujeta el gancho con la ayuda de un cable principal.

FIGURA N° 55: Componentes del puente grúa.



FUENTE: (UNIVERSIDAD DE SALAMANCA, 2012). Puente grúa. [Figura]. Recuperado de: <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20I/puente%20grua.htm>.

### 2.2.8.3.3. FUNCIONAMIENTO: MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

#### Motor asíncrono de rotor bobinado:

(Universidad Pública de Navarra, 2003); Se denomina motor de corriente alterna a aquellos motores eléctricos que funcionan con un tipo de alimentación eléctrica. Un motor es una máquina motriz, esto es, un aparato que convierte una forma determinada de energía en energía mecánica de rotación o par. Un motor eléctrico convierte la energía eléctrica en fuerzas de giro.



Entonces, al poner en marcha el motor, circula corriente eléctrica (a través de un sistema llamado conductor), lo que genera una fuerza armónica que obedece la frecuencia natural de funcionamiento Hz. que tiende a poner en movimiento dicho motor.

#### **2.2.8.3.4. LÍNEAS DE INFLUENCIA**

(HIBBELER, 2006, págs. 354-367); Las líneas de influencia representan el efecto de una carga móvil sólo en un punto especificado sobre un miembro. Se puede observar la variación de la reacción, de la fuerza cortante, del momento flexionante o de la deflexión en un punto específico de un miembro cuando una fuerza concentrada se mueve sobre el miembro, identificándose dónde debe colocarse una carga viva sobre la estructura para que genere la máxima influencia en el punto especificado.

Las líneas de influencia juegan una parte importante en el diseño de puentes, traveses de carriles de grúas industriales, bandas transportadoras y otras estructuras donde las cargas se mueven a lo largo de su claro.

Se utilizan dos procedimientos para obtener las líneas de influencia. En ambos se usará una carga móvil con una magnitud unitaria adimensional.

Valores tabulados. Colocar la carga unitaria en varias posiciones  $x$  a lo largo del miembro y en cada posición se utiliza la estática para determinar el valor de la función (reacción, fuerza cortante o momento) en el punto especificado.

Ecuaciones de las líneas de influencia. Colocar la carga unitaria en una posición  $x$  variable sobre el miembro y luego calcular el valor de reacciones,  $R$ , fuerzas cortantes,  $V$ , o momentos flectores  $M$ , en el punto como función de  $x$ .

(Departamento de Ingeniería Civil- Universidad de Chile, 2012); Para los efectos del diseño de una estructura interesa conocer el valor máximo de los “efectos” que producen las cargas externas en ella. Siempre hay una posición de las “carga vivas” para la cual se produce el valor extremo de un “efecto”. Para determinar esta posición con un método analítico se usa la línea o diagrama de influencia.

**Suposiciones:**



- Se supone un movimiento estático: sin fuerzas de inercia.
- Un material elástico lineal con pequeñas deformaciones.
- Una sola fuerza móvil será reemplazada por una de módulo unidad, con dirección y sentido constante, que se mueve paralelamente a sí misma.

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Según (SAMPIERI, 1999, pág. 198); Es una investigación de tipo cuantitativa, pues permitió evaluar la realidad en función de parámetros que son medibles y que pueden ser reproducidos con las mismas condiciones en cualquier momento. Como resultado se maneja una serie de datos numéricos concernientes a las variables que fueron estudiadas; (tal como; el caso de los parámetros dinámicos y los parámetros globales de respuesta estructural), durante el desarrollo del estudio, la obtención de resultados se limitó a responder las preguntas en relación a las hipótesis planteadas, se siguió un proceso probatorio analizando la realidad objetiva.

Además, se identifica que este trabajo reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada, en razón, que se usaron conocimientos de la ciencia en concordancia con la Ingeniería Estructural a fin de aplicarlas en el desarrollo de la investigación.

#### **3.1.2. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.1.2.1. DESCRIPTIVO**

La investigación alcanzó un nivel descriptivo, en razón de que se expusieron una serie de problemas, planteados sobre la base de una hipótesis con el objetivo de describir fenómenos, situaciones, contextos y eventos específicos. Para este estudio se evaluó, el comportamiento dinámico de una estructura ante las vibraciones generadas de diversa índole, con el propósito de describir este fenómeno: se han especificado las propiedades, características y rasgos importantes, que hicieron posible entender su naturaleza y explicar las causas y efectos de este fenómeno.

Por el nivel de investigación se ha dividido el estudio en cuatro etapas: identificar el fenómeno y los sujetos involucrados; definir las variables a medir; recolectar



datos; concluir. Etapas que fueron importantes para mostrar con precisión las dimensiones del fenómeno en estudio.

De acuerdo a la amplitud de la investigación, se ha enfocado la atención a las variables estudiadas, para lo cual ha sido necesario desarrollar el trabajo con precisión y carácter observador.

El nivel descriptivo de la investigación nos ha permitido formar una relación con otros estudios más rigurosos, de esta manera constituye la base para investigaciones correlacionales.

### **3.1.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1.3.1. MÉTODO HIPOTÉTICO - DEDUCTIVO**

El método usado para la presente investigación es el hipotético deductivo, a razón de que se demostró una hipótesis, por medio de la deducción de valores obtenidos, (en cuanto a la magnitud de los parámetros dinámicos y parámetros globales de respuesta estructural). Además, se han realizado los siguientes pasos: se observó el fenómeno a investigar, se creó una hipótesis para explicar el fenómeno en estudio, se dedujeron las consecuencias, y se verificaron los resultados comparando los enunciados con las experiencias. Durante el desarrollo se ha seguido un proceso probatorio en el que se analizó la realidad objetiva con el fin de tener una respuesta clara con respecto a la hipótesis.

Por otro lado, se justifica el uso del método hipotético deductivo, porque las hipótesis planteadas surgen a partir de principios ya descubiertos como es: la segunda ley de Newton, la que se aplica de manera particular; se mantuvieron inferencias hipotético – deductivas para obtener conclusiones en relación con las hipótesis planteadas y que además pueden ser comprobadas experimentalmente.

### **3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.2.1.1. DISEÑO METODOLÓGICO NO EXPERIMENTAL**

El diseño metodológico que le corresponde a la investigación es no experimental. Porque durante el proceso de recolección de datos no se manipularon intencionalmente las variables, y se adecuó más al estudio de los fenómenos tal



cual ocurrieron. Es así que enfocamos el estudio a la observación de fenómenos que involucran variables independientes; que ocurren bajo condiciones naturales.

### 3.2.1.2. TIPO TRANSVERSAL – DESCRIPTIVO

Es de tipo transversal. Pues se considera que en el desarrollo de la investigación se evaluó un fenómeno en una circunstancia temporal y geográfica determinada, los datos fueron recolectados en un tiempo único, por lo tanto los fenómenos en estudio ya habían ocurrido.

Además, es un diseño de tipo transversal descriptivo, pues su propósito es el de describir las variables independientes del fenómeno estudiado, para entender el contexto, sin importar por cuánto tiempo se mantendrá o desde cuando ocurre. De manera que se logra identificar el nivel que alcanza una variable con respecto a una población, por lo cual el estudio presentará resultados sobre la magnitud del fenómeno estudiado.

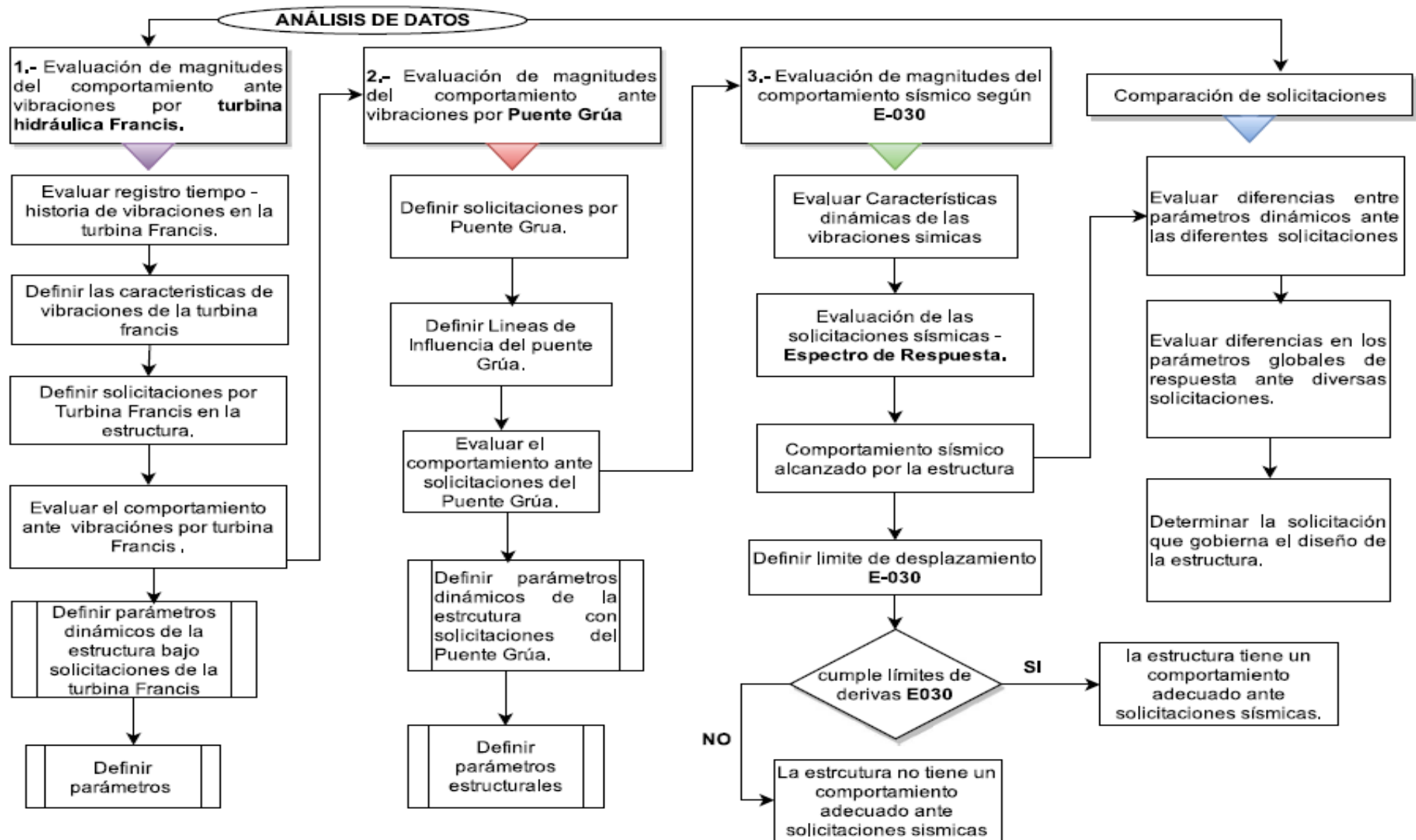
Por lo antes expuesto en el estudio se evaluará la incidencia que alcanzaron las vibraciones por turbina hidráulica, equipo de puente grúa y vibraciones sísmicas, en la estructura de la Casa De Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II fase.

Tabla N° 5: Metodología de la investigación.

<b>METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.</b>	
<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>CUANTITATIVA</b>
	Permitió evaluar la realidad en función de parámetros que son medibles y que pueden ser reproducidos con las mismas condiciones en cualquier momento. Como resultado se maneja una serie de datos numéricos concernientes a las variables que fueron estudiadas; (tal como; el caso de los parámetros dinámicos y los parámetros globales de respuesta estructural), durante el desarrollo del estudio la obtención de resultados se limitó a responder las preguntas en relación a las hipótesis planteadas, se siguió un proceso probatorio analizando la realidad objetiva.
<b>NIVEL DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>DESCRIPTIVO</b>
	Con el propósito de describir el fenómeno: se especificaron las propiedades, características y rasgos importantes, lo que hizo posible interpretarlos, entender su naturaleza y explicar sus causas y efectos. El método que se usó implicó cuatro etapas: identificar el fenómeno y los sujetos involucrados; definir las variables a medir; recolectar datos para medir las variables; concluir. Etapas que fueron importantes para mostrar con precisión las dimensiones del fenómeno en estudio. El nivel descriptivo de la investigación nos permite formar una relación con otros estudios más rigurosos, pues es la base para investigaciones correlacionales. Por la amplitud de la investigación, se centró la atención a las variables estudiadas. Como investigadores se tuvo que adoptar rasgos como la precisión y un carácter observador. Con la meta de describir fenómenos, situaciones, contextos y eventos.
<b>METODO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>HIPOTETICO - DEDUCTIVO</b>
	Se pretende demostrar una hipótesis, por medio de la deducción de valores obtenidos, así mismo dependen de la magnitud de los parámetros dinámicos y parámetros globales de respuesta estructural. Además sigue un proceso probatorio en el que se analiza la realidad objetiva con el fin de tener una respuesta clara. Por otro lado se justifica el uso del método hipotético deductivo, porque las hipótesis planteadas surgen a partir de principios ya descubiertos, que podran demostrarse experimentalmente.
<b>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>NO EXPERIMENTAL</b>
	Las variables independientes ya han sucedido, no se manipulan. durante el proceso de recolección de datos no se tuvo control sobre las variables independientes, y se adecuó más al estudio de los fenómenos tal cual ocurrieron.
<b>TIPO DE DISEÑO</b>	<b>TRANSVERSAL - DESCRIPTIVO</b>
	Tiene el propósito de describir las variables independientes. Con el fin de indagar, cual es el nivel que alcanza una variable con respecto a una población, en el estudio se evaluó que nivel de incidencia alcanzaron las vibraciones de diversa índole, en una estructura específica, de manera que hizo posible su descripción.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.1.3. DISEÑO DE INGENIERÍA







### 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.3.1. POBLACIÓN

##### 3.3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN

La Casa De Maquinas De La Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, constituye la población de la presente investigación, a continuación se procede a describirla.

Es una estructura construida en caverna, con un área en planta de 455 m<sup>2</sup> con dimensiones 35 x 14 x 33 m, la estructura contiene 4 niveles de altura promedio de 4.5 m, y altura total de la edificación de 22.70 m. con techo tipo bóveda revestida con un arco de concreto de 10.20 m de radio.

Es una estructura de tipo mixto es decir que los elementos que la componen son muros de apoyo, columnas y vigas. El material usado para su construcción fue el concreto armado:

En su interior alberga la nueva turbina hidráulica Francis de eje Vertical (con capacidad para generar 101.35 MW), Generador (120 MVA), un Puente grúa (capacidad de izaje de 180 Tn) y entre otros equipos auxiliares requeridos, ha sido recientemente construida bajo la normativa sismo resistente del 2009. Actualmente funciona para alojar la maquinaria y demás equipos necesarios para la generación de energía eléctrica, mientras los primeros niveles funcionarían para el mantenimiento de los equipos, a lo largo de la vida útil, la estructura tendrá que soportar diversas cargas de servicio.

Las dimensiones de la caverna se han establecido en base a los todos los requerimientos de espacio y función de los equipos incluyendo la necesidad de alojar un puente grúa de 210 toneladas de capacidad.

La estructura de la casa de máquinas corresponde al nivel del piso de generador (cota 1692.65) y está dividida en dos partes.

La estructura de la parte superior de la cota mencionada consiste en marcos principales transversales de concreto, empotrados en la estructura baja (muros de espesor 1.00 m) a distancia de 5.0 m en 5 ejes (variable). En la dirección



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE".

longitudinal los marcos están unidos (fijados) con la viga carrilera del puente grúa.

El techo de la caverna es de tipo bóveda revestida con un arco de concreto de 10.20 m del radio. La casa de máquinas en la parte inferior (nivel del piso de generador) tiene 13.00 m de ancho 25.00 m de longitud.

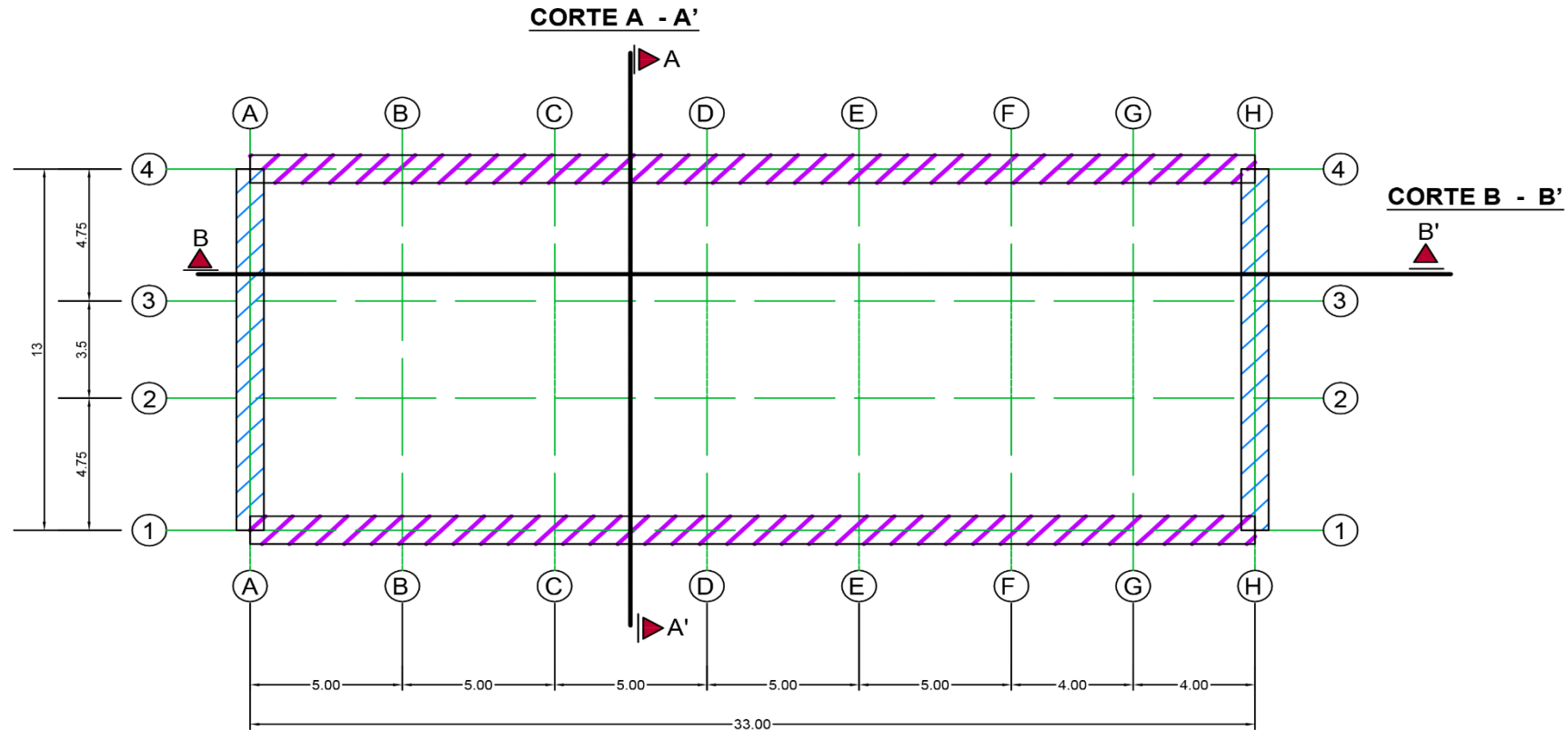
La casa de máquinas cuenta con 4 niveles representativos:

- a) Piso de la válvula esférica, en el nivel: 1679.80 msnm.
- b) Piso de la unidad turbina Francis, en el nivel: 1684.30 msnm.
- c) Piso del generador, en el nivel: 1688.50 msnm.
- d) Piso de puente grúa, en el nivel: 1699.65 msnm.

En el nivel del generador (1688.50) están alojados los siguientes equipos electromecánicos: Generador, celdas, ductos de barras, transformador de excitación, equipo de excitación, panel de control y protección de grupo.

En el nivel de la turbina (1684.30 msnm) están ubicados los equipos mecánicos auxiliares.

FIGURA N° 56: Planta típica Casa de Máquinas.



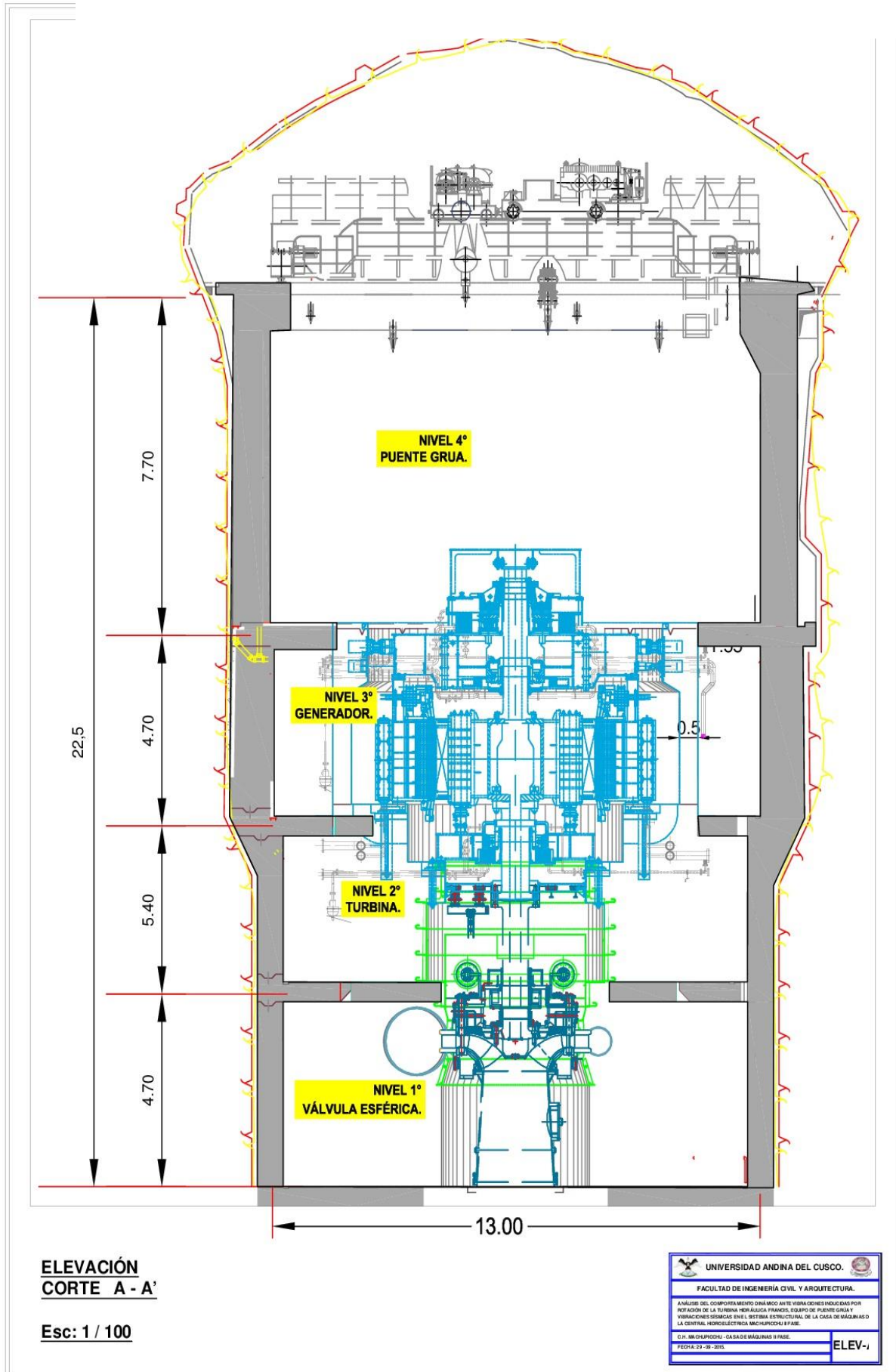
**PLANTA TÍPICA NIVEL 3° Y 4°.  
CASA DE MAQUINAS**

**Esc: 1/75**

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO.	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA.	
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE.	
C.H. MACHUPICCHU - CASA DE MÁQUINAS II FASE.	
FECHA: 29 - 09 - 2019.	<b>PL</b>
Elaboración Propia.	

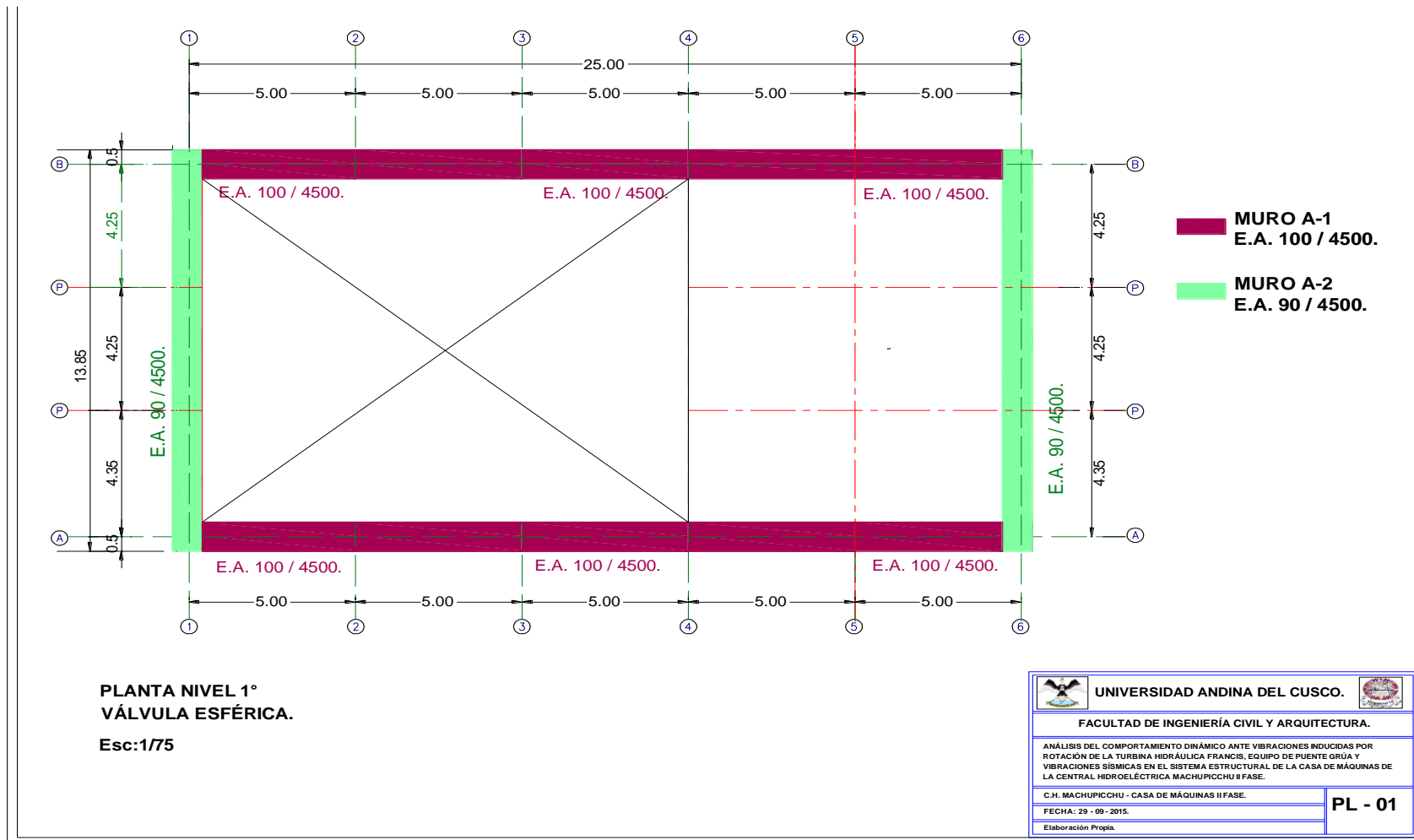
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 57: Elevación corte A-A'



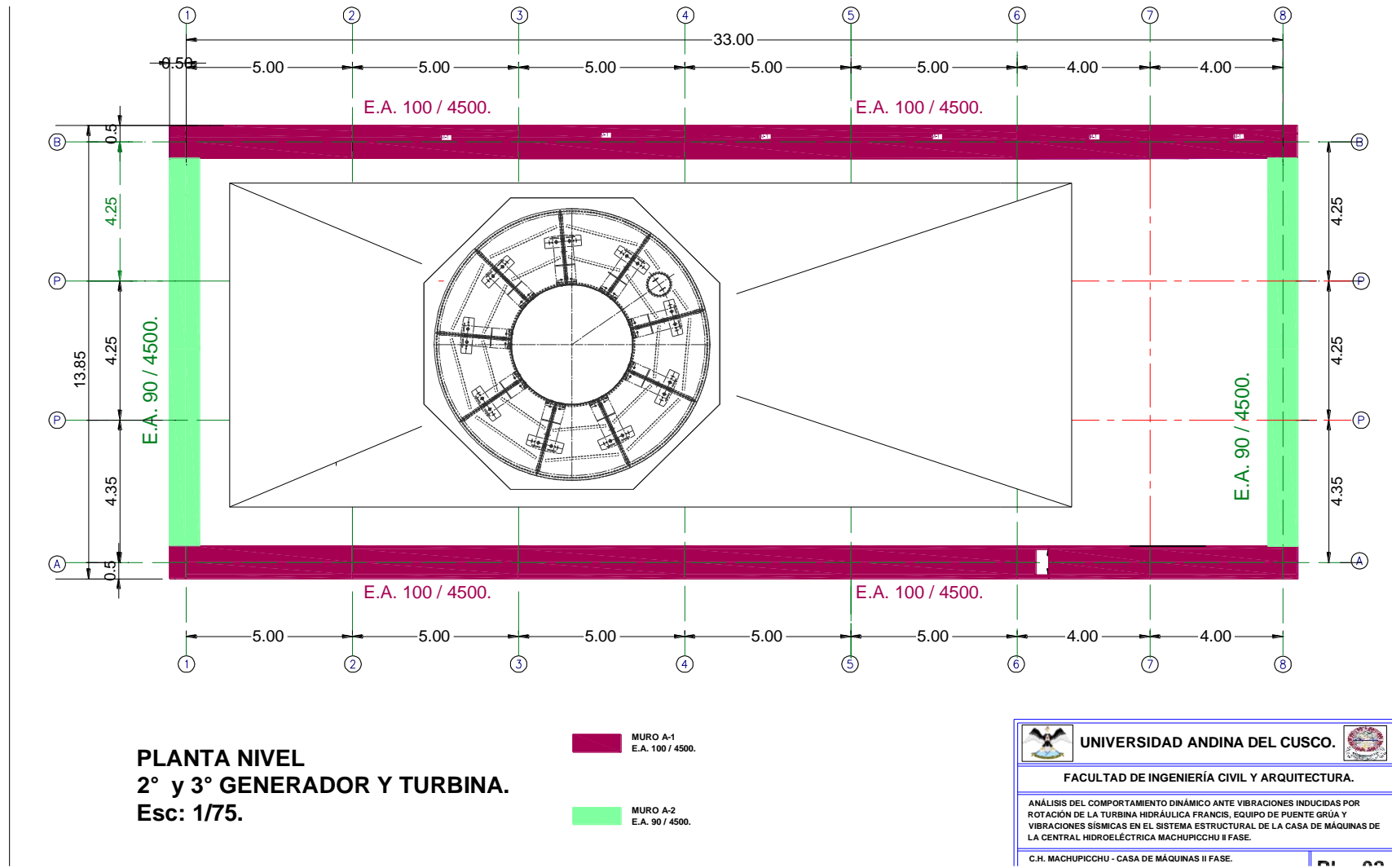
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 58: Planta Nivel 1°.



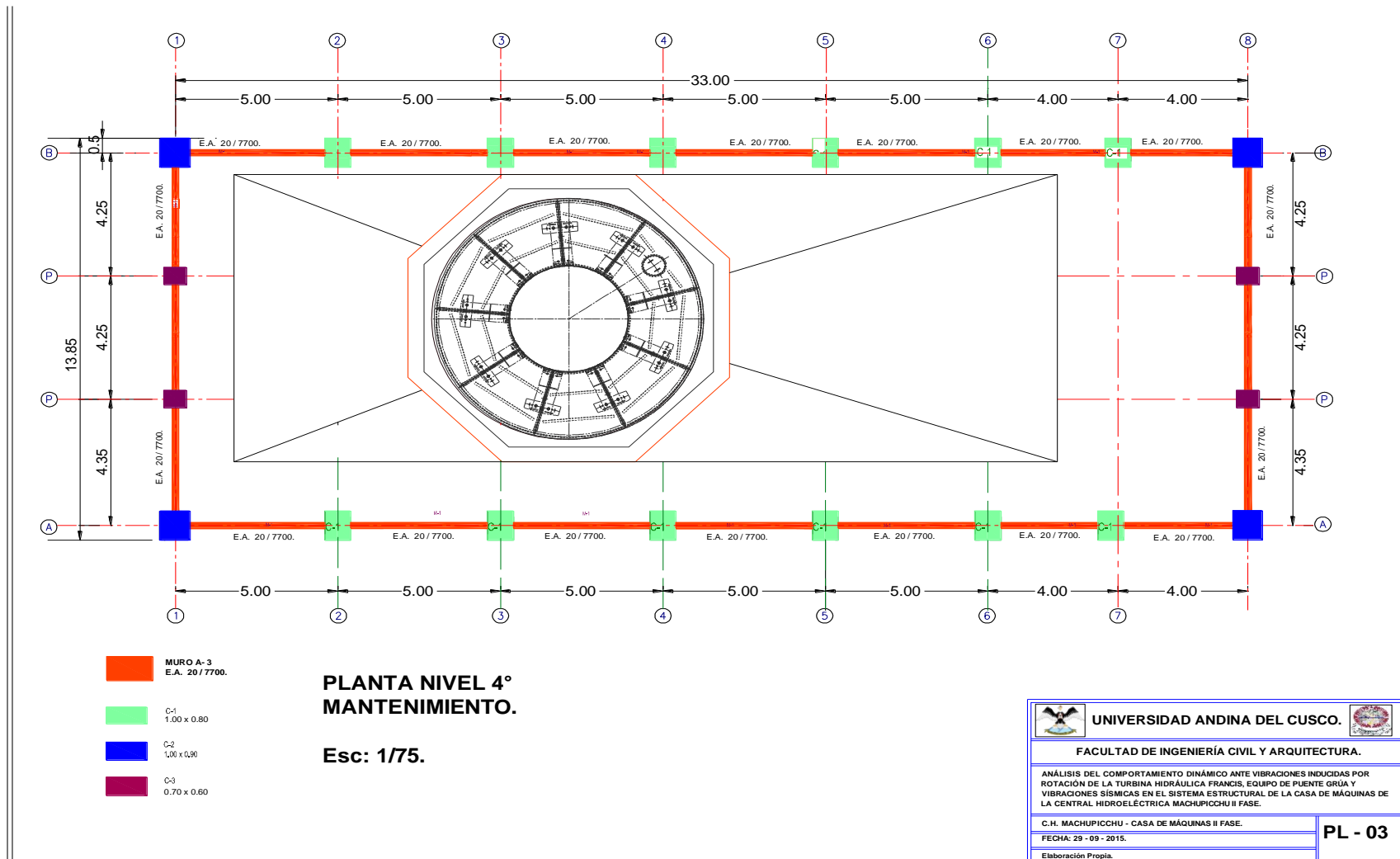
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 59: Planta Nivel 2° y 3°.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 60: Planta Nivel 4°



Fuente: Elaboración propia.



### **3.3.1.2. CUANTIFICACIÓN DE LA POBLACIÓN**

La población de la presente investigación está conformada por un conjunto finito referido a: todos los elementos estructurales, entre vigas, columnas, muros estructurales, losas, etc, Existentes en la estructura de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

### **3.3.2. MUESTRA**

#### **3.3.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA**

Para el presente estudio se considera una muestra censal, es decir que la muestra considera todo el universo de estudio, donde la muestra es igual a la población constituida por la estructura de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

Por lo tanto al ser objeto de estudio una población única y para este caso en particular la estructura de la Casa de Máquinas, entonces la muestra debe ser coincidente con el total de la población.

#### **3.3.2.2. CUANTIFICACIÓN DE LA MUESTRA**

Al considerar una muestra censal existe la igualdad de elementos con la población, entonces componen la muestra todos los elementos estructurales, columnas, muros estructurales, vigas, losas, etc., de la estructura de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

#### **3.3.2.3. MÉTODO DE MUESTREO**

El método de muestreo para la investigación es no probabilístico por conveniencia, considerando que este depende de la naturaleza de la población en estudio, y que existe una distribución uniforme de las características dentro de la misma. Al no tener selección alguna, la muestra con la que se trabajó está en función de los propósitos que se tienen para el desarrollo de la presente investigación, es necesario citar las razones por las que se escogió este método de muestreo:

Primero, el estudio quiere mostrar la existencia de un fenómeno determinado, como es el caso vibraciones de diversa índole en una determinada estructura.





ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE".

Segundo, los resultados que se obtuvieron, no se generalizaran a toda la población que está representada por la estructura de la casa de máquinas.

Por último, se consideró las limitantes que surgieron en el proceso de investigación como lo son: el presupuesto que se manejó para su elaboración, el tiempo y la mano de obra.

Es además, por sus características un tipo de muestreo consecutivo, pues se buscó incluir todos los sujetos accesibles que guardan relación alguna con los criterios de inclusión como parte de la muestra, los que fueron seleccionados hasta que se obtuvo el tamaño de muestra requerido, en consecuencia la muestra es una mejor representación de toda la población.

#### **3.3.2.4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE MUESTRA**

El criterio de evaluación de la muestra, se basa en considerar el diseño metodológico correspondiente a una investigación no experimental, por lo tanto en la muestra no existió manipulación intencional de variables, tampoco se realizó alguna asignación al azar. Se usaron las siguientes normativas:

- Norma técnica de edificaciones E020 – CARGAS.
- Norma técnica de edificaciones E060 – CONCRETO ARMADO.
- Norma técnica de edificaciones E 030- DISEÑO SISMO RESISTENTE.
- Manual del criterio de diseño para la Central Hidroeléctrica del Rio Whitman, Ketchikan Public Facilities.

#### **3.3.3. CRITERIOS DE INCLUSIÓN**

- Los elementos muestrales son modelados con la configuración y composición estructural en la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, según se indica en los planos "Como Construido".
- Las propiedades mecánicas del concreto armado fueron extraídas de los planos como construido con una resistencia a la compresión  $f'c = 275$  kg/cm<sup>2</sup>, el módulo de elasticidad del concreto calculado es  $E_c = 248746.85$  kg/cm<sup>2</sup>, considerando dicho material el ratio de amortiguamiento es de 5%.



- Se usaron los registros de vibración de la Turbina Hidráulica Francis correspondientes a un día de medición, realizado por los equipos de la empresa de generación eléctrica EGEMSA.S.A.
- Se usaran los datos de fabricación y diseño tanto del Puente Grúa como de la Turbina Hidráulica Francis.
- Para definir las características del suelo de fundación se ha tomado como referencia los informes realizados durante la etapa de construcción de la Casa de Máquinas.
- Con el objetivo de evaluar las fuerzas generadas por Turbina Francis y Puente Grúa, se han recolectado especificaciones de diseño y datos de fabricación, de los cuales solo se extrajeron aquellos que indican parámetros dinámicos o que indican la magnitud de las acciones, tal es el caso de la carga de izaje del puente grúa.
- Los parámetros dinámicos; consideran evaluar solo la dirección más crítica que muestre el sistema, después de haber realizado el cálculo del aporte de rigidez estructural.

### 3.4. INSTRUMENTOS

#### 3.4.1. INSTRUMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.4.2. FORMATOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS EXCEL:

##### 3.4.2.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Tabla 1: Formato para recolección de Propiedades mecánicas del concreto.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Propiedades Mecánicas.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

PROPIEDADES	SIMB	CONCRETO	UND.
Resistencia Compresión	(F'c)		
Coefficiente de Dilatación Térmica	(T)		
Peso Específico	( $\gamma$ )		
Módulo de Corte	(G)		
Módulo de Poisson	( $\nu$ )		
Módulo de Elasticidad	(E)		

Elaboración propia.



3.4.2.2. APOORTE DE RIGIDEZ ESTRUCTURAL

Tabla N°3: Formato para recolección del Aporte de rigidez Estructural.

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>							
		<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>							
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>									
Prueba :	Aporte de la rigidez Estructural.								
Autor :	Elaboración Propia,								
Lugar :									
Fecha :									
Observación :									
Nivel de Válvula Esférica. Piso N°1				Esfuerzo de Fluencia del Acero :		$f_y =$		ton / m <sup>2</sup>	
				Resistencia del Concreto		$f'c =$		ton / m <sup>2</sup>	
				Modulo de Elasticidad Concreto		$E_c =$		ton / m <sup>2</sup>	
Altura de piso.			4.9			(m.)			
PARÁMETRO				EJE X-X.			EJE Y-Y.		
Elemento	Espesor	Largo	Area	Inercia - I	Desplazamiento - $\Delta$	Rigidez - k	Inercia - I	Desplazamiento - $\Delta$	Rigidez - k
	( m ).	( m ).	( m <sup>2</sup> ).	( m <sup>4</sup> ).	( m ).	(ton/m).	( m <sup>4</sup> ).	( m ).	(ton/m).

Elaboración propia.

3.4.2.3. METRADO DE CARGAS

Tabla N° 6: Formato para recolección Metrado de cargas

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Características Dinámicas - Sistema Turbina Hidráulica Francis.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

4° Piso Nivel de Mantenimiento.							
	ancho	largo		altura			
Losa e = 20.	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
SC/uso =		m x	m x		x	ton/m2	- ton
Columna 90 X 1	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Columna 80 X 1	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Columna 60 X 1	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Viga Carrilera X.	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Viga Carrilera Y.	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Muro e=0.2.	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
						<b>Total</b>	<b>- ton</b>
3° Piso Nivel de Generador.							
Losa e = 20.	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
SC/uso =		m x	m x		x	ton/m2	- ton
Muro X	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Muro Y	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
						<b>Total</b>	<b>- ton</b>
2° Piso Nivel de Turbina.							
Losa e = 20.	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
SC/uso =		m x	m x		x	ton/m2	- ton
Muro X	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Muro Y	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
						<b>Total</b>	<b>- ton</b>
1° Piso Nivel de Válvula Esférica.							
Losa e = 20.	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
SC/uso =		m x	m x		x	ton/m2	- ton
Muro X	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
Muro Y	=	m x	m x	m x	m x	ton/m3	- ton
						<b>Total</b>	<b>- ton</b>
						<b>PT = P4 + P3 + P2 + P1</b>	<b>- ton</b>

Fuente: Elaboración propia.



3.4.2.4. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS

TABLA N° 7: Formato para recolección Componentes del movimiento de la turbina hidráulica Francis.

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>							
		<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>							
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>									
Prueba :		Cálculo de Líneas de Influencia.							
Autor :		Elaboración propia.							
Lugar :									
Fecha :									
Observación :									
REGISTRO				DIRECCIÓN - X			DIRECCIÓN - Y		
No.	Fecha	Tiempo	Velocidad Angular	Desplazamiento (X).	Velocidad (V).	Aceleración (A)	Desplazamiento (X).	Velocidad (V).	Aceleración (A)
		min	(r/min)	um	mm/seg	mm/seg <sup>2</sup>	um	mm/seg	mm/seg <sup>2</sup>
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									

Elaboración propia.

### 3.4.2.5. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE ANÁLISIS – TURBINA HIDRÁULICA

Tabla N° 8: Formato para recolección de Parámetros del sistema dinámico.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Características Dinámicas - Sistema Turbina Hidráulica Francis.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		



<b>Peso Turbina Francis</b>	<b>:</b>	<b>( Wt )</b>		Ton.
<b>Gravedad</b>	<b>:</b>	<b>( g )</b>		m/seg^2
<b>Masa Turbina Francis</b>	<b>:</b>	<b>( Mt )</b>		ton *seg^2/m
<b>Max excentricidad</b>	<b>:</b>	<b>( ex )</b>		m.
<b>Max excentricidad</b>	<b>:</b>	<b>( ey )</b>		m.
<b>Frecuencia de Excitación</b>	<b>:</b>	<b>( ω )</b>		1/ se2

**Dirección - X**

Periodo de vibración ( T )	Frecuencia Angular ( ω )	Frecuencia Natural ( f )	Amplitud ( A )
(s).	(rad/seg).	(Hz).	(Ton.)



**Dirección - Y**

Periodo de vibración ( T )	Frecuencia Angular ( ω )	Frecuencia Natural ( f )	Amplitud ( A )
(s).	(rad/seg).	(Hz).	(Ton.)

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2.6. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE ANÁLISIS – PUENTE GRÚA

Tabla N° 9: Formato para recolección de características dinámicas.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Características Dinámicas - Sistema Puente Grúa.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

<b>TIPO DE GRÚA :</b>			
<b>Patrón de Carga.</b>	Carga Máxima de Izaje:		ton.
	Factor de impacto:		
	Fuerza Máxima ( $F_0$ ):		Ton.
	Frecuencia de Excitación ( $\omega$ ):		Rad/sec.
	Masa del puente grúa ( m )		Ton.m/sec <sup>2</sup>
	Voltaje de operación ( V )		Vol.

Voltaje máx. del motor.		V.
Amplitud		V.
Angulo de fase		grados.



Periodo de vibración (s).	Frecuencia Angular (rad/seg).	Frecuencia Natural (Hz).	Amplitud (Voltios)
( T )	( $\omega$ )	( f )	( A )

Fuente: Elaboración propia.



**3.4.2.7. DEFINIR CARGA DEL PUENTE GRÚA.**

Tabla N° 10: Formato para definir la carga del puente grúa

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Definición de carga Puente Grúa.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

**GENERACIÓN TIEMPO - HISTORIA PUENTE GRÚA**

**DATOS DE ENTRADA**

<b>TIPO DE GRÚA :</b>	<b>QD210 / 25 ton - 12.7 m. A3.</b>		
<b>Patrón de Carga.</b>	Carga Máxima:		ton.
	Carga Mínima:		ton.
<b>Velocidad de Elevación:</b>			m/min.
<b>Velocidad de Viaje:</b>			m/min.
<b>Altura de Elevación.</b>			m.

<b>DURACIÓN DE LA FUERZA DE PULSO:</b>		
Izaje de carga		min.
Recorrido del puente grúa		min.
<b>Tiempo Total</b>		<b>min.</b>



**DATOS**

Peso de izaje		ton.
Velocidad		m/min.
Carga Máxima		ton.
Duración del impacto		min

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2.8. LÍNEAS DE INFLUENCIA EN LA VIGA PRINCIPAL DEL PUENTE GRÚA

Tabla N° 11: Formato para cálculo de Líneas de Influencia en la viga principal del puente grúa



	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Líneas de Influencia.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

Parámetro	Momento Flector.	X-global	Fuerza Cortante	X-global
	Ton*m.	m.	Ton.	m.
Maximo Valor:				
Minimo Valor:				
Area Positiva :				
Area Negativa :				

Fuente: Elaboración propia.

**3.4.2.9. PARÁMETROS DE SITIO**

**TABLA N° 12: Formato para recolección cuadro resumen parámetros de sitio.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Reconocimiento de las Condiciones de Sitio.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

PARÁMETRO SÍSMICO		VALOR
Zona sísmica	Z	
Coefficiente de uso	U	
Coefficiente de sitio - suelo intermedio	S	
	Tp (s)	
	Tl (s)	
Periodo natural de vibración.	T	
Coefficiente de Reducción	Ro	
	R	
	la	
	lp	

Elaboración propia.

3.4.2.10. IRREGULARIDAD ESTRUCTURAL

Tabla N° 13: Formato para cálculo de irregularidad estructural.

<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>					
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>					
Prueba :	Cálculo de irregularidad estructural.				
Autor :	Elaboración propia.				
Lugar :					
Fecha :					
Observación :					
<b>IRREGULARIDAD ESTRUCTURAL EN ALTURA</b>					
Irregularidad de Rigidez - Piso Blando					
Dirección X					
Nro Piso	Dirección de Análisis	Deriva de entrepiso	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.4 * Deriva (i+1)	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.25 * Promedio Deriva (i+3)	
1°	X				
	Y				
2°	X				
	Y				
3°	X				
	Y				
4°	X				
	Y				
0					
Irregularidad de Rigidez - Piso Débil.					
Dirección X			Dirección Y		
Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	VERIFICACIÓN Fuerza Cortante (i) < 80 % * Fuerza Cortante(i+1)	Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	VERIFICACIÓN Fuerza Cortante (i) < 80 % * Fuerza Cortante(i+1)
1°			1°		
2°			2°		
Irregularidad Extrema de Rigidez.					
Dirección X					
Nro Piso	Dirección de Análisis	Deriva de entrepiso	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.6 * Deriva (i+1)	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.4 * Promedio Deriva (i+3)	
1°	X				
	Y				
2°	X				

**Irregularidad Extrema de Resistencia.**

Dirección X			Dirección Y
Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	VERIFICACIÓN Fuerza Cortante (i) < 65 % * Fuerza Cortante(i+1)	Nro Piso
1°			1°
2°			2°
3°			3°
4°			4°
<b>0</b>			

**Irregularidad de Masa o Peso.**

Dirección X		
Nro Piso	Peso (Ton.)	VERIFICACIÓN Peso (i) > 1.5 * Peso (i+1)
1°		
2°		
3°		
4°		
<b>0</b>		

**Irregularidad Geométrica Vertical**

Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	Verificación $B2 > 1.3 * B1$
Dimension piso (i) B1 =		
Dimension piso (i+1) B2 =		
<b>0</b>		

**Discontinuidad en Sistemas Resistentes**

**Fuerza Cortante en la Base (ton).**

Nro Piso	Elemento	Fuerza Cortante (ton).	Verificación: Fuerza cortante del Elemento $\geq$ 10% Cortante del Edificio.
1°	muros		
2°	muros		
3°	muros		
4°	muros		
	columnas		
<b>la =</b>			

IRREGULARIDAD ESTRUCTURAL EN PLANTA			
<b>Irregularidad Torsional</b>			
Dirección X			
Nro Piso	Deriva máxima de Piso	Deriva $\geq 50\% * \text{Deriva de Permisible}(0.007)$	
1°			
2°			
3°			
4°			
0			
<b>Irregularidad de Sistemas no Paralelos</b>			
0			
<b>Esquinas Entrantes</b>			
Dirección	Dimension .	Dimension Total.	VERIFICACIÓN area corte < 85%
X			
Y			
NO HAY IRREGULARIDAD.			
<b>Discontinuidad del Diafragma</b>			
N° Diafragma	Area con Discontinuidades - m2	Area Total - m2	VERIFICACIÓN Area con discontinuidades > 50% Area Total
1°			
2°			
3°			
4°			
Ip =			

**RESUMEN DE IRREGULARIDAD**

	Tipo	Factor
Irregularidad en Altura. - Ia		
Irregularidad en Planta - Ip		
Reducción Sistema Sismoresistente ( R )		
<b>Reducción - Ro</b>		

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.11. AMORTIGUAMIENTO PROPORCIONAL RAYLEIGH

Tabla N° 14: Formato para recolección de datos Amortiguamiento Proporcional Rayleigh.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<p><b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b></p>		
Prueba :	Cálculo del Amortiguamiento proporcional Rayleigh.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

**Datos de entrada:**

**Frecuencia Circular del Sistema con Vibración por Turbina Francis.**

N° PISO	Masa (M)	Rigidez (K)	Frecuencia circular- (w)
	Ton-m/seg2.	Kx - Ton/m	rad/sec
1°			
2°			
3°			
4°			

**Procedimiento**

Según el método del amortiguamiento Proporcional Rayleigh

$$C = \alpha * M + \beta * K$$

Donde:  
 C = amortiguamiento.  
 $\alpha$  = coeficiente proporcional a la masa.  
 M= masa del sistema.  
 K= rigidez del sistema  
 $\beta$  = coeficiente proporcional a la rigidez.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 * \frac{\omega_m * \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_m^2} * \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -1 & 1 \\ \omega_n & \omega_m \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix}$$

$\omega_m * \omega_n$	$\omega_n^2 - \omega_m^2$	$\xi_m$ (asumido)

Cálculo de los coeficientes alpha y beta:

alpha =  $\alpha$   
 betta =  $\beta$

3.4.2.12. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN

Tabla N° 15: Formato para recolección de datos del Factor De Amplificación Dinámica.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo del Factor De Amplificación Dinámica.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

<b>Vibración por Turbina Francis</b>					
Modo de Vibración	Frecuencia Excitación.	Frecuencia Excitación.	Relación de Frecuencias ( $r$ )	Ratio de Amortiguamiento ( $\xi$ )	Factor de Amplificación (Rd)
	Rad/seg.	Rad/seg.			


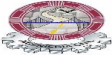
<b>Vibración por Puente grúa</b>					
Modo de Vibración	Frecuencia Excitación.	Frecuencia Excitación.	Relación de Frecuencias ( $r$ )	Ratio de Amortiguamiento ( $\xi$ )	Factor de Amplificación (Rd)
	Rad/seg.	Rad/seg.			

Fuente: Elaboración propia.



3.4.2.13. **ÁNGULO DE FASE**

Tabla N° 16: Formato para recolección de datos del cambio de ángulo de fase.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.		
Prueba :	Cálculo del Ángulo de Fase	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

Datos de entrada:

$$0 < \phi_p < \pi$$

$$\phi_p = \tan^{-1} \left( \frac{2\beta\xi}{1-\beta^2} \right)$$

Donde:

$\phi_p = \text{ángulo de fase}$

$\beta = \text{relación de frecuencias excitacion y del sistema} \quad \beta = \frac{\omega \text{ Ext}}{\omega \text{ nat}}$

$\xi = \text{Fracción de amortiguamiento} ; \frac{c}{cr}$

Vibración por Turbina Francis					
Modo de Vibración	Frecuencia Excitación.	Frecuencia Excitación.	Relación de Frecuencias (r)	Ratio de Amortiguamiento (ξ)	Cambio de Fase (φ)
	Rad/seg.	Rad/seg.			

Vibración por Puente grua					
Modo de Vibración	Frecuencia Excitación.	Frecuencia Excitación.	Relación de Frecuencias (r)	Ratio de Amortiguamiento (ξ)	Cambio de Fase (φ)
	Rad/seg.	Rad/seg.			

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. FORMATOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS – MATLAB

3.4.3.1. PERIODO ESTRUCTURALES Y MODOS DE VIBRACIÓN.

Tabla N° 17: Cálculo de los Período Estructurales, Frecuencia Circular y Modos De Vibración.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de los Período Estructurales, Frecuencia Circular .	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 09 / 2015.	
Observación :		

**Resultados de análisis Modal, Varios grados de libertad [edificio cortante]**

\*\*\*\*\*

**Matriz de Masa:**

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Matriz de Rigidez:**

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Modo - 1**

Eigenvalue	(rad/seg) <sup>2</sup> =	
Circle Freq.	(rad/seg) =	
Frecuencia	(cyc/seg) =	
Periodo	(seg) =	

-----

**Modo - 2**

Eigenvalue	(rad/seg) <sup>2</sup> =	
Circle Freq.	(rad/seg) =	
Frecuencia	(cyc/seg) =	
Periodo	(seg) =	

-----

**Modo - 3**

Eigenvalue	(rad/seg) <sup>2</sup> =	
Circle Freq.	(rad/seg) =	
Frecuencia	(cyc/seg) =	
Periodo	(seg) =	

-----

**Modo - 4**

Eigenvalue	(rad/seg) <sup>2</sup> =	
Circle Freq.	(rad/seg) =	
Frecuencia	(cyc/seg) =	
Periodo	(seg) =	

-----

**Eigenvector:**

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Eigenvalue:**

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Fuente: Elaboración propia.

**3.4.3.2. DESPLAZAMIENTO MÁXIMO**

Tabla N° 18: Formato para análisis de datos, cálculo de Desplazamientos para diferentes sollicitaciones de carga - Matlab.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Desplazamientos para diferentes sollicitaciones de carga.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		



N° Piso	Elevación - mm.	Desplazamiento (mm).			Tiempo - seg.
		Máximo.	Tiempo - seg.	Mínimo	
4					
3					
2					
1					
Base					

Fuente: Elaboración propia.

**3.4.4. FORMATO DE RECOLECCIÓN DE DATOS – ETABS.**

**3.4.4.1. DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS**

Tabla N° 19: Formato para análisis de datos, cálculo Desplazamiento Máximos ante diferentes solicitaciones – Resultados ETABS.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Desplazamiento Máximos ante diferentes solicitaciones.	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

N° Piso	Elevación - mm.	Caso de Carga	Dirección	Máximo	Desplazamiento
				mm	
4					
3					
2					
1					
Base					

Fuente: Resultados ETABS.

**3.4.4.2. PERIODO ESTRUCTURAL****Tabla N° 20: Formato para análisis de datos, cálculo del Periodo Estructural con Vibración Libre– Resultados ETABS.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo del Periodo Estructural con Vibración Libre.	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

Modo	Periodo Estructural	Frecuencia Natural	Frecuencia Circular
	sec	cyc/sec	rad/sec
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

Fuente: Resultados ETABS.

**3.4.4.3. FUERZAS CORTANTES EN LA BASE**

Tabla N° 21: Formato para análisis de datos, cálculo de Fuerzas Cortantes ante unas diferentes solicitaciones de carga.



	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Fuerzas Cortantes ante una diferentes solicitaciones de carga	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :		
Fecha :		
Observación :		

Nivel	Elevación	Fuerza Cortante	Fuerza Cortante
	(mm).	(Ton.) - Vx	(Ton)-Vy
4°			
3°			
2°			
1°			
Base			

Fuente: Resultados ETABS.

**3.4.4.4. DERIVAS DE ENTREPISO**

Tabla N° 22: Formato para análisis de datos, cálculo de Derivas Máximas ante diferentes solicitaciones de carga.

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
		<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>					
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>							
Prueba :	Cálculo de Derivas Máximas ante diferentes solicitaciones de carga.						
Autor :	Formato Etabs.						
Lugar :							
Fecha :							
Observación :							
N°Piso	Altura	Desplazamiento	Derivas Elástica	Derivas Inelastica	Derivas $\Delta$ Inelastica	Derivas Limite	
	m.	mm			%		

Fuente: Resultados ETABS.

**3.4.2. INSTRUMENTOS DE INGENIERÍA**

- Planos Estructurales y Arquitectónicos de la Casa de Maquinas.
- Archivos fotográficos.
- Archivo electrónico del espectro de respuesta.
- Archivo electrónico del cálculo de líneas de influencia para vigas continuas.
- Hojas electrónicas con funciones de carga para vibraciones por Turbina hidráulica Francis, puente grúa y vibraciones sísmicas.
- Algoritmo de cálculo para análisis modal de edificios cortantes.
- Recursos Computacionales :
  - Etabs v2015.
  - Matlab v2012.



- Excel.

### 3.5. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.5.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

a) Objetivos:

Reconocer las propiedades de los materiales de concreto estructural usado en columnas, losas y muros de corte.

b) Instrumentos usados en la prueba

Hoja electrónica de propiedades de los materiales.

c) Procedimiento

El reconocimiento estructural empieza por identificar las propiedades de los materiales, tal es el caso del concreto y del acero, en función de los siguientes pasos:

- Resistencia a la compresión ( $F'c$ ) Kg/cm<sup>2</sup>, a los 28 días.
- El módulo de Young (E), Kg/cm<sup>2</sup>; Para el concreto es directamente proporcional a la resistencia a la compresión ( $F'c$ ) se hallará mediante la fórmula:

$$E = 15000 * \sqrt{F'c}.$$

- Para el acero muestra este valor en función al grado que se esté usando.
- Se identificó el peso específico ( $\gamma$ ) para el concreto como para el acero, correspondiente a la relación entre el peso que ocupa un material en una unidad de volumen.
- Se identificó el módulo de Poisson ( $\nu$ ): definido por la constante elástica, definida como la relación entre la deformación transversal y la longitudinal.

$$\nu = \frac{\text{Deformación transversal}}{\text{Deformación longitudinal}}$$



- Se identificó el módulo de corte (G): para el concreto es directamente proporcional al módulo de Young del concreto, definido por:  $(0.416 * E \text{ concreto})$ , puede ser hallado también como el esfuerzo de corte o deformación de corte.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Para el acero el módulo de corte se halla, por la siguiente fórmula:  $0.4 * E_c$ , asumiendo un valor de 0.25 para el coeficiente de Poisson.

- Módulo de fluencia de acero ( $f_y$ ); de acuerdo al tipo de acero usando las siguientes unidades - Kg/cm<sup>2</sup>.

d).- Toma de datos

Tabla 2: Propiedades mecánicas del concreto.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Propiedades Mecánicas.	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 09 / 2015.	
Observación :		

Resistencia Compresión	(F'c)	275.00	Kg/cm <sup>2</sup> .
Coefficiente de Dilatación Térmica	(T)	8 - 12 E-06	(1/c°).
Peso Específico	(Y)	2.40	Ton/m <sup>3</sup> .
Módulo de Elasticidad	(E)	248746.86	Kg/cm <sup>2</sup> .
Módulo de Corte	(G)	99498.74	Kg/cm <sup>2</sup> .
Módulo de Poisson	(ν)	0.15 - 0.25	

Elaboración propia.

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Propiedades Mecánicas.	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 09 / 2015.	
Observación :	Barras grado 60°.	

PROPIEDADES	SIMB	ACERO	UND.
Esfuerzo de Fluencia	(F'y)	4200.00	Kg/cm2.
Esfuerzo de resistencia a la tracción	(F'u)	6300.00	Kg/cm2.
Módulo de Elasticidad	( E )	2.1+E06	Kg/cm2.
Módulo de Poisson	( v )	0.29	
Coefficiente de	( T )	12 * E-06	( 1 / c° )
Peso Específico	( Y )	7.85	ton/m3.

Elaboración propia.

### 3.5.2. RIGIDEZ ESTRUCTURAL

a) Objetivos:

- Identificar los parámetros necesarios que intervienen en el cálculo de la rigidez.
- Calcular el aporte de rigidez de los elementos estructurales entre columnas y muros de corte en cada nivel de la estructura y para ambas direcciones X, Y.

b) Instrumentos usados en la prueba

Hoja electrónica de aporte de rigidez estructural.

c) Procedimiento

Se identificaron las propiedades de cada sección en los elementos estructurales constituyentes, para ambas direcciones X,Y.

- Se calculó la inercia para elementos de geometría rectangular, según Steiner con respecto al centro de gravedad y tomando como eje de rotación en sentido X como para el sentido perpendicular Y.

$$Inercia X = \frac{base * altura^3}{12}$$

### CÁLCULO DE RIGIDEZ EN COLUMNAS

- Se calculó el aporte de rigidez de los elementos estructurales resistentes a flexo compresión (columnas), en función de las propiedades como el módulo de elasticidad, la inercia, altura para cada eje de traslación tanto X como Y.

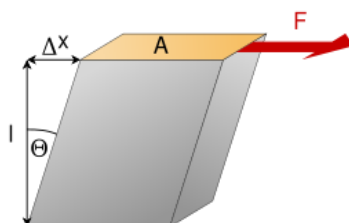
$$Rigidez = \frac{I_x * E * 12}{h^3}$$
$$E = 15000 * \sqrt{F'c}$$

$I =$  Inercia.

$h =$  altura del elemento.

### CÁLCULO DE RIGIDEZ EN MUROS CORTANTE

- Para hallar la rigidez por fuerzas cortantes y de flexión en los muros, se usó la metodología propuesta por: (Amrhein, pág. 70), donde se determina la deformación de un muro producida por una carga unitaria horizontal aplicada en el nivel superior del muro, conocido como muro cantilever:



$$= 1$$

**Muro Cantiliver**

$$\Delta t = \Delta m + \Delta v$$

**Muro Cantilever**

- La rigidez es directamente proporcional a la fuerza que se le aplica:

$$\text{Rigidez de un muro cantiléver} = k \text{ muros} = 1 / \Delta t$$

$$\Delta t = \Delta m + \Delta v = \frac{P * h^3}{3 * E_c * I} + \frac{1.2 * P * h}{A * E_v}$$

$\Delta m$  = deflexion por momento flexionante, m.

$\Delta v$  = deflexion por fuerza cortante, m.

P = fuerza lateral en el muro, Ton.

h = altura del muro, m.

A = sección transversal del muro, m<sup>2</sup>.

I = momento de inercia de la seccion transversal del muro , en dirección de flexión, m<sup>4</sup>.

E<sub>c</sub> = Módulo de elasticidad en compresión (concreto), Ton/m<sup>2</sup>.

E<sub>v</sub> = Módulo de elasticidad en cortante, Ton/m<sup>2</sup>.

Se asume E<sub>m</sub> y E<sub>v</sub> son constantes,

E<sub>v</sub> (modulo en cortante) = 0.4\*E<sub>c</sub>; donde existe una misma resistencia del material a través del muro. Si se asume también

E<sub>c</sub> = 2487468.59 ton / m<sup>2</sup>, el espesor del muro es 1 m. y P = 1 Ton.



d).- Toma de datos

Tabla N° 23: Cálculo de la rigidez.

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.									
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.									
Prueba :	Aporte de la rigidez Estructural.								
Autor :	Elaboración Propia,								
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.								
Fecha :	15 / 10 / 2015.								
Observación :									
Nivel de Válvula Esférica. Piso N°1				Esfuerzo de Fluencia del Acero :	fy =	4200.00	Kg / cm1		
				Resistencia del Concreto	f'c =	275.00	Kg / cm2		
				Módulo de Elasticidad del Concreto.	Ec =	2487468.59	ton / m2		
Altura de piso.			4.9			(m.)			
PARÁMETRO			EJE X-X.				EJE Y-Y.		
Elemento	Espesor	Largo	Area	Inercia - I	Desplazamiento - Δ	Rigidez - k	Inercia - I	Desplazamiento - Δ	Rigidez - k
	( m ).	( m ).	( m <sup>2</sup> ).	( m <sup>4</sup> ).	( m ).	( ton/m ).	( m <sup>4</sup> ).	( m ).	( ton/m ).
MURO A	1.00	5.00	5.00	1.04E+01	2.99E-06	3.34E+06	4.17E-01	3.93E-05	2.54E+05
MURO 1	0.90	4.75	4.28	2.89E-01	5.64E-05	7.10E+04	8.04E+00	3.69E-06	1.08E+06
MURO 6	0.90	3.50	3.15	2.13E-01	7.65E-05	2.61E+04	3.22E+00	7.25E-06	2.76E+05
				SUMATORIA		3.44E+06	SUMATORIA		1.61E+06
Nivel de Turbina Hidráulica Francis.				Piso N°2					
Altura de piso.			5.4			(m.)			
MURO A	1.00	5.00	5.00	1.04E+01	1.16E-05	8.65E+05	4.17E-01	1.65E-04	6.05E+04
MURO B	1.00	4.00	4.00	5.33E+00	1.89E-05	2.11E+05	3.33E-01	1.55E-04	2.57E+04
MURO 1	0.90	4.75	4.28	2.89E-01	2.37E-04	1.69E+04	8.04E+00	1.17E-05	3.43E+05
MURO 6	0.90	3.50	3.15	2.13E-01	3.22E-04	6.21E+03	3.22E+00	2.29E-05	8.73E+04
				SUMATORIA		1.10E+06	SUMATORIA		5.16E+05

Fuente: Elaboración propia.



Tabla N° 24: Cálculo de la rigidez Nivel Válvula Esférica.

Nivel de Mantenimiento.					Piso N°3				
Altura de piso.				4.9	(m.)				
PARÁMETRO			EJE X-X.			EJE Y-Y.			
Elemento	Espesor	Largo	Area	Inercia - I	Desplazamiento - Δ	Rigidez - k	Inercia - I	Desplazamiento - Δ	Rigidez - k
	( m ).	( m ).	( m <sup>2</sup> ).	( m <sup>4</sup> ).	( m ).	( ton/m ).	( m <sup>4</sup> ).	( m ).	( ton/m ).
MURO A	1.00	5.00	5.00	1.04E+01	2.99E-06	3.34E+06	4.17E-01	5.23E-05	1.91E+05
MURO B	1.00	4.00	4.00	5.33E+00	4.80E-06	8.33E+05	3.33E-01	4.91E-05	8.14E+04
MURO 1	0.90	4.75	4.28	2.89E-01	5.64E-05	7.10E+04	8.04E+00	3.69E-06	1.08E+06
MURO 6	0.90	3.50	3.15	2.13E-01	7.65E-05	2.61E+04	3.22E+00	7.25E-06	2.76E+05
<b>SUMATORIA</b>						<b>4.27E+06</b>	<b>SUMATORIA</b>		<b>1.63E+06</b>
Nivel de Puente grúa.					Piso N°4				
Muro con Aberturas			Altura de piso.		7.7	(m.)			
MURO 1-3	0.20	2.10	0.42	1.50E-01	7.13E-05	1.40E+05	1.40E-03	4.76E-03	2.10E+03
	0.20	5.00	1.00	2.08E+00	5.34E-05	1.87E+05	3.33E-03	1.79E-02	5.59E+02
	0.20	2.10	0.42	1.50E-01	7.13E-05	1.40E+05	1.40E-03	4.76E-03	2.10E+03
MURO A-H	0.20	4.00	0.80	1.07E+00	6.67E-06	5.99E+05	2.67E-03	7.90E-04	5.06E+03
	0.20	4.75	0.95	3.17E-03	1.93E-02	1.03E+02	1.79E+00	4.65E-05	4.30E+04
	0.20	4.75	0.95	3.17E-03	4.99E-03	4.01E+02	1.79E+00	1.66E-05	1.20E+05
	0.20	3.50	0.70	2.33E-03	6.77E-03	2.96E+02	7.15E-01	3.26E-05	6.13E+04
COLUMNAS		Características de la Sección		Área de concreto	Propiedades mecánicas				
		Ancho a yy (m)	Largo b xx (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	EJE X-X.		EJE Y-Y.		
Altura (m.):	7.7				INERCIA (m <sup>4</sup> )	RIGIDEZ Ton/m.	INERCIA (m <sup>4</sup> )	RIGIDEZ Ton/m.	
C	1	1.55	0.80	14.88	6.61E-02	5.19E+03	2.48E-01	1.95E+04	
C	2	1.55	0.90	5.58	9.42E-02	2.46E+03	2.79E-01	7.30E+03	
C	3	0.60	0.90	2.16	3.65E-02	4.77E+02	1.62E-02	2.12E+02	
<b>SUMATORIA X</b>					<b>8.13E+03</b>		<b>SUMATORIA X</b>	<b>2.72E+05</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Resumen de rigidez del sistema.

Piso	Altura	Base	Rigidez X	Rigidez Y
	(m.)	(m.)	(Ton/m.)	(Ton/m.)
N°1	5.4	25	1.09E+07	1.61E+06
N°2	4.9	33	1.10E+07	1.63E+06
N°3	4.5	13	1.35E+06	1.63E+06
N°4	7.7	13	1.83E+07	1.63E+05

Elaboración propia.

### 3.5.3. METRADO DE CARGAS

#### a).- Objetivos

- Diferenciar el aporte de los elementos entre carga viva y carga muerta.
- Calcular el peso de la estructura para el análisis sísmico.

#### b).- Instrumentos

- Hoja electrónica para metrado de cargas

#### c).- Procedimiento

Se ha considerado el aporte de carga viva y muerta (peso propio y sobrecarga útil),

- Para la carga muerta, se calculó en base a propiedades del concreto como la relación inversamente proporcional entre la densidad 2.4 ton/m<sup>3</sup> y el volumen correspondiente de los elementos estructurales como: muros, columnas. Vigas, losas.

$$\text{Peso} = \text{Peso Específico (material)} * \text{Volumen}$$

La carga viva repartida será asignada a cada piso según (Ketchikan Public Facilities, 10 - 2010), muestra la siguiente tabla:



Tabla N° 25: Carga viva uniforme.

ÁREA DE CARGA	SOBRECARGA ÚTIL – ton/m2
Sala de equipos menores.	0.50
Piso de mantenimiento.	0.50
Piso de turbina.	1.00
Piso de equipo mecánico y eléctrico.	1.00

Fuente: (Ketchikan Public Facilities, 10 - 2010)

d).- Toma de datos

Tabla N° 26: Metrado de cargas

 <b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>		
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Características Dinámicas - Sistema Turbina Hidráulica Francis.	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 09 / 2015.	
Observación :		

CARGA MUERTA							
4° Piso Nivel de Mantenimiento.							
		ancho	largo	altura			
Losa e = 50.	=	13 m	7 m	0.50 m	x	2.4 ton/m3	109.20 ton
Columna 90 X 1	=	3.6 m	1 m	8.60 m	x	2.4 ton/m3	74.30 ton
Columna 80 X 1	=	9.6 m	1 m	8.60 m	x	2.4 ton/m3	198.14 ton
Columna 60 X 1	=	2.4 m	1 m	8.60 m	x	2.4 ton/m3	49.54 ton
Viga Carrilera X.	=	65 m	1.55 m	0.80 m	x	2.4 ton/m3	193.44 ton
Viga Carrilera Y.	=	23 m	1.55 m	0.80 m	x	2.4 ton/m3	68.45 ton
Muro e=0.2.	=	8.6 m	92 m	0.20 m	x	2.4 ton/m3	379.78 ton
						Total	1,072.85 ton
3° Piso Nivel de Generador.							
Losa e = 50.	=	13 m	6.5 m	0.50 m	x	2.4 ton/m3	101.40 ton.
Muro X	=	1 m	66 m	4.70 m	x	2.4 ton/m3	744.48 ton.
Muro Y	=	0.9 m	26 m	4.70 m	x	2.4 ton/m3	263.95 ton.
						Total	1,109.83 ton
2° Piso Nivel de Turbina.							
Losa e = 50.	=	13 m	8 m	0.50 m	x	2.4 ton/m3	124.80 ton.
Muro X	=	1 m	66 m	5.40 m	x	2.4 ton/m3	855.36 ton.
Muro Y	=	0.9 m	26 m	5.40 m	x	2.4 ton/m3	303.26 ton.
						Total	1,283.42 ton.
1° Piso Nivel de Válvula Esferica.							
Losa e = 50.	=	13 m	10 m	0.50 m	x	2.4 ton/m3	156.00 ton.
Muro X	=	1 m	50 m	4.90 m	x	2.4 ton/m3	588.00 ton.
Muro Y	=	0.9 m	26 m	4.90 m	x	2.4 ton/m3	275.18 ton.
						Total	1,019.18 ton
<b>PT = P4 + P3 + P2 + P1</b>						<b>4485.29 ton</b>	



CARGAS VIVA MÍNIMA REPARTIDA							
1°	13 m	x	10 m	x	50% m	x	0.5 ton/m2 = 32.50 ton.
2°	13 m	x	8 m	x	50% m	x	0.5 ton/m2 = 26.00 ton.
3°	13 m	x	7 m	x	50% m	x	1 ton/m2 = 42.25 ton.
4°	13 m	x	7 m	x	50% m	x	1 ton/m2 = 45.50 ton.

Fuente: Elaboración propia.

- El peso de la estructura que se usará para el análisis sísmico, consideró un metrado de cargas a nivel de cargas muertas mientras la carga viva será afectada por un valor de 50% de la sobrecarga de uso, al corresponder a una estructura esencial.

$$Peso\ Total = CM + 0.5 (CV)$$

FIGURA N° 61: Resumen Metrado de Cargas.

Nivel	CM - Ton.	CV - Ton.	PESO - Ton.	MASA - Ton.*m/seg2
1°	1,019.18	32.50	1,051.68	107.21
2°	1,283.42	26.00	1,309.42	133.48
3°	1,109.83	42.25	1,152.08	117.44
4°	1,072.85	45.50	1,118.35	114.00
<b>SUMATORIA</b>	<b>4,485.29</b>	<b>146.25</b>	<b>4,631.54</b>	<b>472.12</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.4. REGISTRO DE VIBRACIONES DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS

a).- Objetivos:

- Reconocer los parámetros de vibración de la turbina hidráulica Francis.

b).- Instrumentos:

- Transductores de Desplazamiento



## c).- Procedimiento

- Se ha obtenido un registro de mediciones por vibración de la turbina Francis, respecto al tiempo, correspondientes a un día entero del 10-07-2015.
- Considerando que la turbina hidráulica Francis responde a un movimiento sinusoidal, se tiene entonces el movimiento armónico de una onda periódica, dicha onda se repetirá cada  $360^\circ$  o se expresará matemáticamente cada  $2\pi$  radianes.

$$\text{Desplazamiento: (mm):}$$
$$x = D \sin(2\pi ft) / 2$$

*D = valor de desplazamiento pico a pico.*  
*t = tiempo en segundos.*  
*f = frecuencia en Hz.*  
*g = Gravedad en m/seg<sup>2</sup> = 9.810.*

- La diferencial de la fórmula del desplazamiento nos dará la velocidad correspondiente a un tiempo.

$$\text{Velocidad } \left( \frac{\text{mm}}{\text{seg}} \right):$$
$$v = \pi f D \cos(2\pi ft)$$

- De la misma manera si conocemos la diferencial de la velocidad podemos obtener una aceleración:

$$\text{Aceleración } \left( \frac{\text{mm}}{\text{seg}^2} \right):$$
$$a = \frac{-2\pi^2 f^2 D \sin(2\pi ft)}{g}$$

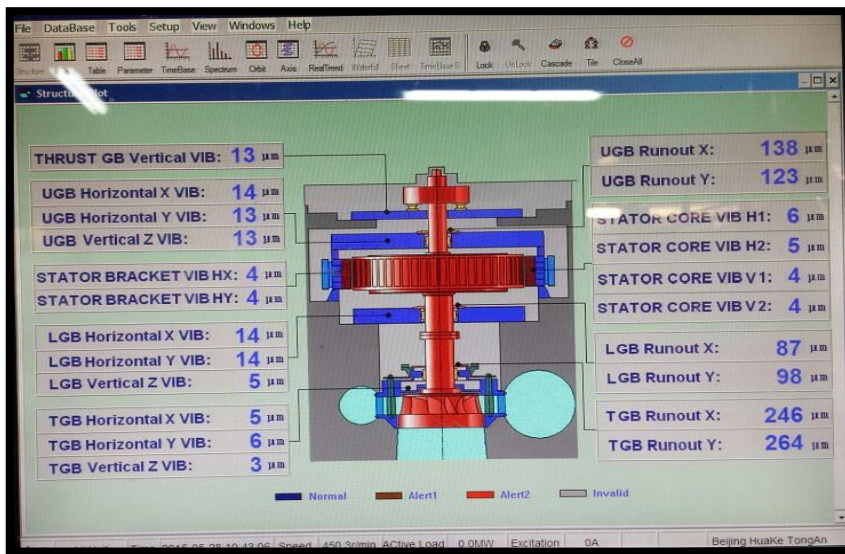
Si podemos medir el desplazamiento, se podrá derivar y ver los datos en unidades de velocidad, a su vez estos últimos datos se podrán derivar en aceleración.

d).- Toma de datos

Vibración	Ubicación	Componente	Fecha	Time-Step	# Puntos	APS (g)
Turbina Hidráulica Francis.	Central Hidroeléctrica Machupicchu.	X	10/07/2015	00:02:50	500	9.81
		Y	10/07/2015	00:02:50	500	9,81

Velocidad Angular (r/min)	
Max	451.50
Min	448.50
Promedio	450.05
Excentricidad (um)	
Max. X	0.00025
Max. Y	0.00027

FIGURA N° 62: Pantalla de vibraciones Turbina hidráulica Francis.



Fuente: propia.

- Según los registros recogidos en la central hidroeléctrica: se calcularon valores concernientes a la velocidad angular de la rotación de la turbina, asimismo para la excentricidad que se genera entre el eje y dicha turbina, estos parámetros fueron importantes para definir la fuerza de la masa giratoria:

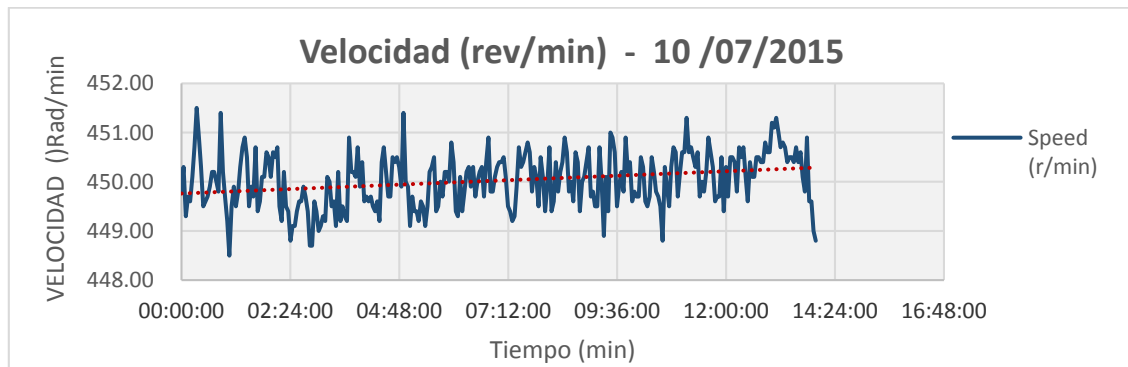


TABLA N° 27: Componentes del movimiento de la turbina hidráulica Francis.

				<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
				<b>CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL</b>					
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>									
Prueba :	Registro de vibraciones por Turbina hidráulica Francis.								
Autor :	Elaboración propia.								
Lugar :	Casa de Máquinas CH. MACHUPICCHU.								
Fecha :	20-11-2015.								
Observación :									
REGISTRO				DIRECCIÓN - X			DIRECCIÓN - Y		
No.	Fecha	Tiempo	Velocidad Angular	Desplazamiento (X).	Velocidad (V).	Aceleración (A)	Desplazamiento (X).	Velocidad (V).	Aceleración (A)
		min	(r/min)						
1	10/07/2015	00:00:01	449.80	249	5.86	0.0282	270	6.36	0.0305
2	10/07/2015	00:02:51	450.30	250	5.89	0.0283	271	6.39	0.0307
3	10/07/2015	00:05:46	449.30	247	5.81	0.0279	266	6.26	0.0300
4	10/07/2015	00:08:37	449.70	247	5.82	0.0279	270	6.36	0.0305
5	10/07/2015	00:11:28	449.60	247	5.81	0.0279	269	6.33	0.0304
6	10/07/2015	00:14:19	450.10	248	5.84	0.0281	270	6.36	0.0306
7	10/07/2015	00:17:15	450.70	248	5.85	0.0282	274	6.47	0.0311
8	10/07/2015	00:20:08	451.50	248	5.86	0.0283	285	6.74	0.0325
9	10/07/2015	00:23:01	450.90	249	5.88	0.0283	270	6.37	0.0307
10	10/07/2015	00:25:55	450.30	249	5.87	0.0282	274	6.46	0.0311
11	10/07/2015	00:28:49	449.50	247	5.81	0.0279	273	6.43	0.0308
12	10/07/2015	00:31:42	449.60	248	5.84	0.0280	274	6.45	0.0310
13	10/07/2015	00:34:31	449.70	247	5.82	0.0279	268	6.31	0.0303
14	10/07/2015	00:37:27	449.90	247	5.82	0.0279	272	6.41	0.0308
15	10/07/2015	00:40:20	450.20	247	5.82	0.0280	272	6.41	0.0308
16	10/07/2015	00:43:11	450.20	249	5.87	0.0282	272	6.41	0.0308
17	10/07/2015	00:46:04	450.00	248	5.84	0.0281	273	6.43	0.0309
18	10/07/2015	00:48:58	449.80	248	5.84	0.0280	272	6.41	0.0308

Fuente: Registros de vibraciones Egemsa.

**FIGURA N° 63: Velocidad de rotación Turbina Francis.**



Elaboracion propia.

Gráfico desplazamiento en Dirección x - Serie en función del tiempo.

**FIGURA N° 64: Desplazamiento en Dirección x Turbina Francis.**



Elaboracion propia

Gráfico velocidad en Dirección x - Serie en función del tiempo.

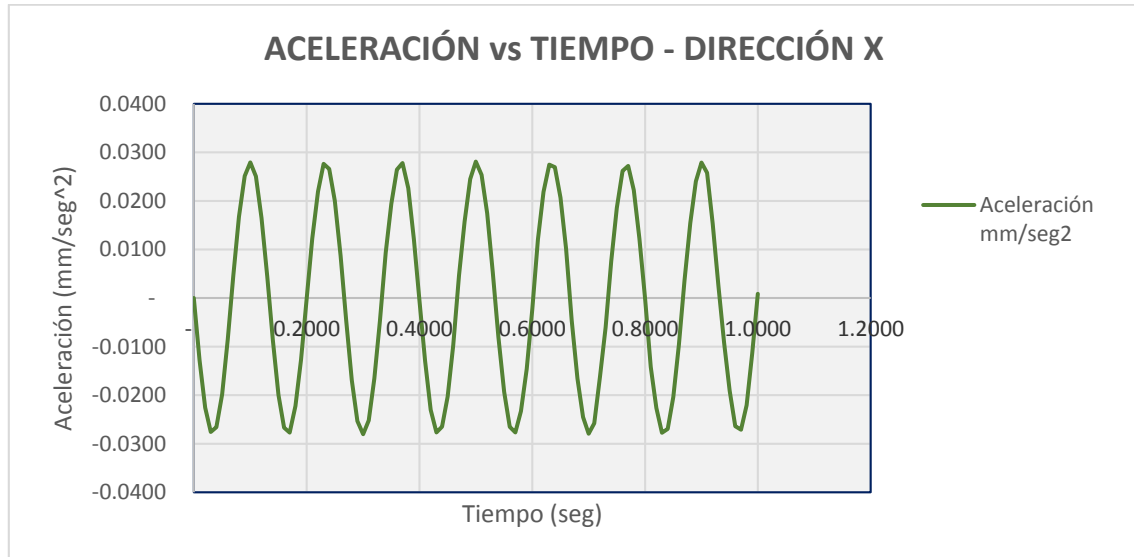
**FIGURA N° 65: Velocidad en Dirección x Turbina Francis.**



Elaboracion propia

Gráfico Respuesta a la aceleración en Dirección x - Serie en función del tiempo.

FIGURA N° 66: Aceleración en Dirección x Turbina Francis.



Elaboracion propia.

### 3.5.5. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SISTEMA – TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS.

#### a).- Objetivos

- Identificar la amplitud del movimiento permanente de la turbina hidráulica Francis en la estructura.

#### b).- Instrumentos

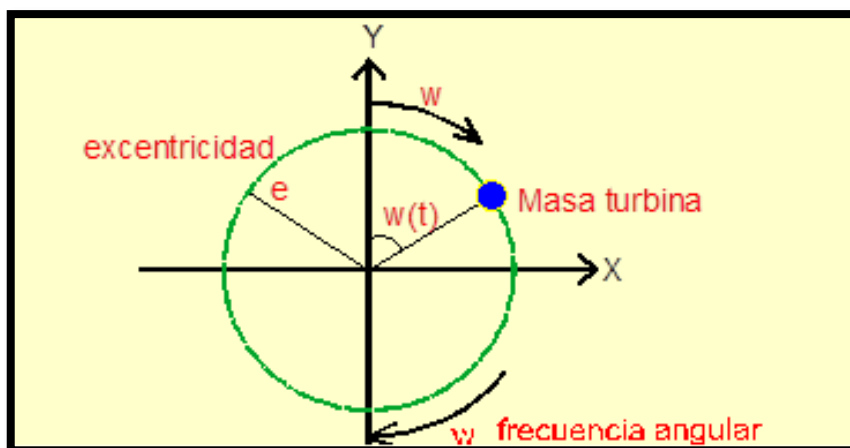
- Hoja electrónica: cálculo de amplitud del movimiento.

#### c).- Procedimiento

- Se empezó por la descripción del sistema:

El sistema Turbina Hidráulica Francis, se basa en analizar un generador de fuerza armónica producto de la rotación de la turbina. Este sistema sigue el principio de generación de vibración forzada donde la masa correspondiente a la turbina Francis viene rotando a una misma velocidad alrededor de un eje, en el mismo sentido, existe una pequeña distancia con respecto al eje llamada excentricidad, este valor refleja el desalineamiento que existe entre el eje y la masa que rota de manera que genera las vibraciones del sistema turbina hidráulica, evaluadas en las direcciones x,y.

FIGURA N° 67: Oscilador simple Turbina Hidráulica Francis.



Fuente: Elaboración propia.

- Las características dinámicas, se analizarán asociando el sistema de la turbina Francis como un oscilador simple en el que el amortiguamiento es despreciable.

1.- Se analizó entonces el diagrama de cuerpo libre del sistema – Turbina Francis, fue posible reconocer las fuerzas que actúan sobre el oscilador para que este llegara al equilibrio dinámico. Al sumar las fuerzas actuantes sobre el oscilador se tiene:



$$F(t) = m\ddot{x} + kx$$

2.- Al analizar la fuerza externa  $F(t)$ , impuesta por la rotación de la masa de la turbina Francis, se observa que toma la forma de una excitación armónica, por lo tanto se describe la ecuación mencionada en el sub ítem 2.2.6.1.5. pág. 58:

$$F(t) = F_0 \text{sen}(\bar{\omega}t)$$

$F_0$  = Amplitud máxima del movimiento.

$\bar{\omega}$  = Frecuencia de excitación.

3.- Siguiendo la metodología de: (Paz, 1992, págs. 39-42) mostrada en el Marco Teórico pág. 58 – 59; fue necesario reconocer que la respuesta a un movimiento armónico sin amortiguación, la que contiene una solución particular ( $X_p$ ), que caracteriza la naturaleza de la función forzada, fue tomada como:

$$X(p) = x \text{sen}(\bar{\omega}t)$$



4.- Donde  $x$  = máximo valor o amplitud de la solución particular (función forzada), derivando en términos de velocidad y aceleración. Se reemplazó dichos valores en la ecuación de equilibrio dinámico del sistema, se obtiene:

$$m \ddot{x} + kx = 0;$$

Derivando y reemplazando en la ecuación de equilibrio dinámico anterior:

$$F(t) = m * \bar{\omega}^2 * \text{sen}(\bar{\omega}t)$$

5.- Esta última ecuación tiene la misma forma para el movimiento del oscilador simple, excitado armónicamente por una fuerza de amplitud y donde  $x$  es la distancia entre el eje y la masa rotante, a la cual llamaremos ( $eo$ ):

$$Fo * \text{sen}(\bar{\omega}t) = m * eo * \bar{\omega}^2 * \text{sen}(\bar{\omega}t)$$

6.- Siguiendo el estudio (Jaime de la Colina y Jesús Valdés, 2010) en el que usan un excitador de masa rotante, donde para el cálculo de la fuerza actuante sobre el sistema usan la ecuación que se muestra a continuación:

$$Fo = m * eo * \bar{\omega}^2$$



$m$  = Masa de la turbina Francis (ton\*seg<sup>2</sup>/m).

$eo$  = Excentricidad en la dirección x,y (m).


$\bar{\omega}$  = Frecuencia circular de excitación (rad/seg).

$Fo$  = Fuerza o amplitud del excitador rotante.

d).- Toma de datos: amplitud de vibración de turbina hidráulica Francis

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Características Dinámicas - Sistema Turbina Hidráulica Francis.	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	27 / 10 / 2015.	
Observación :		

Datos de entrada:

<b>TURBINA FRANCIS</b>			
			
<b>Peso Turbina Francis</b>	<b>: ( <math>\bar{W}t</math> )</b>	185.00	Ton.
<b>Gravedad</b>	<b>: ( g )</b>	9.80	m/seg <sup>2</sup>
<b>Masa Turbina Francis</b>	<b>: ( Mt )</b>	18.88	ton *seg <sup>2</sup> /m
<b>Max excentricidad</b>	<b>: ( ex )</b>	250.00	um.
<b>Max excentricidad</b>	<b>: ( ey )</b>	270.00	um.
<b>Frecuencia angular de Excitación :</b>	<b>( <math>\omega</math> )</b>	47.12	rad/seg.

Fuente: Elaboración propia.

**TURBINA HIDRAULICA FRANCIS**

$$F_o = m * e_o * \bar{\omega}^2$$

<b>Peso</b>		185.00 ton
<b>Gravedad</b>		9.80 m/seg <sup>2</sup>
<b>Masa =</b>		18.88 ton *seg <sup>2</sup> /m
<b>Excentricidad - ( eo X ) =</b>		0.00025 m.
<b>Excentricidad - (eo Y ) =</b>		0.00027 m.
<b>Frecuencia angular ( ω ) =</b>		47.12 rad/ seg.
<b>Fo X =</b>		10.48 ton .
<b>Fo Y =</b>		11.32 ton .

- La frecuencia forzada por la turbina hidráulica Francis;

$$\bar{\omega} = \frac{450 \text{ RPM} * 2 * \pi}{60} = 47.12 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

Tabla N° 28: Amplitud de vibración de Turbina hidráulica Francis.

**TURBINA FRANCIS**

**Dirección - X**

Periodo de vibración ( T )	Frecuencia Angular ( ω )	Frecuencia Natural ( f )	Amplitud de la fuerza ( A )
(s).	(rad/seg).	(Hz).	(Ton.)
0.13	47.12	7.50	10.48

**Dirección - Y**

Periodo de vibración ( T )	Frecuencia Angular ( ω )	Frecuencia Natural ( f )	Amplitud ( A )
(s).	(rad/seg).	(Hz).	(Ton.)
0.13	47.12	7.50	11.32

Fuente. Elaboración propia.



### 3.5.6. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS SISTEMA - PUENTE GRÚA

a) Objetivos:

Definir las propiedades naturales del sistema – motor puente grúa necesarias para el análisis de sus características dinámicas.

b) Instrumentos usados en la prueba

Hoja electrónica de propiedades naturales del sistema – motor puente grúa.

c) Procedimiento:

- El reconocimiento de las características dinámicas por la descripción del sistema – motor de puente grúa:

El generador de fuerza del puente grúa, es accionado mediante un motor eléctrico de corriente alterna, induce una fuerza armónica de frecuencia definida, cuya velocidad de funcionamiento es regulada por un controlador electrónico.

Según, el sub ítem 2.2.4. del Marco Teórico pág. 34. Las características dinámicas de un sistema con un solo grado de libertad dinámica se definen analizando la vibración libre no amortiguada del modelo dinámico.

- El sistema – motor puente grúa, se analizará como un oscilador en vibración libre, de masa ( $m$ ), se considera que el oscilador esta inmóvil en  $x = 0$ , en el instante  $t = 0$ .

Basándonos en la ecuación del movimiento planteada para un sistema en vibración libre (1,1) y (1,3) correspondiente, se obtiene directamente, despreciando los términos que tienen en cuenta la excitación  $F(t)$  y la fuerza de amortiguamiento, la siguiente ecuación:

$$\ddot{x}(t) + kx(t) = 0$$

- Se calcularán los parámetros dinámicos más importantes de su movimiento:

Como la frecuencia circular, bajo la siguiente ecuación:

$$\frac{k}{m} = \omega^2$$



Dónde:  $\omega$  = es la frecuencia angular del sistema, que se mide en rad/seg y que es la primera característica del sistema.

- Otras características como el periodo de vibración ( $T$ ) en segundos, definido por:

$$T = 2\pi/\omega$$

- La frecuencia natural del sistema ( $f$ ) en Hertz o  $\text{seg}^{-1}$ .

$$f = 1/T$$

- Para el cálculo de la amplitud del movimiento es necesario tener en cuenta La ecuación diferencial dinámica sin amortiguamiento mostrada en el capítulo 2 del marco teórico (1,3) y (1,4), se transforma en:

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0;$$

$$x(t) = A \text{sen}(\omega t + \phi);$$



( $A$ ) Se le llama amplitud del movimiento queda definido por el voltaje de operación del motor, y ( $\phi$ ) es el ángulo de fase.

( $A$ ) y ( $\phi$ ) se establecen a partir de las condiciones iniciales del problema.

- Una corriente alterna se produce en un circuito cuando se aplica una fuente de tensión a este circuito. En un motor de corriente alterna la magnitud y el sentido varían cíclicamente, al graficar la corriente alterna, la gráfica obtenida tiene la forma de una onda sinusoidal.

La tensión que va a desarrollar el motor para romper sus condiciones iniciales de inercia y pueda comenzar a operar está definido por el voltaje ( $V$ ) de operación.

d).- Recolección de datos

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>		
	Prueba: Características del modelo de análisis.		
Lugar :	CASA DE MAQUINAS CH. MACHUPICCHU.		
Fecha :	10 / 07 / 2015.		
Observación :			

Datos de entrada:

Tabla N° 29: características de diseño del puente grúa.

TIPO DE GRÚA :	QD210 / 25 ton - 12.7 m. A3.		
<b>Patrón de Carga.</b>	Carga Máxima de Izaje:	210.00	ton.
	Factor de impacto:	1.40	
	Fuerza Máx ( Fo ) :	294.00	Ton.
	Frecuencia de Excitación ( ω ):	60.00	Rad/sec.
	Masa del puente grúa ( m )	25.50	Ton.m/sec^2
	Voltaje de operación ( V )	380.00	Vol.

$$a(t) = A \text{ sen}(\omega t + \phi)$$

A = amplitud en voltios o amperios - valor maximo o de pico.

ω = Pulsacion en rad/seg.

t = tiempo en segundos.

φ = ángulo de fase inicial en rad.

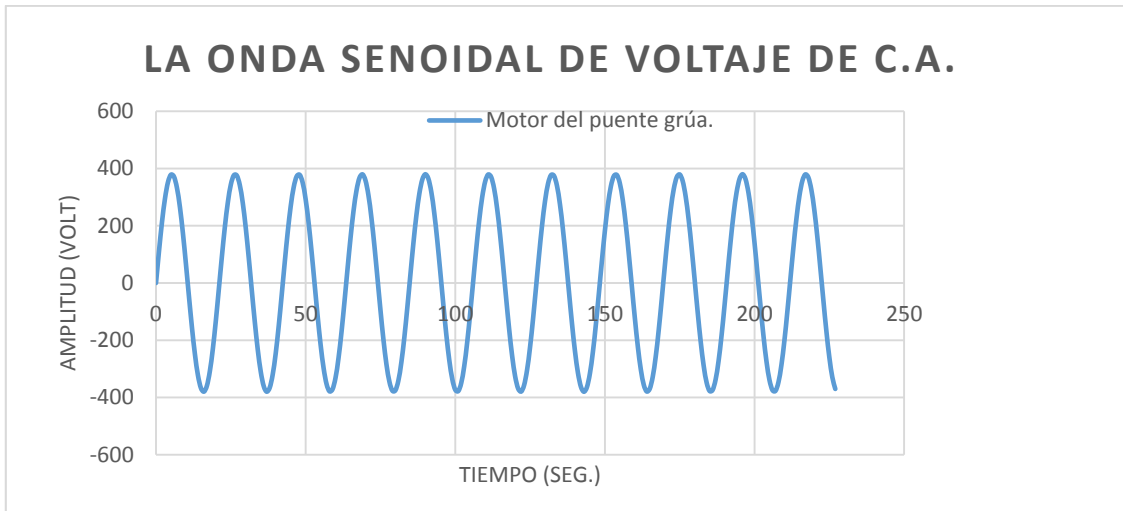
Voltaje máx. del motor.	380.00	V.
Amplitud	380.00	V.
Angulo de fase	90.00	grados.

Tabla N° 30: características dinámicas del motor de puente grúa.

Periodo de vibración (s).	Frecuencia Angular (rad/seg).	Frecuencia Natural (Hz).	Amplitud (V)
( T )	( ω )	( f )	( A )
0.02	376.99	60.00	380.00



Fuente elaboracion propia.

**FIGURA N° 68: Onda senoidal del voltaje motor de corriente alterna.**



Fuente: Elaboración propia.

**3.5.7. DEFINICIÓN DE CARGA PUENTE GRÚA.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>	
<p><b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b></p>		
Prueba :	Definición de carga Puente Grúa.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :	Casa de Máquinas C.H.Machupicchu II Fase.	
Fecha :	24/10/2015	
Observación :		

<b>GENERACIÓN TIEMPO - HISTORIA PUENTE GRÚA</b>				
<b>DATOS DE ENTRADA</b>				
<b>TIPO DE GRÚA :</b>	QD210 / 25 ton - 12.7 m. A3.			
<b>Patron de Carga.</b>	Carga Máxima:	210		ton.
	Carga Mínima:	25		ton.
<b>Espaciamiento:</b>	12.7			m.
<b>Velocidad de Elevación:</b>	Mínima			
	Velocidad:	0.2	2	m/min.
<b>Velocidad de Viaje:</b>				
	Carro de Puente:	1.5	5	m/min.
<b>Altura de Elevación.</b>	Gancho			
	Principal.	15		m.
<b>DURACIÓN DE LA FUERZA DE PULSO:</b>				
Izaje de carga	11			min.
Recorrido del puente grua	22.5			min.
<b>Tiempo Total</b>	<b>22.5</b>			<b>min.</b>



### 3.5.8. LÍNEAS DE INFLUENCIA EN LA VIGA PRINCIPAL DEL PUNTE GRÚA.

#### a) Objetivo

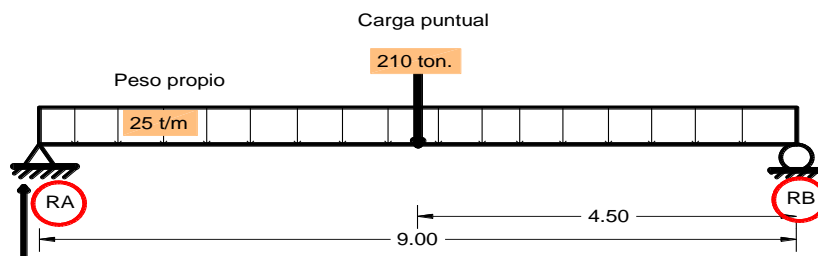
- Definir la posición más crítica del sistema con el uso de líneas de influencia.
- Ubicar las solicitaciones y deformaciones que produce la carga móvil en distintos puntos de aplicación de la misma.

#### b) Instrumentos utilizados en la prueba

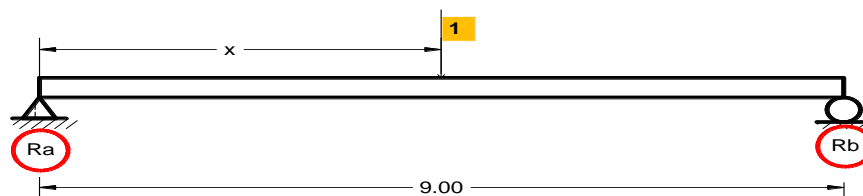
- Hoja electrónica líneas de influencia.

#### c) Procedimiento

La viga principal del puente grúa tiene una longitud de 9 m. es la que soporta el gancho de izaje ubicado a 4.5 m. de los apoyos de la viga principal. Por lo tanto, se considera que soporta una carga muerta producto del peso propio y del conjunto de equipos que carga el carro del puente grúa como el motor, el gancho, etc. Entonces para el análisis de líneas de influencia se representara dicha viga principal como una viga simplemente apoyada.



- La metodología de las líneas de influencia propone sustituir la carga móvil por un valor unitario, de manera que se liberan las cargas aplicadas como el peso propio y la carga concentrada al centro de la viga (a una distancia de 4.5 m). por ecuaciones de estática se obtiene la reacción en A. considerando una distancia "x" desde el apoyo A hasta la ubicación de la carga, que ahora es unitaria.



Cálculo de reacción en el apoyo A, Ra.

$$\sum Ma = 0; \rightarrow Ra * 9 - 1 * (9 - x) = 0;$$

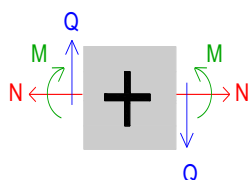
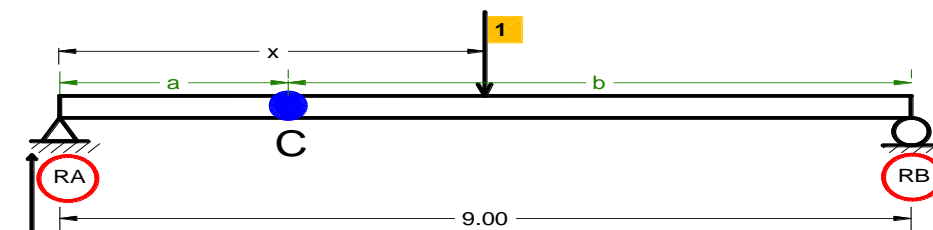
$$\rightarrow Ra = 1 - \frac{x}{9}, \quad \text{para } 0 \leq x \leq b$$

Se calculó también la reacción en el apoyo B; Rb:

$$\sum Mb = 0; \rightarrow Rb * (9) - 1 \text{ ton} * (X) = 0;$$

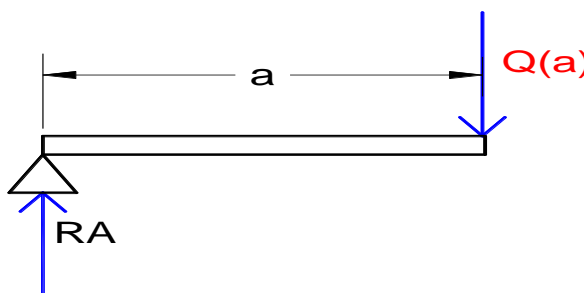
$$\rightarrow Rb = \frac{x}{9}, \quad \text{para } b \leq x \leq L$$

- Se calcularon las fuerzas cortantes (Vc) a lo largo la viga principal, añadiendo una rotula en C. que genera dos secciones, para facilitar los cálculos de las fuerzas Vc (a) y Vc (b).



$$Vc(a) = \begin{cases} \frac{9-x}{9} & \text{para } 0 \leq x \leq b \\ x/9 & \text{para } b \leq x \leq 9 \end{cases}$$

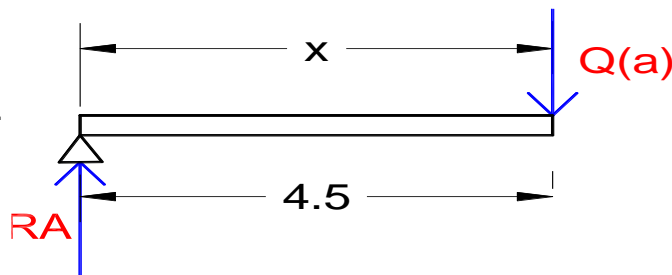
Si :  $0 \leq x \leq b$ ;



$Vc(a) = -x/9$ ;  $x = 0 - 4.5$ .

$Vc(a) = 1-x/9$ ;  $x = 4.5 - 9$ .

Si :  $b \leq x \leq L$

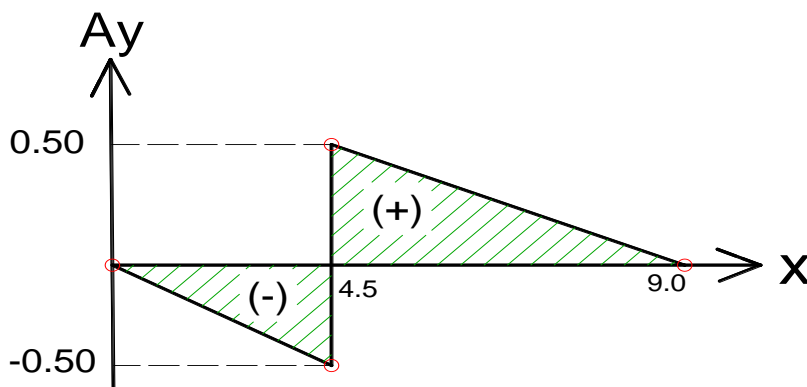


ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

Con estos valores dibujamos la línea de influencia de fuerzas cortantes en C. La fuerza cortante máxima positiva que puede desarrollarse en el punto C de la viga es 0.50.

a=	4.5
b=	4.5
L=	9

X	Qa
0	0.00
1.5	-0.17
4.5	-0.50
6.5	
9	



Calculamos (Vc) para la carga concentrada Peso Propio:

x (posición) =	4.5 m.	y (ordenada)=	0.5
<b>Vc=</b>	210 ton		
<b>Vc =</b>	105 ton		

Calculamos Vc para la carga distribuida:

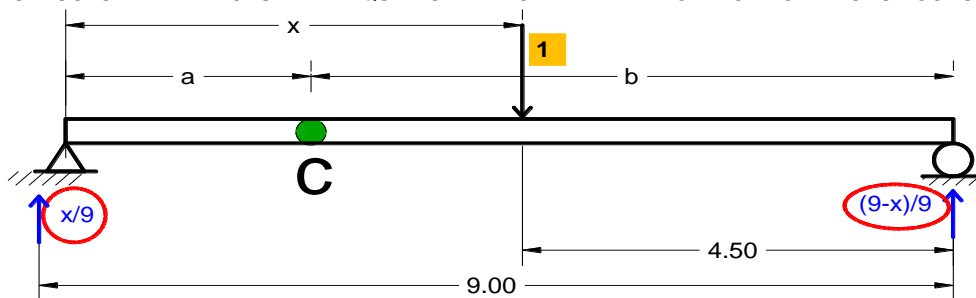
x inicio =	0	x final =	9 m.
<b>Vc=</b>	25 ton		
<b>Vc =</b>	112.5 ton		

La fuerza cortante máxima positiva en C será:

**Vc max = 217.5 ton**

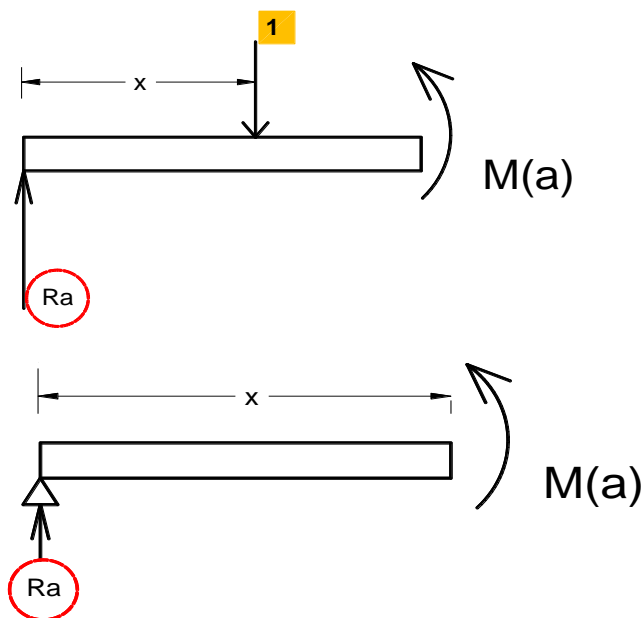
- Se calcularon momentos flectores, añadiendo una rotula en C, donde se aplica un momento positivo con rotación unitaria. se planteó el siguiente diagrama:

ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "



$$M_c = \begin{cases} M(a) = 4.5(1 - x/9) - (4.5 - x) & \text{para } 0 \leq x \leq b \\ M(a) = 4.5 \left(1 - \frac{x}{9}\right) & \text{para } b \leq x \leq 9 \end{cases}$$

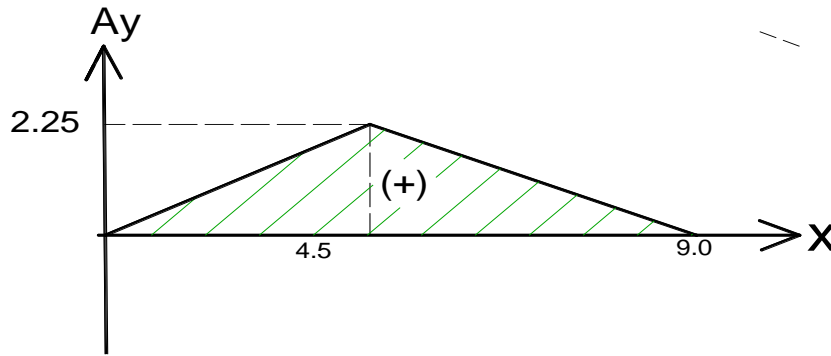
Sección desde '0' hasta 'a'.



$$\begin{aligned} M(a) &= 4.5(1-x/9) - (4.5-x) \\ M(a) &= 0.5x \\ M(a) &= 4.5(1-x/9) \\ M(a) &= 4.5 - 0.5x \end{aligned}$$

Se espera que el máximo momento flector positivo ocurra en el punto C, los desplazamientos verticales de la estructura serán los valores de las ordenadas Y, mientras las abscisas X son cada punto de la longitud de 9 m. de la viga principal.



a=	4.5	X	Ma	Mb
b=	4.5	0	0	
L=	9	1.5	0.75	
		4.5	2.25	2.25
		6.5		1.25
		9		0



<b>Calculamos Ma para la carga concentrada:</b>	La fuerza concentrada de 210 ton situada en X= 4.5 m, tiene una ordenada de 2.25 para producir un momento máximo Ma, por lo tanto:
<b>Ma=</b> 210 ton	Distancia Total <b>x =</b> 4.5
<b>Ma=</b> 472.5 ton - m	Momento <b>Y =</b> 2.25
<b>Calculamos Ma para la carga distribuida:</b>	La carga distribuida de 25 ton/m colocada sobre la viga entre X=0 y X=9.00 tiene una ordenada máxima de <b>2.25</b> por tanto:
<b>Ma=</b> 25 ton	
El momento flector en C será:	
<b>Momento max = 497.5 ton</b>	

d).- Toma de datos

Tabla N° 31: Líneas de Influencia

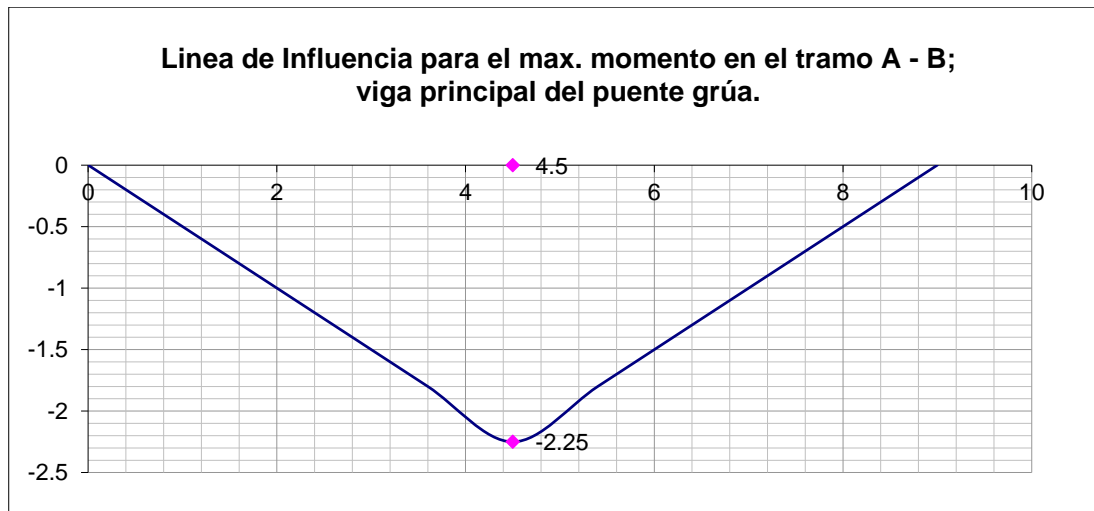
	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>			
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>			
	PRUEBA: Cálculo de Líneas de Influencia.			
LUGAR :	CASA DE MAQUINAS CH. MACHUPICCHU.			
FECHA :	10/07/2015			
OBSERVACIÓN :				
Parámetro	Momento Flector.	X-global	Fuerza Cortante	X-global
Maximo Valor:	2.25	4.50	0.50	4.50
Minimo Valor:	0.00	9.00	-0.50	9.00
Area Positiva :	0.00	0.00	0.00	0.00
Area Negativa :	-10.13	0.00	0.00	0.00
Area Total :	-10.13	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.

ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

Se graficó el diagrama de momentos flectores de la viga principal con carga móvil en la posición 4.50. El máximo momento está en 4.5 m. con un momento flector de 2.25.

**FIGURA N° 69:** Línea de Influencia para el máximo momento en el tramo A - B; viga principal del puente grúa.



Fuente: (DAVID CHILDS, 2010), Influence Lines.

### 3.5.9. LÍNEAS DE INFLUENCIA EN LA VIGA CARRILERA.

#### a) Objetivo

- Definir la posición más crítica del sistema con el uso de líneas de influencia para una viga continua.
- Ubicar las solicitaciones y deformaciones que produce la carga móvil en distintos puntos de aplicación de la misma.

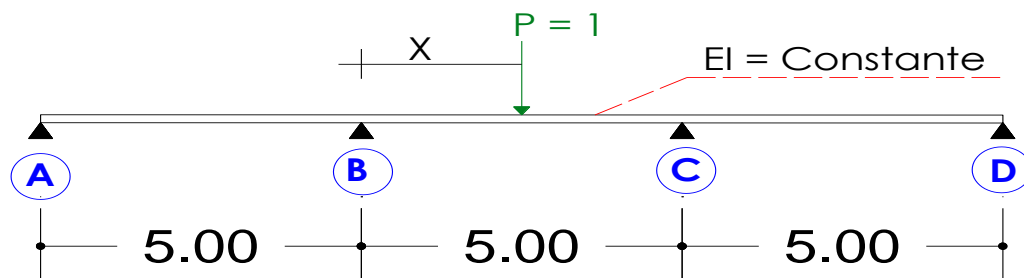
#### b) Instrumentos utilizados en la prueba

- Hoja electrónica líneas de influencia para vigas con tramos continuos.

#### c) Procedimiento

El puente grúa se desplaza en dirección **X**, recorre una distancia total de 15 m. La construcción de líneas de influencia es más compleja para el caso de la viga carrilera al tratarse de una viga continua de 3 tramos cada uno de 5 m. para dar

solución a las líneas de influencia se requiere convertir una estructura indeterminada a una estáticamente determinada.



Tramo No.	1	2	3
Tramo Longitud:	5	5	5

Basándonos en el método de las fuerzas, se seguirán los siguientes pasos para resolver las líneas de influencia:

1.- Se calculara el grado de indeterminación de la viga carrilera, con el uso de las siguientes fórmulas:

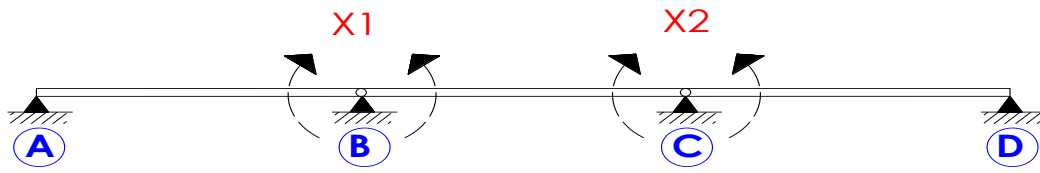
Elemento	Grado de Hiperestaticidad	Grado de Libertad	Grado de Indeterminación
<b>VIGAS</b>	$GH = NR - REE$ $GH = 8 - 3 = 5$	$GL = NN - REE$ $GL = 4 - 8 = - 4.$	$GI = REE - NN$ $GI = 3 - 5 = -2$

$GH > 0$  Estructuras hiperestáticas.

$GH = 0$  Estructuras Isostáticas.

$GH < 0$  Estructuras Inestables.

2.- Es posible convertir la estructura indeterminada a una estáticamente determinada, eliminando los apoyos interiores, para impedir que cada nodo de la estructura se desplace, se considerarán empotrado.



El grado de indeterminación es equivalente al número de reacciones liberadas. Para la viga en estudio se determinó el grado de indeterminación cinemática;  $GI = 2$ . Lo que determina 2 liberaciones en los apoyos internos correspondientes con  $x(1)$ ,  $x(2)$ .

3.- Se determinó el coeficiente de flexibilidad ( $\delta$ );

Esta constante representa la deflexión del tramo, está en función de la longitud de la viga, del módulo de Young del material.

$$\delta_{11} = \frac{(L1 + L2)}{3EI}$$

$$\delta_{22} = \frac{(L2 + L3)}{3EI}$$

$$\delta_{12} = \frac{(L2)}{6EI} = \delta_{21}$$

Donde;

$L_i$  = luz del tramo "i".

$E$  = Modulo de elasticidad del material.

$I$  = inercia.

Se construyó la matriz de flexibilidad, basándonos en el teorema de Maxwell, de desplazamientos recíprocos, la matriz es simétrica y se cumple;  $\delta_{12} = \delta_{21}$ , siendo necesario encontrar  $\delta_{11}$ ,  $\delta_{22}$ ,  $\delta_{33}$ .



$$D = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{13} & \delta_{33} \end{bmatrix}$$

Donde;  $\delta_{11}$  = deformación en un punto.

Matriz de flexibilidad planteada para la viga continua de 3 tramos

$$D = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.333 & 0.833 \\ 0.833 & 3.333 \end{bmatrix}$$

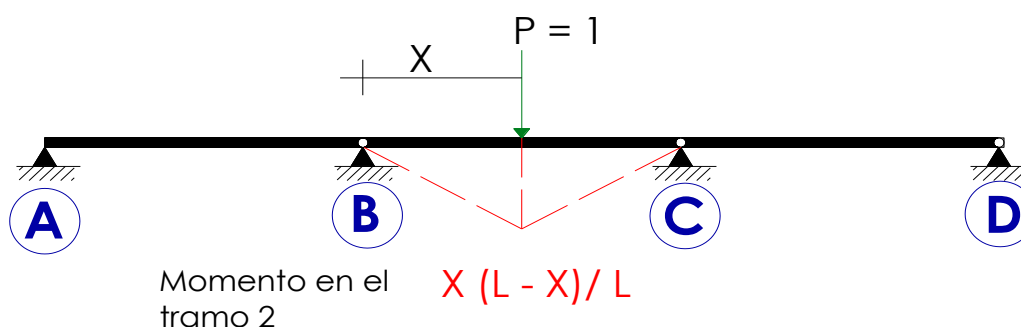
- Lo siguiente es calcular las deflexiones de la viga en las secciones en las que se eliminaron las reacciones redundantes, las que ahora se presentan como cargas sobre la viga.

El cálculo de las deflexiones considera que se aplican a la viga isostática cargas unitarias en las secciones B, C y la carga original, los que se pueden expresar como la superposición de las  $(n+1)$  componentes de los desplazamientos; uno para la carga aplicada en la posición de estudio y "n" para el conjunto de "n" redundantes.

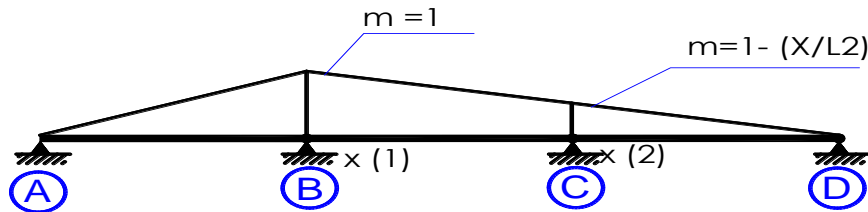
Para el cálculo de momentos flectores, se aplicará el principio de superposición, el que consiste en descomponer el problema inicial de cálculo de vigas en casos más simples, que sumados o "superpuestos" son equivalentes al problema original.

El método de las áreas y momentos para el cálculo de las deflexiones, es función directa de las deformaciones unitarias que sufra donde el perfil deformado se obtiene sumando los efectos de las deformaciones unitarias.

- a).- Se idealizará una carga unitaria en el tramo 2, que representa la ubicación de la carga en la viga original, a una distancia de 2.5 m. del apoyo.



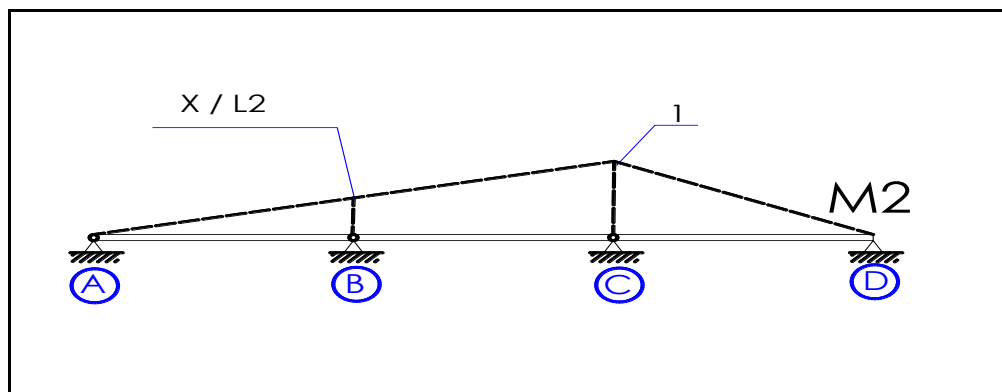
b).- Si el momento en B es igual a 1; debido a la acción de cargas redundantes en  $x(1)$ , realizando ecuaciones de estática se resuelve que el momento en



Elaboración propia

Se denota la causa del desplazamiento que son la carga y las fuerzas redundantes correspondientes a las liberaciones.

c).- Si el momento en  $x(2)$  es  $M_c = 1$ ; debido a la acción de la fuerza redundante, muestra que el momento en el apoyo  $x(1) = x / L_2$ .



Elaboración propia.

Por último, la superposición de los desplazamientos da por resultado un conjunto de "n" ecuaciones que expresan la existencia de desplazamiento en cada condición de liberación.

Se calculó el valor de desplazamiento relativo  $\Delta_1$  y  $\Delta_2$ , en  $x(1)$  y  $x(2)$ .

$[\Delta_p]$ Desplazamientos	$\Delta_1$	$\Delta_2$
	-1.5625	-1.5625

- La ecuación para el cálculo de las redundantes X(1) y X(2):

$$[f][X] = -[\Delta 1]$$

Donde (f) es una matriz cuadrada de flexibilidades, X un vector de fuerzas redundantes y  $\Delta 1$  un vector de desplazamientos causados por los momentos unitarios en las redundantes de la estructura primaria.

Según la ecuación canónica del método de fuerzas.

$$X = -f^{-1} * \Delta p$$

Redundantes	X1	X2
	-0.375	-0.375

Al conocer las fuerzas redundantes, se hallaron las tensiones y deformaciones en cada apoyo, como si se tratara del caso de una estructura estáticamente determinada.

Se construyó el diagrama de momentos flectores M1 y V1. Despejando las formulas a continuación:

$$M = M (1) * X (1) + M (2) X (2) + M_p$$

$$V = V (1) * X (1) + V (2) * X(2) + V_p$$

**M, V** = fuerzas en el elemento.

**M (1), M (2)** = Momento flexionante sobre la redundante "n" debido a la acción de una fuerza unitaria aplicada.

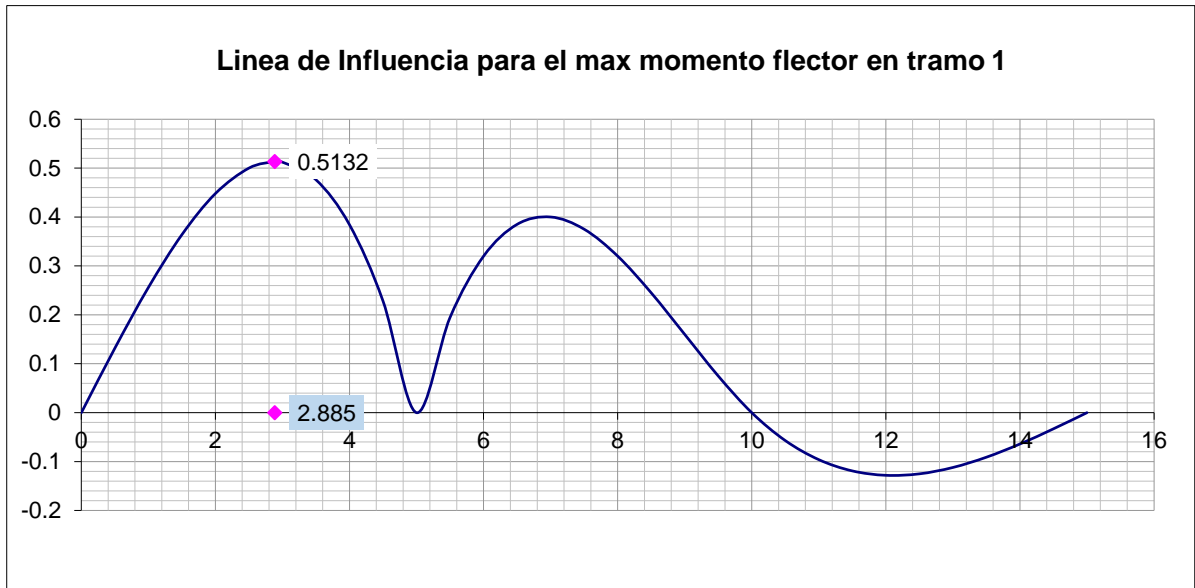
**X (1), X (2)** = Valor de la redundante.

**M<sub>p</sub>** = Momento debido a la carga real en la estructura primaria.

ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

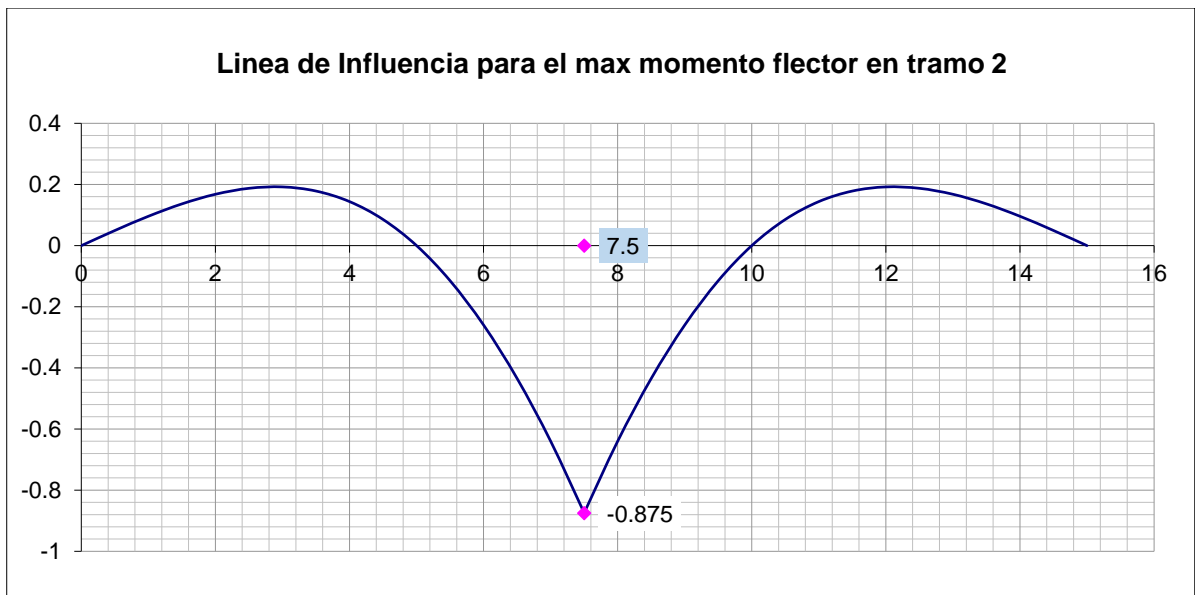
Las líneas de influencia el carro del puente grúa que se mueve a lo largo de la viga donde el momento flexionante, y la fuerza de la carga P, una manera de solucionar es mediante el cálculo de momentos para cada punto en muchas posiciones.

FIGURA N° 70: Líneas de influencia para tramo 1.



Fuente: (DAVID CHILDS, 2010), Influence Lines.

FIGURA N° 71: líneas de influencia tramo 2.

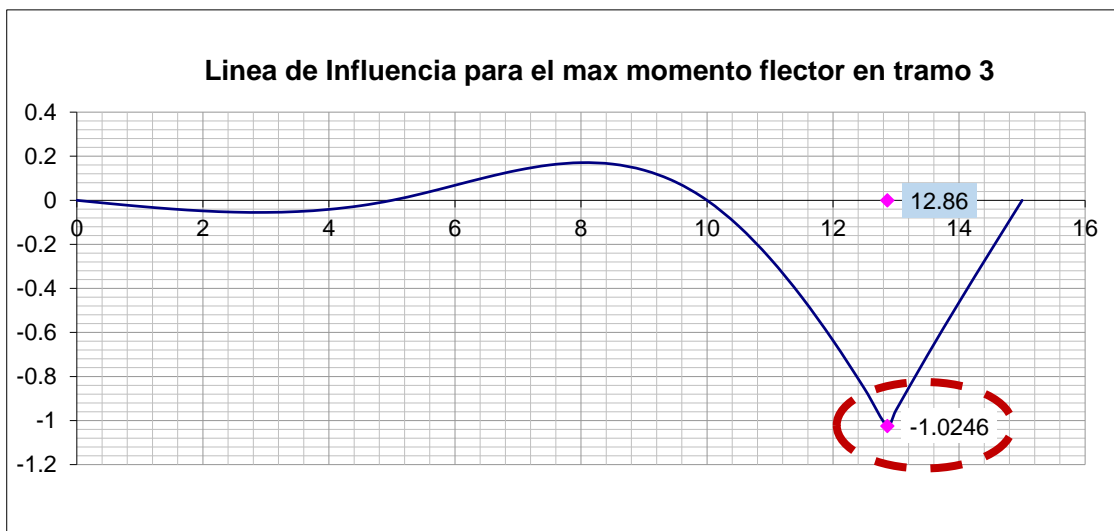


Fuente: (DAVID CHILDS, 2010), Influence Lines.

- La condición más crítica en la viga carrilera para el recorrido del puente grúa se ubica a 12.06 m. con una carga de 1.0246

La línea de influencia de una acción correspondiente en un punto determinado de una viga, es un diagrama trazado a lo largo de la viga cuya ordenada en un punto cualquiera es igual al valor de la acción en el punto determinado.

FIGURA N° 72: Líneas de influencia tramo 3.



Fuente: (DAVID CHILDS, 2010), Influence Lines.

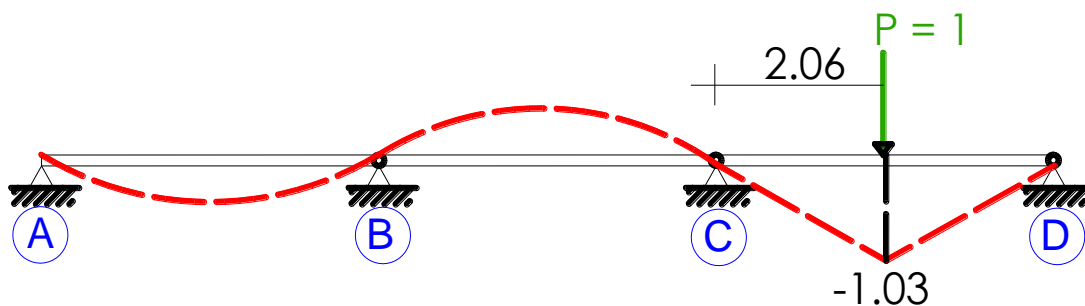
c).- Toma de datos.

Tabla N° 32: Líneas de influencia en la viga carrilera.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>			
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>			
	PRUEBA: Cálculo de Líneas de Influencia.			
Lugar :	CASA DE MAQUINAS CH. MACHUPICCHU.			
Fecha :	10 / 07 / 2015.			
Observación :				
<b>TRAMO 3 - DIST: 2.06 M.</b>	<b>Momento</b>	<b>X-global</b>	<b>Cortante</b>	<b>X-global</b>
Maximo Valor:	1.02	2.14	0.48	2.14
Minimo Valor:	-0.17	7.00	-0.52	2.14
Area Positiva :	2.53	0.00	0.68	0.00
Area Negativa :	-0.53	0.00	-0.82	0.00
Area Total :	2.00	0.00	-0.14	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Se ha determinado la posición del máximo momento flector ocurre en el tramo 3 para una distancia específica de 2.06 m. desde el inicio del apoyo.



### 3.5.11. PARÁMETROS VIBRACIÓN SÍSMICA

#### a).- Objetivo

- Identificar la aceleración del terreno de fundación donde la onda sísmica se propaga.
- Identificar los parámetros más relevantes para evaluar la fuerza sísmica o espectro de diseño.

#### b).- Instrumentos utilizados en la prueba

- Hoja electrónica del espectro de demanda sísmica.

#### c).- Procedimiento

Obtención de la aceleración espectral aplicando la norma técnica E - 030, reconocimiento de parámetros de sitio:

- **Zonificación (Z):** Este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad. Zonificación propuesta para Perú: Machupicchu pertenece a la ciudad de Cusco, por lo que le corresponde la zona 2.

Tabla I: Factores de Zona.

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

- **Condiciones geotécnicas (S):** de acuerdo con las propiedades mecánicas del suelo, espesor del estrato, el periodo fundamental de vibración y la velocidad de propagación de las ondas de corte.

Según el informe presentado a EGEMSA S.A del reconocimiento realizado a nivel de geología y geotecnia: las rocas predominantes son la Granodiorita; de textura néisica milonítica por deformación, cuarzo – monzonita y Microdiorita; de color gris oscuro, encontrándose en ella granos de cuarzo, vetillas de cuarzo

lechoso, presencia de pirita diseminada en menor escala. La Granodiorita se presenta como diques de color blanquecino, la presencia de agua en el hastial izquierdo por perforaciones para pernos de sostenimiento de 8 m. nos indica fallas en una distancia máxima de hasta 8 m del hastial por donde circula el agua subterránea. Presenta xenolitos de microdiorita, presencia de óxidos y filtraciones de agua por goteo entre las fracturas y fallas. El contacto es definido entre la Microdiorita y el dique Granodiorítico, donde este último se presenta de forma ascendente con un ángulo de inclinación superior a los 35°. El tipo de roca está definido como tipo I, II, III, para los fines de esta investigación se definió entonces como:

**Perfil tipo S1:** Roca o suelos muy rígidos; Dadas las condiciones corresponde a un suelo rígido – roca; donde el periodo fundamental para vibraciones de baja amplitud no excede de 0.25 s, se incluye una roca sana o parcialmente alterada con una resistencia a la compresión no confinada mayor o igual que 500 Kpa.

Tabla III: Factor de Suelo "S".

Zona \ Suelo	So	S1	S2	S3
Z4	0.80	1.00	1.05	1.10
Z3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z1	0.80	1.00	1.60	2.00

Tabla IV.- Periodos Tp y Tl.

Perfil del Suelo			
Tipo	Descripción	Tp (s)	Tl (s)
So	Roca o Suelos muy Rígidos.	0.3	3
S1	Suelos Intermedios.	0.4	2.5
S2	Suelos Blandos.	0.6	2
S3	Condiciones Excepcionales	1	1.6

Fuente: norma sismoresistente E 030 - 2016.

- **Factor de amplificación sísmica (C);** indica un factor de amplificación de la respuesta estructural respecto a las aceleraciones del suelo.

El factor de amplificación sísmica, C, se define por las siguientes expresiones:

1.-  $T < T_p$ ;       $C = 2.5$ .





2.-  $T_p < T < T_I$ ;  $C = 2.5 * (T_p / T)$ .

3.-  $T > T_I$ ;  $C = 2.5 * (T_p * T_I / T^2)$

C = coeficiente de amplificaion sismica.

T = Periodo.

Tp = Periodo que define la plataforma del factor "C".

Tl = Periodo de la zona del factor "c" con desplazamiento constante.

Y corresponde a la amplificación dinámica de la aceleración en la base. Su valor máximo se limita 2.5. El factor - Tp es un periodo ligado el tipo de terreno que varía entre 0.3 a 1 para suelos rígidos y flexibles, respectivamente. El factor t es el periodo fundamental del edificio.

• **Categoría de la edificación (U);**

Se identifica como una estructura esencial pues su función no debería interrumpirse inmediatamente después que ocurra un sismo, como lo es la central hidroeléctrica.

Tabla III: Categoría de la Edificación.

Categoría de la Edif.	Descripción	Factor U
A2	Edificaciones Esenciales	1.5
B	Edificaciones Importantes	1.3
C	Edificaciones de Uso Común	1
D	Edificaciones menores	*

Fuente: norma sismoresistente E 030.

• **Factor de reducción;**

Está determinado por la configuración estructural que clasifica si la estructura es regular o irregular. El sistema estructural está determinado por los materiales de construcción usados y sistema estructural.



Tabla VII.- Sistema Estructural

Sistema Estructural	Coficiente Básico de Reducción
<b>Acero</b>	<b>R</b>
Pórticos dúctiles con uniones resistentes a momentos.	9.5
<b>Otras Estructuras de Acero</b>	
Arriostres Excéntricos	6.5
Arriostres Concéntricos	6
<b>Concreto Armado</b>	<b>R</b>
Pórticos	8
<b>Dual</b>	<b>7</b>
De Muros Estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada	3
Madera (Por esfuerzos admisibles)	7

Fuente: Norma sismoresistente E030

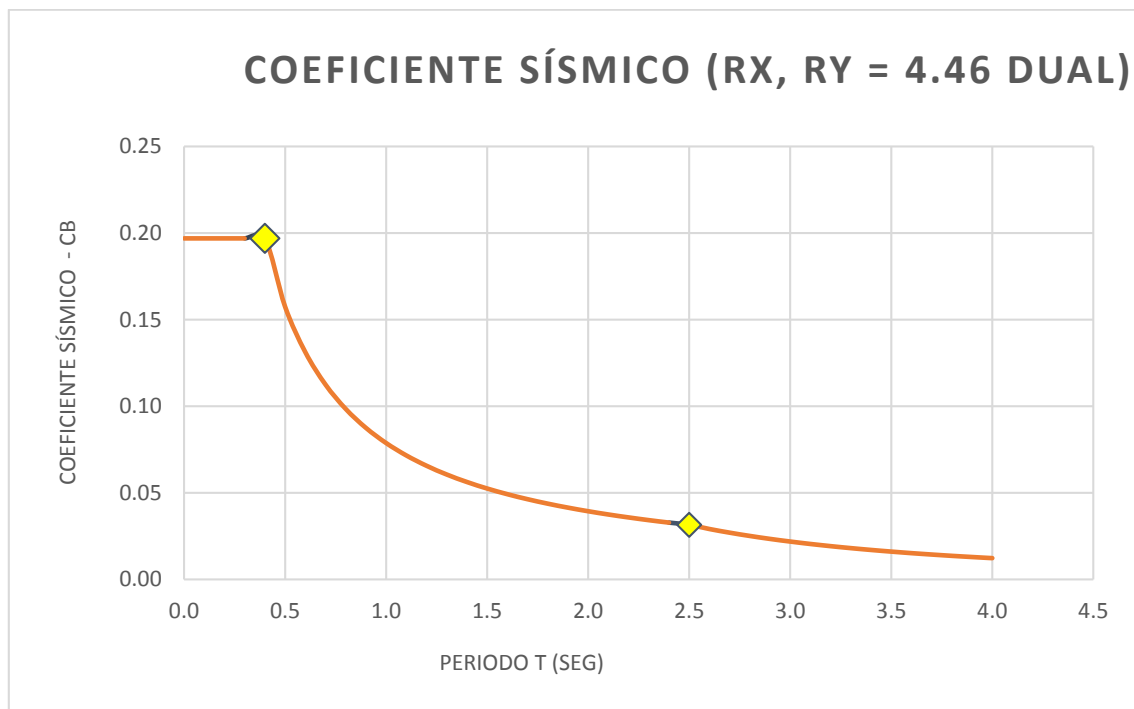
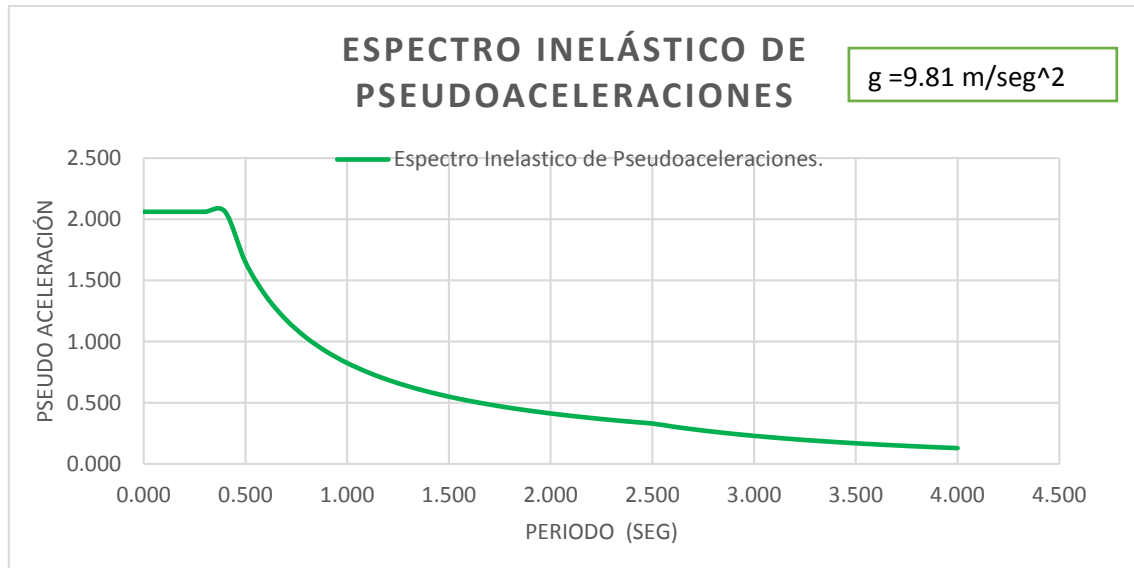
Comprobada la irregularidad el factor de reducción para sistemas estructurales de muros estructurales queda afectado por el factor de  $R = R_o * I_a * I_p$ .

TABLA N° 33: Cuadro resumen parámetros de sitio.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Reconocimiento de las Condiciones de Sitio.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :	C.H.Machupicchu II Fase.	
Fecha :	12/11/2015	
Observación :		

Parámetro	Valor
Zona sísmica 3	Z 0.25
Coficiente de uso	U 1.59
Coficiente de sitio - suelo intermedio	S1 1.00
	Tp (s) 0.40
	Tl (s) 2.50
	C 2.50
Coficiente de Reducción	R 4.76
	Ro 7.00
	Ia 0.80
	Ip 0.85

FIGURA N° 73: Espectro de Pseudo - aceleraciones.



Fuente: Elaboración propia.



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

T (seg.)	(ZUCS/R).
0.000	0.197
0.041	0.197
0.045	0.197
0.050	0.197
0.055	0.197
0.060	0.197
0.064	0.197
0.070	0.197
0.074	0.197
0.079	0.197
0.084	0.197
0.100	0.197
0.200	0.197
0.300	0.197
0.400	0.197
0.500	0.158
0.600	0.131
0.700	0.113
0.800	0.098
0.900	0.088
1.000	0.079
1.100	0.072
1.200	0.066
1.300	0.061
1.400	0.056
1.500	0.053
1.600	0.049
1.700	0.046
1.800	0.044
1.900	0.041
2.000	0.039
2.100	0.038
2.200	0.036
2.300	0.034
2.400	0.033
2.500	0.032
2.600	0.029



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

T (seg.)	(ZUCS/R).
2.700	0.027
2.800	0.025
2.900	0.023
3.000	0.022
3.100	0.020
3.200	0.019
3.300	0.018
3.400	0.017
3.500	0.016
3.600	0.015
3.700	0.014
3.800	0.014
3.900	0.013
4.000	0.012

Tabla N° 34: Irregularidad estructural

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de irregularidad estructural.	
Autor :	Elaboración propia.	

**IRREGULARIDAD ESTRUCTURAL EN ALTURA**

Irregularidad de Rigidez - Piso Blando

Nro Piso	Dirección de Análisis	Dirección X		
		Deriva de entrepiso	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.4 * Deriva (i+1)	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.25 * Promedio Deriva (i+3)
1°	X	0.00052	REGULAR	REGULAR
	Y	0.000225	REGULAR	REGULAR
2°	X	0.000959	REGULAR	IRREGULAR
	Y	0.000202	REGULAR	REGULAR
3°	X	0.00084	REGULAR	REGULAR
	Y	0.000209	REGULAR	REGULAR
4°	X	0.001532		
	Y	0.00046		
<b>REGULAR</b>				

Irregularidad de Rigidez - Piso Débil.

Dirección X			Dirección Y		
Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	VERIFICACIÓN Fuerza Cortante (i) < 80 % * Fuerza Cortante(i+1)	Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	VERIFICACIÓN Fuerza Cortante (i) < 80 % * Fuerza Cortante(i+1)
1°	3820.01	IRREGULAR	1°	2966.50	IRREGULAR
2°	5224.71	REGULAR	2°	4642.39	REGULAR
3°	2727.52	REGULAR	3°	2727.22	REGULAR
4°	1463.25	REGULAR	4°	1463.46	REGULAR
<b>Ia = 0.75</b>					

Irregularidad Extrema de Rigidez.

Dirección X				
Nro Piso	Dirección de Análisis	Deriva de entrepiso	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.6 * Deriva (i+1)	VERIFICACIÓN Deriva (i) > 1.4 * Promedio Deriva (i+3)
1°	X	0.00052	REGULAR	REGULAR
	Y	0.00023	REGULAR	REGULAR
2°	X	0.00096	REGULAR	REGULAR
	Y	0.00020	REGULAR	REGULAR
3°	X	0.00084	REGULAR	REGULAR
	Y	0.00021	REGULAR	REGULAR
4°	X	0.00153	REGULAR	REGULAR
	Y	0.00046	REGULAR	REGULAR
<b>REGULAR</b>				

**Irregularidad Extrema de Resistencia.**

Dirección X			Dirección Y		
Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	VERIFICACIÓN Fuerza Cortante (i) < 65 % * Fuerza Cortante(i+1)	Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	VERIFICACIÓN Fuerza Cortante (i) < 65 % * Fuerza Cortante(i+1)
1°	3820.01	REGULAR	1°	2966.50	REGULAR
2°	5224.71	REGULAR	2°	4642.39	REGULAR
3°	2727.52	REGULAR	3°	2727.22	REGULAR
4°	1463.25	REGULAR	4°	1463.46	REGULAR
REGULAR			REGULAR		

**Irregularidad de Masa o Peso.**

Dirección X		
Nro Piso	Peso (Ton.)	VERIFICACIÓN Peso (i) > 1.5 * Peso (i+1)
1°	1054.93	REGULAR
2°	1312.02	REGULAR
3°	1161.83	REGULAR
4°	1117.05	
REGULAR		

**Irregularidad Geométrica Vertical**

Nro Piso	Fuerza Cortante (Ton.)	Verificación B2 > 1.3*B1
Dimension piso (i) B1 =	25.00	REGULAR
Dimension piso (i+1) B2 =	33.00	
REGULAR		

**Discontinuidad en Sistemas Resistentes**

Fuerza Cortante en la Base		973.01	
Nro Piso	Elemento	Fuerza Cortante (ton).	Verificación: Fuerza cortante del Elemento >= 10% Cortante del Edificio.
1°	muros	700	IRREGULAR
2°	muros	652	IRREGULAR
3°	muros	306	IRREGULAR
4°	muros	40.12	REGULAR
	columnas	44.46	REGULAR
Ia = 0.80			

**IRREGULARIDAD ESTRUCTURAL EN PLANTA**

**Irregularidad Torsional**

Dirección X		
Nro Piso	Deriva máxima de Piso	Deriva >= 50 % * Deriva de Permisible(0.007)
1°	0.00052	REGULAR
2°	0.00096	REGULAR
3°	0.00084	REGULAR
4°	0.001532	REGULAR
<b>REGULAR</b>		

**Irregularidad de Sistemas no Paralelos**

En ambas direcciones de análisis los elementos resistentes a fuerzas laterales son
<b>REGULAR</b>

**Esquinas Entrantes**

Dirección	Dimension .	Dimension Total.	VERIFICACIÓN area corte < 85%
X	0.20	33.00	REGULAR
Y	13.00	13.00	
<b>NO HAY IRREGULARIDAD.</b>			

**Discontinuidad del Diafragma**

N ° Diafragma	Area con Discontinuidades - m2	Area Total - m2	VERIFICACIÓN Area con discontinuidades > 50% Area Total
1°	200.00	325.00	IRREGULAR
2°	230.00	429.00	IRREGULAR
3°	230.00	429.00	IRREGULAR
4°	230.00	429.00	IRREGULAR
<b>Ip = 0.85</b>			

**Resumen de irregularidad**

c	Tipo	Factor
Irregularidad en Altura. - Ia	Irregularidad de Rigidez - Piso Débil.	0.75
	Discontinuidad en Sistemas Resistentes	0.80
Irregularidad en Planta - Ip	Discontinuidad del Diafragma	0.85
Reducción Sistema Sismoresistente ( R )		<b>7.00</b>
<b>Reducción - Ro</b>		<b>4.46</b>

Fuente: Elaboración propia



### 3.6. PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE DATOS

#### 3.6.1. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DINÁMICOS

##### 3.6.1.1.1. Análisis Periodo Natural; sistema con Vibraciones por Turbina Francis.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Análisis del Periodo Estructural - Matlab.	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 12 / 2015.	
Observación :	Dirección de análisis X.	

Datos de entrada:			
Peso Turbina Hidráulica Francis =	185.00	Ton.	
Aceleración de la gravedad =	9.80	m/sec ^2.	
Masa	18.88	Ton*sec ^2/m.	
Matriz de Masa (Ton*seg^2/m):			
[ M ] =	107.21	0.00	0.00
	0.00	133.48	0.00
	0.00	0.00	136.32
	0.00	0.00	114.00
Matriz de Rigidez (Ton/m):			
[ K ] =	21876467.42	-10996466.55	0.00
	-10996466.55	12347846.85	-1351380.30
	0.00	-1351380.30	19651380.30
	0.00	0.00	-18300000.00
Proceso			
Cálculo Frecuencia Circulares y Periodos			
$[K] \phi - \omega^2 [M] \phi = \{ 0 \}$			
Modo	Frecuencia Circular (w)	Periodos de Vibración (T)	Frecuencia Natural (f)
	(rad/seg).	(seg).	(seg^-1)
	(1)	(2)=2*pi/(1)	(3)=1/(2)
1	57.224	0.110	0.017
2	75.701	0.083	0.013
3	92.400	0.068	0.011
4	110.231	0.057	0.009
Modos de vibración por piso $\phi_{ij}$			
$\phi_{ij} = [ a_{ij} ]$			
[ a <sub>ij</sub> ] =	0.65	-0.56	0.20
	-0.71	-0.47	0.39
	0.27	0.68	0.71
	-0.01	-0.04	-0.55
$\phi_{ij} = [ a_{nm} ]$			
[ a <sub>nm</sub> ] =	-0.01	-0.04	-0.55
			0.68

**Modos normalizados al último piso:**

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \phi_{41} \end{Bmatrix}, \omega_1 \quad \phi_2 = \begin{Bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \\ \phi_{32} \\ \phi_{42} \end{Bmatrix}, \omega_2 \quad \phi_3 = \begin{Bmatrix} \phi_{13} \\ \phi_{23} \\ \phi_{33} \\ \phi_{43} \end{Bmatrix}, \omega_3 ; \phi_4 = \begin{Bmatrix} \phi_{14} \\ \phi_{24} \\ \phi_{34} \\ \phi_{44} \end{Bmatrix}, \omega_4$$

		Modo de Vibración $\phi_{ij} = a_{ij} / a_{nm}$			
N ro Piso		I	II	III	IV
1°		-0.01	12.6	-0.36	0.2
2°		0	10.63	-0.72	0.44
3°		-0.03	-15.23	-1.3	0.97
4°		1	1	1	1

**COMPROBACIÓN DE LA ORTOGONALIDAD**

Respecto a la Masa

$$\phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n m * a_{ij}^2}} \quad \phi_4 \begin{Bmatrix} \phi_{14} \\ \phi_{24} \\ \phi_{34} \\ \phi_{44} \end{Bmatrix}$$

[M] =	107.62	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	71285.96	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	522.82	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	335.41	0.00

Respecto a la Rigidez

[K] =	84713.94	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	189538395.09	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	7406076.67	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	11362977.00	0.00

**Modos normalizados a la masa**

0.00	0.05	-0.02	0.01
0.00	0.04	-0.03	0.02
0.00	-0.06	-0.06	0.05
0.10	0.00	0.04	0.05

**Comprobación de la ortonormalidad**

$$\phi^T M \phi = I$$

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

**Comentario:**

Se observa que el parámetro - Período fundamental de vibración, debido a la relación que este guarda con factores intrínsecos como la rigidez elástica y la masa. Se ha considerado; incluir en el factor de masa propia de la estructura la masa atribuida por la turbina hidráulica Francis.

Definido como el tiempo que tarda la estructura en recorrer un ciclo de vibración libre, el periodo de vibración también representa la vibración que ocurre después que finaliza la excitación por Turbina Hidráulica Francis, o particularmente en este caso, donde las operaciones de la turbina son continuas, entonces después que esta fuente deja de variar y se mantiene constante.

Para el primer modo refleja un valor 0.1 seg. magnitud acorde con las características de rigidez de la estructura. A partir de dicho modo el periodo fundamental decrece de manera conjunta con la participación de masas. Se puede establecer que según las características físicas de la estructura esta es altamente rígida correspondiente a un periodo corto.

Por último, basándonos, en que el periodo fundamental " T " de la estructura nos permite expresar la capacidad de la estructura para "reaccionar" frente a la carga impuesta se considera una respuesta de tipo estática, pues la duración de la carga se mantiene más allá del periodo fundamental.

3.6.1.1.2. Análisis Periodo Natural; Sistema con Vibración por Puente Grúa.

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>	
<p><b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b></p>		
Prueba :	Análisis del Periodo Estructural - Matlab.	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 12 / 2015.	
Observación: Dirección de análisis. X		

<b>Datos de entrada:</b>				
Peso del Puente Grúa =	294.00	Ton.		
Aceleración de la gravedad =	9.80	m/sec ^2.		
Masa =	30.00	Ton*sec ^2/m.		
<b>Matriz de Masa (Ton):</b>				
[ M ] =	107.21	0.00	0.00	0.00
	0.00	133.48	0.00	0.00
	0.00	0.00	117.44	0.00
	0.00	0.00	0.00	144.00
<b>Matriz de Rigidez (Ton/m):</b>				
[ K ] =	21876467.42	-10996466.55	0.00	0.00
	-10996466.55	12347846.85	-1351380.30	0.00
	0.00	-1351380.30	19651380.30	-18300000.00
	0.00	0.00	-18300000.00	18300000.00
<b>Proceso</b>				
<b>Cálculo Frecuencia Circulares y Periodos</b>				
$[K] \phi = \omega^2 [M] \phi = \{ 0 \}$				
	<b>Frecuencia Circular (w)</b>	<b>Periodos de Vibración (T)</b>	<b>Frecuencia Natural ( f )</b>	
<b>Modo</b>	(rad/seg).	(seg).	(seg^-1)	
	(1)	(2)=2*pi/(1)	(3)=1/(2)	
1	46.542	0.135	0.021	
2	72.221	0.087	0.014	
3	96.664	0.065	0.010	
4	108.706	0.058	0.009	
<b>Modos de vibración por piso <math>\phi_{ij}</math></b>				
$\phi_{ij} = [ a_{ij} ]$				
[ a <sub>ij</sub> ] =	-0.59	0.67	0.32	0.05
	0.74	0.32	0.62	0.10
	-0.33	-0.67	0.60	0.12
	0.01	0.06	-0.40	0.99
$\phi_{ij} = [ a_{nm} ]$				
[ a <sub>nm</sub> ] =	0.01	0.06	-0.40	0.99

**Modos normalizados al último piso:  $\phi_{ij}$**

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \phi_{41} \end{Bmatrix}, \omega_1 \quad \phi_2 = \begin{Bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \\ \phi_{32} \\ \phi_{42} \end{Bmatrix}, \omega_2 \quad \phi_3 = \begin{Bmatrix} \phi_{13} \\ \phi_{23} \\ \phi_{33} \\ \phi_{43} \end{Bmatrix}, \omega_3 ; \phi_4 = \begin{Bmatrix} \phi_{14} \\ \phi_{24} \\ \phi_{34} \\ \phi_{44} \end{Bmatrix}, \omega_4$$

N ro Piso	Modo de Vibración $\phi_{ij} = a_{ij} / a_{nm}$			
	I	II	III	IV
1°	-0.025	11.316	-0.786	0.046
2°	0.020	5.437	-1.545	0.101
3°	-0.044	-11.339	-1.490	0.126
4°	1.000	1.000	1.000	1.000

**COMPROBACIÓN DE LA ORTOGONALIDAD**

Respecto a la Masa

$$\phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n m * a_{ij}^2}} \quad \phi_4 \begin{Bmatrix} \phi_{14} \\ \phi_{24} \\ \phi_{34} \\ \phi_{44} \end{Bmatrix}$$

[M] =

107.854	0.000	0.000	0.000
0.000	40499.117	0.000	0.000
0.000	0.000	807.370	0.000
0.000	0.000	0.000	148.017

Respecto a la Rigidez

[K] =

80408.262	0.000	0.000	0.000
0.000	125778073.259	0.000	0.000
0.000	0.000	14418918.329	0.000
0.000	0.000	0.000	5235348.106

**Modos normalizados a la masa**

-0.002	0.056	-0.028	0.004
0.002	0.027	-0.054	0.008
-0.004	-0.056	-0.052	0.010
0.096	0.005	0.035	0.082

**Comprobación de la ortonormalidad**

$$\phi^T M \phi = I$$


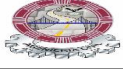
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

**Comentario:**

El periodo estructural de un sistema de 4 grados de libertad ante vibraciones por puente grúa, a diferencia del caso anterior estudiado en el apartado 3.6.1.1, el factor con respecto a la masa se enfatiza en el cuarto nivel, debido a la masa que impone la estructura del puente grúa que es mayor a diferencia del resto de niveles, si se compara con el de la turbina Francis. Por lo tanto, se genera un periodo fundamental ligeramente mayor.

De acuerdo con la definición de este parámetro, después que actúa la carga del puente grúa sobre el sistema, este se quedará oscilando por un espacio de tiempo igual a 0.135. Además, el tiempo en que se introduce la carga es considerado más largo con respecto al periodo fundamental estructural, entonces se considera que la carga que se aplicó es de tipo estático y genera la máxima respuesta una vez que la magnitud de carga se vuelve constante.

**3.6.1.1.3. Análisis del Periodo Natural de la estructura con vibración Sísmica.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Análisis del Periodo Estructural - Matlab.	
Autor :	Alexandra Cabrera Glandeli.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 12 / 2015.	
Observación :	Dirección de Análisis X.	

<b>Matriz de Masa (Ton*seg<sup>2</sup>/m):</b>				
[ M ]=	107.21	0.00	0.00	0.00
	0.00	133.48	0.00	0.00
	0.00	0.00	117.44	0.00
	0.00	0.00	0.00	114.00
<b>Matriz de Rigidez (Ton/m):</b>				
[ K ]=	21876467.42	-10996466.55	0.00	0.00
	-10996466.55	12347846.85	-1351380.30	0.00
	0.00	-1351380.30	19651380.30	-18300000.00
	0.00	0.00	-18300000.00	18300000.00
<b>Proceso</b>				
Cálculo:				
<b>Periodos Estructurales del sistema en vibración Sísmica.</b>				
$M\ddot{x}(t) + kx(t) = \{0\}$		$[K] \phi - \omega^2[M] \phi = \{0\}$		
Modo	Frecuencia Circular (w)	Periodos de Vibración (T)		Frecuencia Natural ( f )
	(rad/seg).	(seg).		(seg <sup>-1</sup> )
	( 1 )	(2) = 2*pi/(1)		(3) = 1/(2)
1	59.275	0.106		0.017
2	80.554	0.078		0.012
3	108.706	0.058		0.009
4	124.914	0.050		0.008

**Modos de vibración por piso:  $\phi_{ij}$**

$$\phi_{ij} = [a_{ij}]$$

$$[a_{ij}] = \begin{vmatrix} 0.59 & -0.67 & 0.31 & 0.15 \\ -0.74 & -0.32 & 0.60 & 0.33 \\ 0.33 & 0.67 & 0.55 & 0.38 \\ -0.02 & -0.06 & -0.49 & 0.85 \end{vmatrix}$$

$$\phi_{ij} = [a_{nm}]$$

$$[a_{nm}] = \begin{vmatrix} -0.02 & -0.06 & -0.49 & 0.85 \end{vmatrix}$$


---

**Modos normalizados al último piso:  $\phi_{ij}$**

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \phi_{31} \\ \phi_{41} \end{Bmatrix}, \omega_1 \quad \phi_2 = \begin{Bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \\ \phi_{32} \\ \phi_{42} \end{Bmatrix}, \omega_2 \quad \phi_3 = \begin{Bmatrix} \phi_{13} \\ \phi_{23} \\ \phi_{33} \\ \phi_{43} \end{Bmatrix}, \omega_3 \quad \phi_4 = \begin{Bmatrix} \phi_{14} \\ \phi_{24} \\ \phi_{34} \\ \phi_{44} \end{Bmatrix}, \omega_4$$

Modo de Vibración		$\phi_{ij} = a_{ij} / a_{nm}$			
N ro Piso		I	II	III	IV
1°		-0.03	10.64	-0.63	0.18
2°		0.00	5.07	-1.22	0.38
3°		-0.05	-10.69	-1.11	0.45
4°		1.00	1.00	1.00	1.00

**COMPROBACIÓN DE LA ORTOGONALIDAD**

Respecto a la Masa

$$\phi_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n m * a_{ij}^2}} \quad \phi_4 \begin{Bmatrix} \phi_{14} \\ \phi_{24} \\ \phi_{34} \\ \phi_{44} \end{Bmatrix}$$

$$[M] = \begin{vmatrix} 107.829 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 35868.622 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 526.837 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 164.870 \end{vmatrix}$$


---

Respecto a la Rigidez

$$[K] = \begin{vmatrix} 96464.617 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 117495948.482 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 9414764.373 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 5831706.231 \end{vmatrix}$$


---

**Modos normalizados a la masa**

$$\begin{vmatrix} -0.002 & 0.056 & -0.028 & 0.014 \\ 0.000 & 0.027 & -0.053 & 0.030 \\ -0.004 & -0.056 & -0.048 & 0.035 \\ 0.096 & 0.005 & 0.044 & 0.078 \end{vmatrix}$$


---

**Comprobación de la ortonormalidad**

$$\phi^T M \phi = I$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$



**Comentario:**

Se ha calculado los periodos fundamentales y la frecuencia natural del sistema, bajo la acción de vibraciones sísmicas, para los 4 grados de libertad, dando como resultado valores que coinciden con los correspondientes de la vibración libre del sistema, pues los parámetros de masa y de rigidez no varían.

La propiedad dinámica del periodo fundamental de la estructura no se ve afectada ante las vibraciones sísmicas, las que han sido evaluadas teniendo en cuenta que las fuerzas que infringe dicha sollicitación son equivalentes al peso de la estructura.

Por lo tanto, los factores de masa y rigidez no se afectan como en los casos estudiados anteriormente.

Dada la incertidumbre de la acción sísmica, en cuanto al tiempo de duración, no es posible identificar la reacción de la estructura ante esta acción, expresada a través de los periodos naturales de vibración. Pero se puede asumir que la estructura podría no ser susceptible a los efectos dinámicos, debido a la gran rigidez que aportan los elementos resistentes, adopta un periodo fundamental corto, lo cual determina que es menos sensible a las variaciones de cargas en el tiempo a diferencia de las excitaciones anteriormente estudiadas.

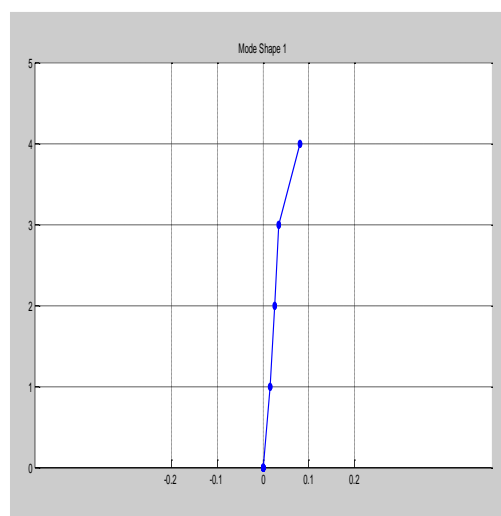
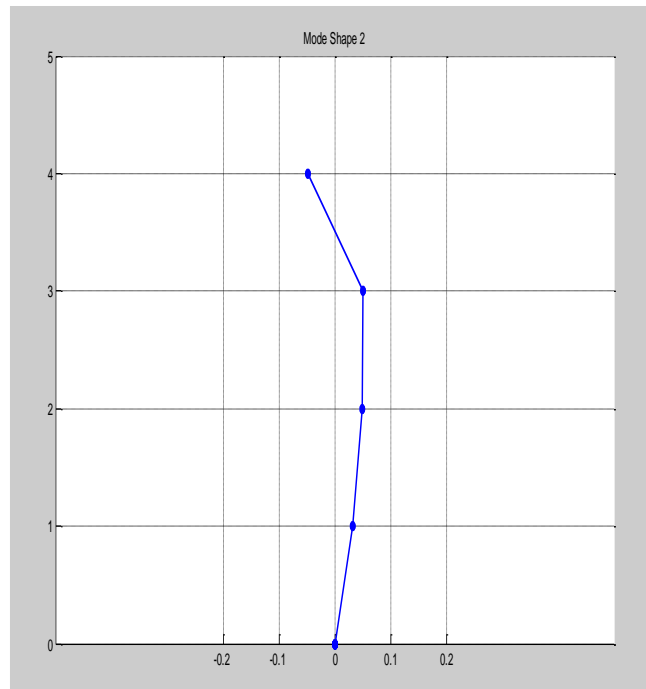
**MODOS DE VIBRACIÓN - POR EL MÉTODO DE VECTORES PROPIOS****FIGURA N° 74: Modo de vibración 1****MODO DE  
VIBRACIÓN  
N°1****Fuente: Resultados Matlab.**

FIGURA N° 75: Modo de vibración 2

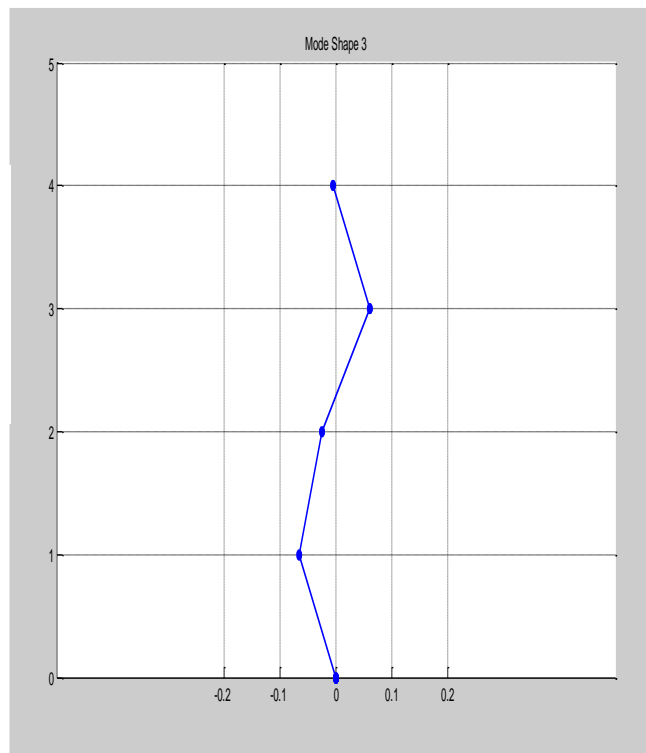
MODO DE VIBRACIÓN N°2



Fuente: Resultados Matlab.

FIGURA N° 76: Modo de vibración 3

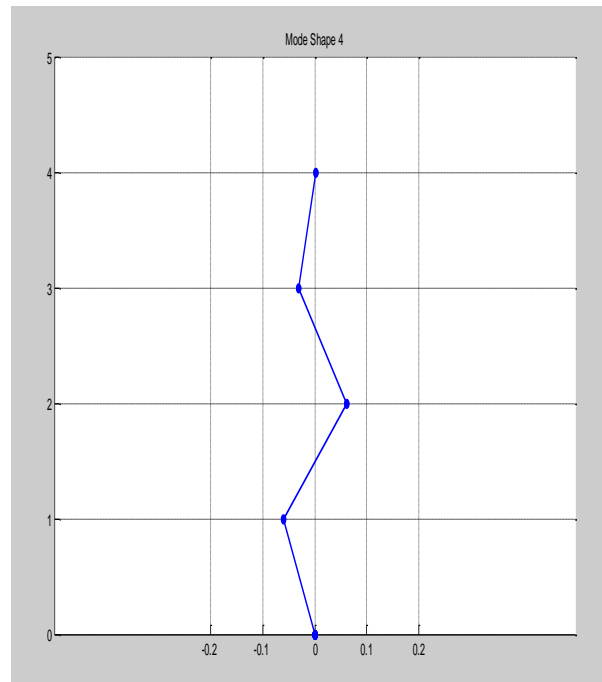
MODO DE VIBRACIÓN N°3



Fuente: Resultados Matlab

FIGURA N° 77: Modo de vibración 4

**MODO DE  
VIBRACIÓN  
N°4**



**Fuente: Resultados Matlab**

**Comentario:**

La forma que adopta cada modo de vibración no varía a pesar que se han evaluado diferentes fuentes de excitación, mas no ocurre lo mismo si se evalúan en términos de amplitud, pues estos se incrementan o disminuyen, pero a pesar de ello conservan la misma forma de desplazamiento para los tres casos analizados de vibraciones inducidas para el sistema estructural.

3.6.1.2. ANÁLISIS DEL AMORTIGUAMIENTO DEL SISTEMA.

3.6.1.2.1. Análisis del Amortiguamiento Proporcional del Sistema con Vibración por Turbina Francis.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO	
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA.	
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.		
Prueba :	Cálculo del Amortiguamiento proporcional Rayleigh.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :	Casa de Máquinas C.H. Machupicchu II Fase.	
Fecha :	12 - 01 - 2016.	
Observación :	Dirección de análisis en X.	

**Datos de entrada:**

**Frecuencia Circular del Sistema con Vibración por Turbina Francis.**

N° PISO	Masa (M)	Rigidez (K)	Frecuencia circular- (w)
	Ton-m/seg <sup>2</sup> .	K - Ton/m	rad/sec
1°	107.21	1614497.48	57.22
2°	133.48	1632846.94	75.70
3°	117.44	1632846.94	92.40
4°	114.00	163000.00	110.23

**Procedimiento**

Según el método del amortiguamiento Proporcional Rayleigh

$$C = \alpha * M + \beta * K$$

Donde:  
 C = amortiguamiento.  
 $\alpha$  = coeficiente proporcional a la masa.  
 M= masa del sistema.  
 K= rigidez del sistema  
 $\beta$  = coeficiente proporcional a la rigidez.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 * \frac{\omega_m * \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_m^2} * \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -1 & 1 \\ \omega_n & \omega_m \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix}$$

$\omega_m * \omega_n$	$\sqrt{\omega_n^2 - \omega_m^2}$	$\xi$ -Ratio de amortiguamiento (asumido)
5287.48	2807.07	0.05
6307.87	3613.22	0.05

Cálculo de los coeficientes alpha y beta:

alpha	$\alpha =$	<b>3.534</b> seg.
beta	$\beta =$	<b>0.0007</b> seg <sup>-1</sup> .

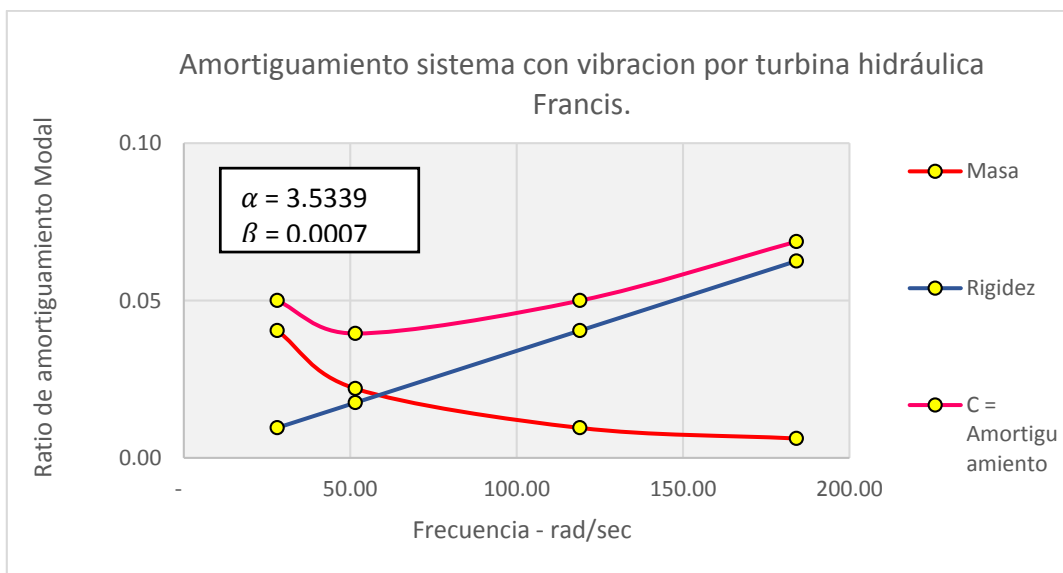
Tabla N° 35: Amortiguamiento Proporcional Rayleigh Sistema con Vibración por Turbina Hidráulica Francis.

Frecuencia Natural (w)	PROPORCIONAL A LA MASA		
	Ratio de amortiguamiento	Masa	Aporte de Masa
rad/sec	$\alpha / 2^{*}(1)$	Ton* sec ^2/m.	
$\omega(1)$	$\alpha(2)$	$M(3)$	$(4)=(\alpha)^{*}(3)$
57.22	0.031	107.54	380.03
75.70	0.023	133.74	472.62
92.40	0.019	163.33	577.18
110.23	0.016	113.87	402.40

PROPORCIONAL A LA RIGIDEZ			C = Amortiguamiento
Ratio de amortiguamiento	Rigidez	Aporte de Rigidez	
$\beta / 2^{*}(1)$	Ton/m.		
$\beta(5)$	$R(6)$	$(7)=(\beta)^{*}(6)$	$(8)=(4)+(7)$
0.019	1088010.49	727.16	1107.195
0.025	1351380.03	903.19	1375.803
0.031	1351380.03	903.19	1480.362
0.037	180386.56	120.56	522.960

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 78: Amortiguamiento Proporcional con Vibración por Turbina Francis.



Fuente: Elaboración propia.

**Comentario:**

Teóricamente, la evaluación de la respuesta dinámica de un sistema elástico, estará asociada a una importante característica dinámica de la estructura, la capacidad de disipación de energía a través de fuerzas que se describen en forma genérica como fuerzas de fricción o de "amortiguamiento" ante la acción de las vibraciones por turbina Francis.

En la figura N°76, se describe el ratio de amortiguamiento en función de la frecuencia circular, este ratio es importante pues busca identificar el nivel de amortiguamiento en función del tipo de estructura y de los materiales que constituyen un sistema que determinan la reacción ante la liberación de energía, en función si la energía regresa al material o si esta energía es transmitida.

El número de modos de vibración analizados para un sistema con vibración por Turbina Francis es igual a 4.

Se muestra el amortiguamiento total, la masa y la rigidez proporcional. Para los modos 1 y 3 con 5% de ratio de amortiguamiento, el modo 2 muestra menos de 5% de ratio de amortiguamiento y el modo 4 tendrá más del 5 % de dicho parámetro, lo que nos muestra que mientras el amortiguamiento proporcional a la rigidez se incrementa linealmente con la frecuencia circular. El amortiguamiento proporcional a la masa decrece con respecto a la frecuencia circular. Por lo tanto, el amortiguamiento del sistema está gobernado por la rigidez que aportan los elementos estructurales en los 4 modos de vibración evaluados.

**3.6.1.2.2. Análisis del Amortiguamiento Proporcional del Sistema con Vibración por Punteo Grúa.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUNTEO GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo del Amortiguamiento proporcional Rayleigh.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :	Casa de Máquinas C.H. Machupicchu II Fase.	
Fecha :	12 - 01 - 2016.	
Dirección de análisis X.		

**Datos de entrada:**

**Frecuencia Circular del Sistema con Vibración por Punteo Grúa.**

N° PISO	Masa (M)	Rigidez (K)	Frecuencia circular- (w)
	Ton-m/seg <sup>2</sup> .	Kx - Ton/m	rad/sec
1°	107.21	1614497.48	46.54
2°	133.48	1632846.94	72.22
3°	117.44	1632846.94	96.66
4°	114.00	163000.00	108.71

**Procedimiento**

Según el método del amortiguamiento Proporcional Rayleigh

$$C = \alpha * M + \beta * K$$

Donde:  
 C = amortiguamiento.  
 $\alpha$  = coeficiente proporcional a la masa.  
 M= masa del sistema.  
 K= rigidez del sistema  
 $\beta$  = coeficiente proporcional a la rigidez.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 * \frac{\omega_m * \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_m^2} * \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -1 & 1 \\ \omega_n & \omega_m \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix}$$

$\omega_m * \omega_n$	$\omega_n^2 - \omega_m^2$	Ratio de amortiguamiento (asumido)
4498.96	4128.20	0.05
5059.39	2472.91	0.05

Cálculo de los coeficientes alpha y beta:

alpha	$\alpha = 2.934$	seg.
beta	$\beta = 0.0007$	seg <sup>-1</sup> .

Para el cálculo del ratio de amortiguamiento se usará la siguiente ecuación, de la cual se deduce que al manejar una estructura rígida con frecuencia circular considerable: el valor del primer término es tan pequeño a diferencia del segundo que es el que rige la solución.

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2}$$

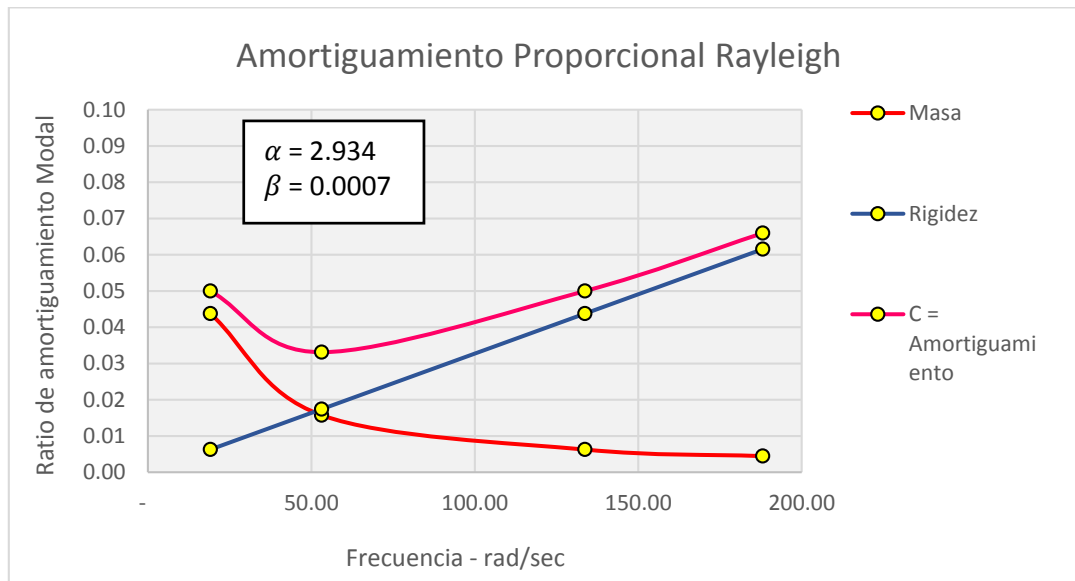
Tabla N° 36: Cálculo de la Amortiguación del Sistema.

Frecuencia Natural (w)	PROPORCIONAL A LA MASA		
	Ratio de amortiguamiento	Masa	Aporte de Masa
rad/sec	alpha / 2*(1)	Ton* sec ^2/m.	
(1)	(2)	(3)	(4)=( alpha )*(3)
46.54	0.03	107.21	314.57
72.22	0.02	133.48	391.66
96.66	0.02	117.44	344.60
108.71	0.01	114.00	334.51

PROPORCIONAL A LA RIGIDEZ			C = Amortiguamiento
Ratio de amortiguamiento	Rigidez	Aporte de Rigidez	
beta / 2*(1)	Ton/m.		
(5)	(6)	(7)=( beta)*(6)	(8)=(4)+(7)
0.02	1614497.48	1052.98	1367.550
0.02	1632846.94	1064.95	1456.610
0.03	1632846.94	1064.95	1409.548
0.04	163000.00	106.31	440.816

Fuente: Elaboración propia.



**FIGURA N° 79: Amortiguamiento Proporcional del Sistema con Vibraciones por Puente Grúa.**

Fuente: Elaboración propia.

#### **Comentario:**

El presente análisis evalúa el amortiguamiento como un parámetro que describe como decaen las oscilaciones después de que actúa la fuerza inducida por la vibración del puente grúa.

Si este se compara con la excitación por turbina Francis, revela que la reacción de los materiales que constituyen el sistema decrece ligeramente ante la excitación por Puente Grúa, basándonos en los niveles del ratio de amortiguamiento registrados.

Se muestra la variación del amortiguamiento total del sistema, Dado que se genera una proporción no lineal corta del ratio de amortiguamiento, (para los primeros modos existe una no linealidad), se puede asumir que el amortiguamiento es proporcional a la frecuencia circular del sistema (a partir del modo 3 sigue un comportamiento lineal), muestra que existe mayor amortiguamiento cuando hay mayor rigidez.



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

Además, igual que para el amortiguamiento del ítem 3.6.1.2.1. Para los modos 1 y 3, el ratio de amortiguamiento = 5%. El modo 2 tendrá menos de 5% de ratio de amortiguamiento y el modo 4 llega a un 7% de ratio de amortiguamiento, entonces para los primeros modos el ratio de amortiguamiento se mantiene de manera conservadora en 5% a partir del tercer modo este parámetro asciende y denota que el sistema en cierta forma logra disipar y adaptarse más a la energía impuesta en los últimos modos de vibración.

**3.6.1.2.1. Análisis del Amortiguamiento Proporcional del Sistema con Vibración Sísmica.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo del Amortiguamiento proporcional Rayleigh.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :	Casa de Máquinas C.H. Machupicchu II Fase.	
Fecha :	12 - 01 - 2016.	
Observación : Dirección de análisis X.		

**Datos de entrada:**

**Frecuencia Circular del Sistema con Vibración Sísmica.**

N° PISO	Masa (M)	Rigidez (K)	Frecuencia circular- (w)
	Ton-m/seg <sup>2</sup> .	Kx - Ton/m	rad/sec
1°	107.21	1,614,497.48	59.28
2°	133.48	1,632,846.94	80.55
3°	117.44	1,632,846.94	108.71
4°	114.00	163,000.00	124.91

**Procedimiento**

Según el método del amortiguamiento Proporcional Rayleigh

$$C = \alpha * M + \beta * K$$

Donde:  
 C = amortiguamiento.  
 $\alpha$  = *coeficiente proporcional a la masa.*  
 M= masa del sistema.  
 K= rigidez del sistema  
 $\beta$  = *coeficiente proporcional a la rigidez.*

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 * \frac{\omega_m * \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_m^2} * \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -1 & 1 \\ \omega_n & \omega_m \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix}$$

$\omega_m * \omega_n$	$\omega_n^2 - \omega_m^2$	Ratio de amortiguamiento (asumido)
6443.56	5328.02	0.05
7404.33	3786.65	0.05

Cálculo de los coeficientes alpha y beta:

<b>alpha =</b>	3.836 seg.
<b>beta =</b>	0.0006 seg <sup>-1</sup> .

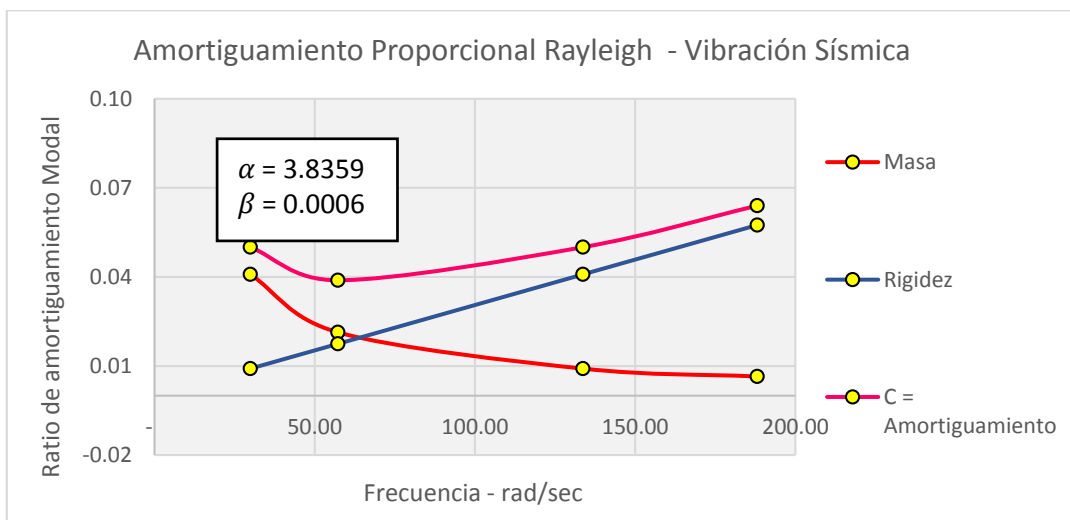
Tabla N° 37: Amortiguamiento Proporcional Rayleigh Sistema con Vibración Sísmica.

Frecuencia Natural ( $\omega$ )	PROPORCIONAL A LA MASA		
	Ratio de amortiguamiento	Masa	Aporte de Masa
rad/sec	$\alpha / 2*(1)$	Ton* sec ^2/m.	
(1)	(2)	(3)	(4)=( $\alpha$ )*(3)
59.28	0.03	107.54	412.50
80.55	0.02	133.74	513.03
108.71	0.02	118.43	454.30
124.91	0.02	113.87	436.79

PROPORCIONAL A LA RIGIDEZ			C = Amortiguamiento
Ratio de amortiguamiento	Rigidez	Aporte de Rigidez	
$\beta / 2*(1)$	Ton/m.		
(5)	(6)	(7)=( $\beta$ )*(6)	(8)=(4)+(7)
0.02	1088010.49	647.70	1060.197
0.02	1351380.03	804.48	1317.509
0.03	1351380.03	804.48	1258.781
0.04	180386.56	107.39	544.171

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 80: Amortiguamiento proporcional - Vibración Sísmica.



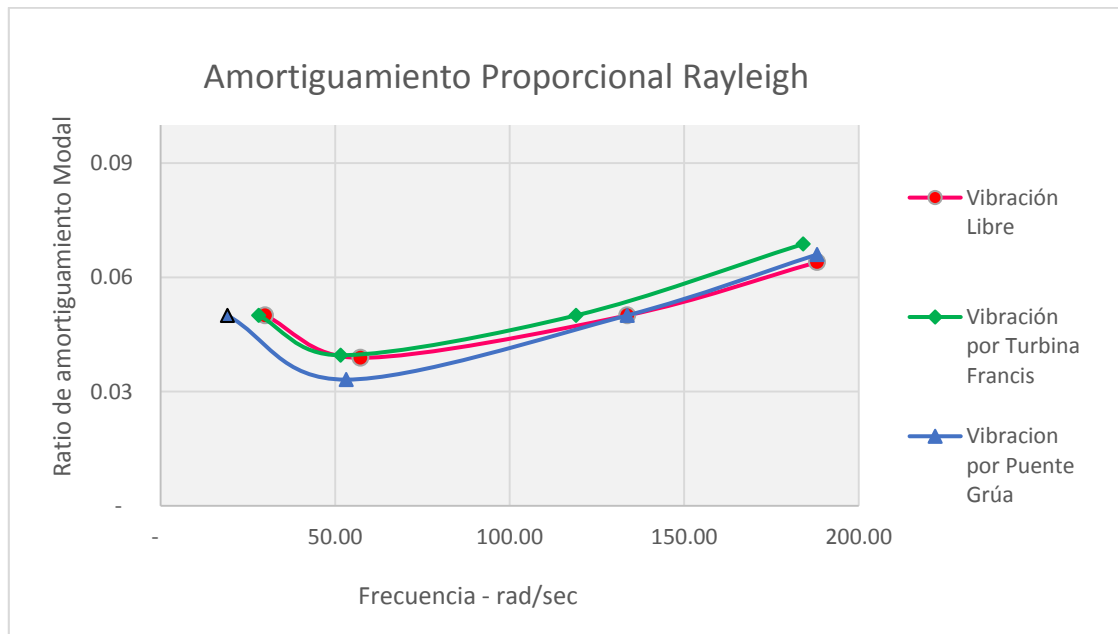
Fuente: Elaboración propia.

**Comentario:**

Teniendo en cuenta que el parámetro del Ratio de Amortiguamiento expresa el nivel de amortiguamiento en un sistema, el gráfico muestra que ante las vibraciones sísmicas en el sistema genera una proporción lineal de este parámetro respecto a la frecuencia natural del sistema.

Se observa la variación de amortiguamiento total. Para la primera porción (el rango de frecuencia entre 29 – 57 rad/seg). La curva muestra una marcada no linealidad a diferencia de los siguientes modos que tendrán una variación lineal.

En los modos 1 y 3 el ratio de amortiguamiento es 5%, el modo 2 tendrá menos de 5% de ratio de amortiguamiento y los modos 4 y 5 tendrán más del 5% de amortiguamiento, mientras el amortiguamiento proporcional a la rigidez, se incrementa linealmente con la frecuencia, el amortiguamiento proporcional a la masa empieza con un valor pico a partir del cual va decreciendo con forme avanzan las frecuencias circulares.

**Resumen valores de amortiguamiento****FIGURA N° 81: Amortiguamiento ante Vibraciones Evaluadas.**

Fuente: Elaboración propia.

**Comentario:**

Se muestra el amortiguamiento total, la masa y la rigidez proporcional para un sistema en el que se aplican 3 vibraciones diferentes sea por Turbina Francis, Puente Grúa y vibraciones Sísmicas. Basándonos en la ecuación de la frecuencia circular de un sistema cualquiera ( $w = k/m$ ) y la figura N° 79, se puede inferir que cuando la participación de masa disminuye se presentan modos de vibración con valores más altos de frecuencia circular, esta misma se incrementa con forme avanzan los grados de libertad del sistema. La participación de la rigidez se incrementa de forma lineal con el incremento de los modos y es la que genera más aporte al amortiguamiento de la estructura, situación que ha sido observada para los distintos casos analizados de vibraciones inducidas en el sistema.

Se analiza una estructura muy rígida, por lo tanto los valores de frecuencia circular son altos, se mostrará en un principio la no linealidad de las propiedades de amortiguamiento con respecto a la frecuencia circular del sistema, esta relación a partir del tercer modo de vibración cambia y se muestra una relación lineal proporcional. Ante los 3 casos de carga los valores de ratio de amortiguamiento inician con 5% y se mantienen con valores semejantes con respecto a la variación de frecuencias circulares, siendo la vibración por puente grúa que muestra un ligero desfase inferior en cuanto a valores de amortiguamiento.



### 3.6.1.3. Análisis del Factor de Amplificación

1. Se calculó la Amplificación Dinámica definido como: la relación existente entre frecuencia de una excitación externa con la frecuencia circular de un sistema de un grado de libertad ( $r$ ), definido por la ecuación:

$$Rd = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$

2. Se calculó la Frecuencia de excitación  $\bar{w}$ ; Es la frecuencia (rad/seg.) asociada a una acción exterior actuante sobre el sistema en estudio, en un problema de vibraciones forzadas debidas a fuentes diferentes.
3. Si  $\omega$  es la frecuencia natural del sistema y la de excitación, a la relación entre ambas frecuencias se le llama "r".

**Razón de frecuencias**

$$r = \frac{\bar{w} \text{ Ext}}{w \text{ nat}}$$

4. Se definió la relación amortiguamiento modal de la estructura sugerido por (CHOPRA, 2014) con un valor de 0.05 para estructuras de concreto armado.

Tabla N° 38: Cálculo del factor de amplificación del sistema



	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo del Factor De Amplificación Dinámica.	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :	C.H.Machupicchu II Fase.	
Fecha :	12/02/2016	
Observación :	Dirección de análisis X.	

Tabla N° 39: Cálculo del factor de amplificación del sistema en vibración por Turbina Hidráulica Francis.

Vibración por Turbina Hidráulica Francis. $\bar{\omega}_{ex} = 47.12 \text{ rad/seg.}$				
Frecuencia de Excitación. ( $\bar{\omega}$ ) rad/seg.	Frecuencia del Sistema. (W)- rad/seg.	Relación de frecuencias (r = )	Ratio de Amortiguamiento ( $\xi =$ )	Factor de Amplificación (Rd )
47.12	110.23	0.43	0.05	1.22
47.12	92.40	0.51	0.05	1.35
47.12	75.70	0.62	0.05	1.62
47.00	57.22	0.82	0.05	2.98

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 40: Cálculo del factor de amplificación del sistema en vibración por Puente grúa.

Vibración por Puente Grúa $\bar{\omega}_{ex} = 60 \text{ rad/seg.}$				
Frecuencia de Excitación. – ( $\bar{\omega}$ ) rad/seg.	Frecuencia del Sistema. – (W) rad/seg.	Relación de frecuencias (r = )	Ratio de Amortiguamiento ( $\xi =$ )	Factor de Amplificación (Rd = )
60.00	108.71	0.55	0.05	1.43
60.00	96.66	0.62	0.05	1.62
60.00	72.22	0.83	0.05	3.12
60.00	46.54	1.29	0.05	1.48

Fuente: Elaboración propia.

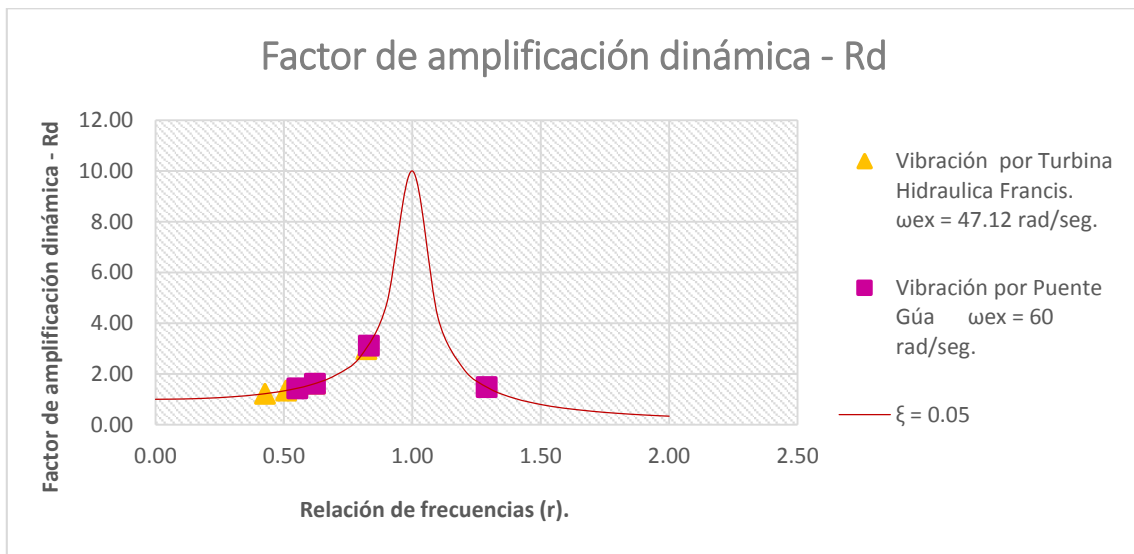


Tabla N° 41: Cálculo del Factor de Amplificación del Sistema en Vibración Sísmica.

Frecuencia Excitación. (Rad/seg)	Frecuencia. Sistema. (Rad/seg)	Relación de frecuencias (r)	Ratio de Amortiguamiento (ξ)	Factor de amplificación (Rd)
0.00	188.00	0.00	0.05	0.00
0.00	133.68	0.00	0.05	0.00
0.00	57.234	0.00	0.05	0.00
0.00	29.91	0.00	0.05	0.00

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 82: Resumen de Factor de Amplificación para casos de Vibraciones Evaluadas.



Fuente: Elaboración propia.

**Comentario:**

El factor de amplificación dinámica se ha calculado para un sistema de concreto armado con 5% de ratio de amortiguamiento.

Se observa para el caso del sistema sometido a Vibraciones por Turbina Francis donde la frecuencia natural del sistema ( $\omega_n$ ), es mayor que la frecuencia de excitación inducida por la vibración de la turbina Francis, se obtiene la relación de frecuencias  $R < 1$ , para los 4 modos evaluados, donde es la rigidez de la estructura que predomina en la respuesta. Cuando el sistema adopta una frecuencia circular alta, predominante del 1° al 4° modo de vibración, el factor de amplificación toma valores que entran en un rango entre 1.22 -2.98), el factor de



amplificación se aleja notablemente del valor unitario con valores más alejados de la condición de resonancia.

Para el caso del sistema con vibraciones por puente grúa, los valores de la relación de frecuencias correspondientes del 1° al 3° modo de vibración, muestran valores de  $r < 1$ . Por otro lado, para el 4° modo de vibración, el valor de la relación de frecuencias muestran valores de  $r > 1$ , para este modo el aporte de masa es el que predomina en la respuesta. Dichos valores son dispersos, pero en ningún caso llegan a ser iguales a 1, por lo tanto se descarta algún caso de resonancia.

Para el caso de vibraciones sísmicas no se ha obtenido un factor de amplificación al no contar con el factor determinante, que es la frecuencia de excitación sísmicas, la que solo puede ser extraída una vez que ocurre el sismo.

3.6.1.4. Análisis Cambio de Ángulo de Fase

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.		
Prueba :	Cálculo del Ángulo de Fase	
Autor :	Elaboración propia.	
Lugar :	C.H.Machupicchu. II Fase.	
Fecha :	25-02-2016.	
Observación :		

Datos de entrada:

$$\phi_p = \tan^{-1}\left(\frac{2 * r * \xi}{1 - r^2}\right)$$

$$0 < \phi_p < \pi$$

$\phi_p$  = Ángulo de fase.

r = Relación de frecuencias excitación y del sistema.

$\xi$  = Fracción de amortiguamiento; C/ Cr.

Tabla N° 42: Cambio de Ángulo de Fase ante Vibración por Turbina Francis.

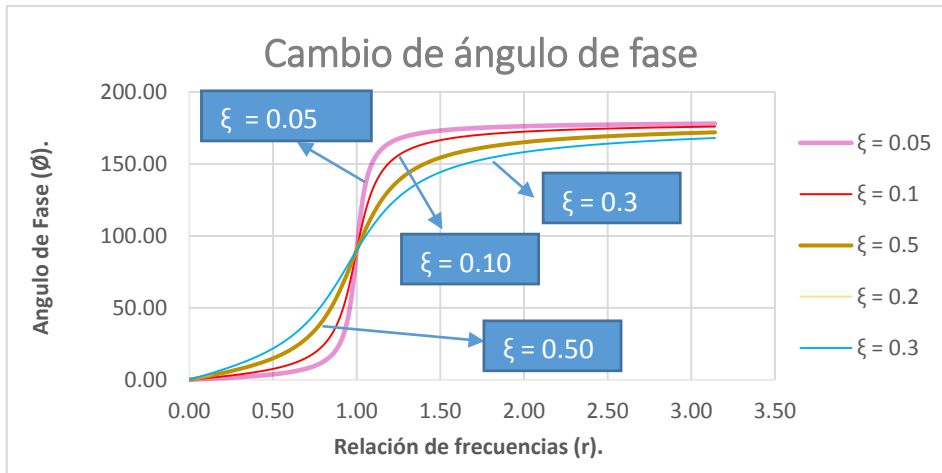
Vibración por Turbina Francis $\bar{w}_{ex} = 47.12 \text{ rad/seg.}$				
Frec Exc. $\bar{w}$ rad/seg.	Frec. Sist w rad/seg.	Relación de frecuencias	Ratio de Amortiguamiento	Cambio de Fase
47.00	57.224	0.82	0.05	14.17
47.00	75.701	0.62	0.05	5.77
47.00	92.400	0.51	0.05	3.93
47.00	110.231	0.43	0.05	2.99

Tabla N° 43: Cambio de Ángulo de Fase ante Vibración por Puente Grúa.

Vibración por Puente Grúa $\bar{w}_{ex} = 60 \text{ rad/seg.}$				
Frec Exc. $\bar{w}$ Rad/seg.	Frec. Sist W Rad/seg.	Relación de frecuencias	Ratio de Amortiguamiento	Cambio de Fase Rd
60.00	108.71	0.55	0.05	4.54
60.00	96.66	0.62	0.05	5.88
60.00	72.22	0.83	0.05	15.01
60.00	46.54	1.29	0.05	100.21

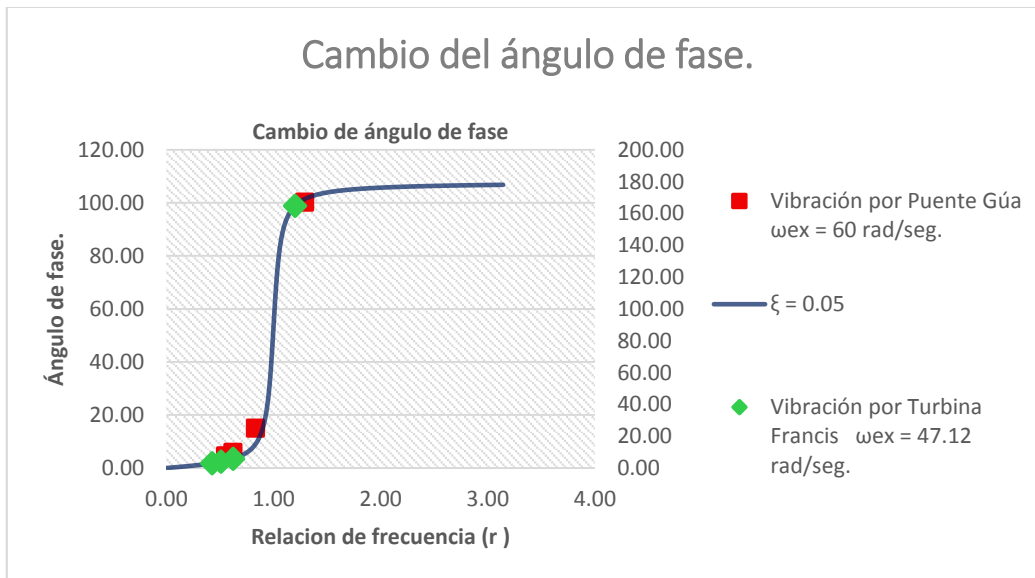
Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA N° 83: Cambio del Ángulo de Fase para Diferentes Amortiguamientos.**



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 44: Cambio de Ángulo de Fase para casos de Vibraciones Evaluadas.**



Fuente: Elaboración propia.

**Comentario:**

Se ha identificado el cambio de ángulo de fase registrado para cada fuente de vibración, en un sistema de 4 grados de libertad con un factor de amortiguamiento del 5%.

Para el caso de carga de vibración por Turbina Francis el ángulo de fase del sistema indica que la posición inicial en el ciclo ocurre a 2.98°. Para los modos de vibración 1°, 2° y 3° que muestran una estructura muy rígida con una frecuencia circular alta, la relación de frecuencias asume valores  $r < 1$  entonces



el desplazamiento está en fase con la fuerza aplicada, mientras que para el modo 4° la relación de frecuencias asume valores  $r > 1$  entonces la fuerza varía rápidamente y el desplazamiento está fuera de fase con respecto a la fuerza aplicada.

Por otro lado, el sistema con vibraciones por Puente Grúa describe una posición inicial del ciclo en el ángulo de fase en  $4.54^\circ$ . Para los modos de vibración 1°, 2° y 3°, la relación entre frecuencias naturales y de excitación, es  $r < 1$  entonces el desplazamiento está en fase con la fuerza aplicada, para el modo 4°, la relación de frecuencia asume un valor  $r > 1$  donde hay un desfase entre la fuerza y el desplazamiento.



Por último, para el sistema con vibraciones sísmicas no se ha analizado al no haber un sismo del que se pueda obtener la frecuencia de excitación.

Por lo tanto, el cálculo de ángulo de fase ha sido importante para determinar cómo interactúan las diversas fuentes de excitación en el sistema, se muestra que la acción de las 2 fuentes de vibración no coincide en el mismo ángulo de fase, entonces no habrá interferencia en la acción de dichas fuentes de excitación, lo cual descarta la amplificación de dichas fuerzas.

**3.6.2. ANÁLISIS DE PARÁMETROS GLOBALES DE RESPUESTA**

**3.6.2.1. ANÁLISIS DE RESPUESTA MÁXIMO – RESULTADO ETABS**

**3.6.2.1.1. ANÁLISIS DE MÁXIMO DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL SISTEMA CON VIBRACIÓN POR TURBINA FRANCIS**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<p><b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b></p>		
Prueba :	Cálculo de Desplazamiento Lateral Máximo ante diferentes sollicitaciones	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 03 / 2016.	
Observación :		

**FIGURA N° 84: Desplazamiento lateral Máximos ante Vibraciones por Turbina Francis – Resultados ETABS.**

N° Piso	Elevación - mm.	Caso de Carga	Dirección	Máximo	Promedio
				mm	mm
4	22700	Vibración por Turbina hidráulica Francis.	X	0.2165	0.2101
3	15000		X	0.1957	0.1893
2	10300		X	0.1559	0.149
1	4900		X	0.0854	0.0783
Base	0		Y	0	0

Fuente: Resultados ETABS.

Máximo desplazamiento por turbina Francis - ETABS.	0.2165	mm.
Altura hasta el Nivel 4°.	22700	mm.

**FIGURA N° 85: Desplazamiento lateral Máximo ante Vibraciones por Turbina Francis.**

Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**

Ante los esfuerzos producidos por vibraciones inducidas por Turbina Hidráulica Francis, se genera un proceso vibratorio sostenido en el tiempo, en el que la duración de la carga es mayor al periodo natural del sistema sobre el que actúa, e involucra varios ciclos de carga. Este tipo de carga presenta oscilaciones en el tiempo que pueden ser periódica de frecuencia constante.



Se identifica el máximo desplazamiento obtenido en el tiempo, físicamente es el resultado de amplificar la respuesta estática como consecuencia de aplicar una carga dinámica generada por la magnitud de la fuerza externa armónica que actúa sobre la estructura. Durante el tiempo que dura la carga armónica la estructura vibra en un estado denominado respuesta en régimen permanente, las máximas deformaciones que adopta la estructura, se han producido antes de que la estructura alcance el régimen permanente.

La respuesta dinámica ante una carga armónica, necesariamente no es mayor que la estática, es decir que al estar influenciada por el efecto de la inercia de

las masas puede llevar a una amplificación o a una reducción de la respuesta respecto al mismo caso sin inercia (caso estático).

Es de tener en cuenta las fuerzas disipativas, pues pueden significar alguna amplificación de la carga cuando la relación de frecuencias es igual a 1 y el sistema carece de amortiguamiento, es decir el amortiguamiento toma un papel importante en la amplitud de la respuesta máxima.

### 3.6.2.1.2. ANÁLISIS DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL SISTEMA CON VIBRACIONES POR PUENTE GRÚA

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Desplazamiento Lateral Máximo ante diferentes sollicitaciones	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 03 / 2016.	
Observación :		

### GENERACIÓN TIEMPO - HISTORIA PUENTE GRÚA

#### DATOS DE ENTRADA

TIPO DE GRÚA	QD210 / 25 ton - 12.7 m. A3.		
Patron de Carga.	Carga Máxima:	210.00	ton.
	Carga Mínima:	25.00	ton.
Espaciamiento:	12.70		m.
Velocidad de Elevación:	Mínima	0.20	2.0
	Velocidad:		m/min.
Velocidad de Viaje:	Carro de Puente:	1.50	5.0
			m/min.
Altura de Elevación.	Gancho Principal		
		15.00	m.

#### DURACIÓN DE LA FUERZA DE PULSO:

Izaje de carga	10	min.
Recorrido del puente	22.5	min.
<b>Tiempo Total</b>	<b>32.5</b>	<b>min.</b>

#### RESUMEN DE DATOS

<b>Carga</b>	210.00	ton.
<b>Carga Amplificada (1.4) =</b>	294.00	ton.
<b>Tiempo de Duración =</b>	32.50	min



**Carga de Pulso Tipo Rampa**

$F(t) = P_0$

Si  $t < tr$ ; Primera fase

Si  $t > tr$ ; Segunda fase

$$p(t) = \begin{cases} P_0 \left(\frac{t}{tr}\right); & t \leq tr \\ P_0; & t \geq tr \end{cases}$$

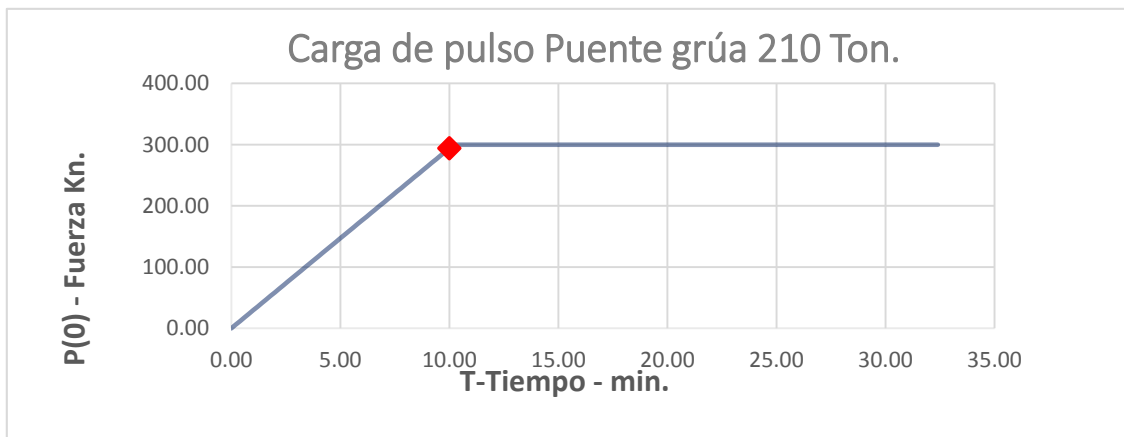
Donde:

$P_0$  = Carga máxima.

$t$  = tiempo.

$tr$  = tiempo de elevación de la carga.

Tiempo t-seg	Fuerza Po-ton
0	0
10	294
22.5	294
32.5	0



**DESPLAZAMIENTOS LATERAL MÁXIMOS DE PISO.**

Tabla N° 45: Desplazamiento lateral Máximo ante Vibraciones por Puente Grúa - Resultados ETABS.

N° Piso	Elevación - (mm).	Caso de Carga	Dirección	Máximo	Promedio
				mm	mm
4	22700	Vibración por Puente grúa.	X	0.3397	0.3335
3	15000		X	0.1033	0.0978
2	10300		X	0.0282	0.0274
1	4900		X	0.0074	0.0049
Base	0		X	0	0

Máximo desplazamiento Por Sismo de diseño - ETABS.	0.3397	mm.
Altura hasta el Nivel 4°.	22700.00	mm.

**FIGURA N° 86: Desplazamiento lateral Máximo Caso de Carga Puente Grúa - Resultados ETABS.**



Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**

Las cargas accidentales a diferencia del peso propio rara vez son estáticas, su aplicación sobre la estructura requiere de un cierto tiempo que debe ser analizado como una carga dinámica.

Cuando se aplican vibraciones debido al funcionamiento del puente grúa en el sistema estructural. Se presenta una carga de muy corta duración en el tiempo, su efecto se puede describir como una velocidad inicial que recibe la estructura como consecuencia de ella. La carga tiene un único pulso y corta duración con respecto al periodo "T" de la estructura, el amortiguamiento de la estructura no incide apreciablemente en la magnitud de la respuesta máxima.

Una medida de la intensidad de dicha carga se puede expresar a través de la magnitud del impulso que esta produce, de esta manera dicho impulso se transforma en una velocidad inicial de la zona directamente afectada por la carga desde su inicio hasta el final, corresponde considerar un factor de impacto (1.4) como lo menciona la E-020 norma de cargas.

**3.6.2.1.3. ANÁLISIS DE MÁXIMO DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL SISTEMA CON VIBRACIONES SÍSMICAS – RESULTADOS ETABS.**



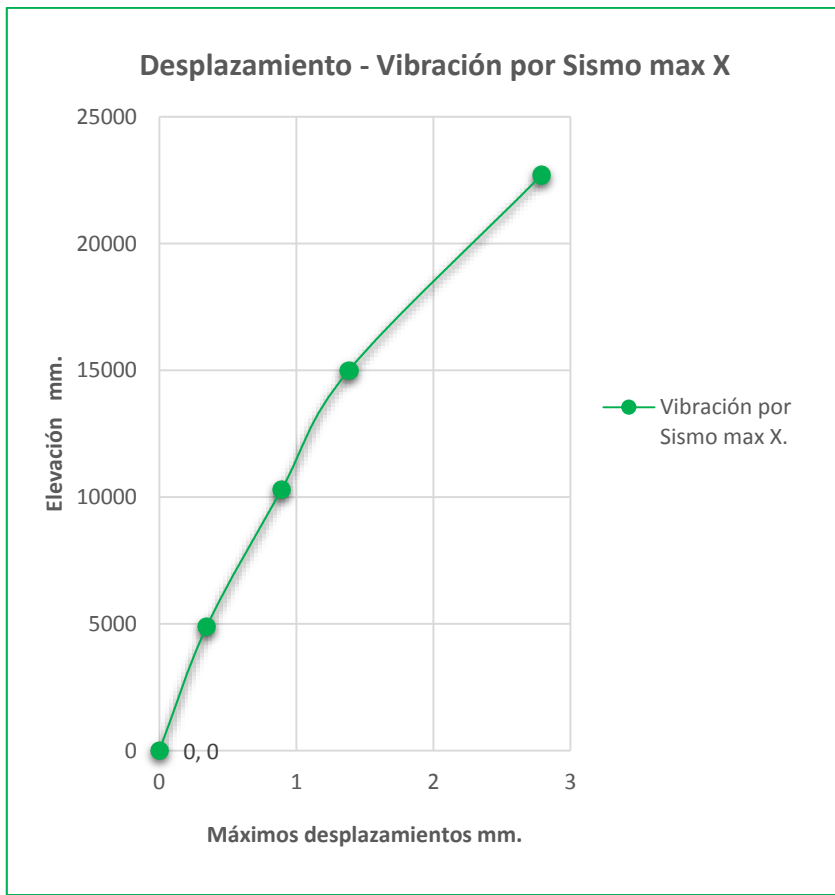
	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Desplazamiento Lateral Máximo ante diferentes sollicitaciones	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :	Casa de Máquinas Central Hidroeléctrica Machupicchu.	
Fecha :	15 / 03 / 2016.	
Observación :		

Tabla N° 46: Desplazamiento lateral por Vibraciones Sísmicas - Resultados ETABS.

N° Piso	Elevación (mm).	Caso de Carga	Dirección	Máximo	Promedio
				R = 4.46 mm	mm
4	22700	Vibración por Sismo Max - X.	X	2.7894	2.7786
3	15000		X	1.3835	1.3023
2	10300		X	0.8928	0.7894
1	4900		X	0.3468	0.2518
Base	0		X	0	0

Fuente: Resultados ETABS.

**FIGURA N° 87: Desplazamiento lateral por Sismo - resultados ETABS**



Fuente: Resultados ETABS.

Máximo desplazamiento Por Sismo de diseño - ETABS.	2.79	mm.
Altura hasta el Nivel 4°.	22700	mm.

Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**

Con el objetivo de cumplir con el criterio de diseño sísmico se han evaluado los desplazamientos registrados ante fuerzas sísmicas de diseño, lo que nos proporciona información de la capacidad elástica de cada piso ante dicha sollicitación.

En términos de servicio estructural, se observa que conforme crece la intensidad de las vibraciones sísmicas las fuerzas internas en todos los pisos también se



incrementan, ya que aún la estructura permanece en el rango elástico, esta acción se refleja en los desplazamientos que adopta la estructura, los que por defecto tienden a ascender con la altura del piso.

Los desplazamientos que asumen los pisos de la estructura, se incrementan con respecto a la altura, lo que podría aumentar el daño a elementos no estructurales, entre ellos equipos hidromecánicos, a menos que también hayan sido diseñados y fabricados para las fuerzas más grandes.

El código sísmico, con el objetivo de tomar en cuenta la respuesta del rango inelástico asociado con el material, usa un factor de comportamiento  $R$  que caracteriza la ductilidad y depende directamente de los parámetros que afectan la capacidad de disipación de energía de una estructura. De acuerdo con la norma E-030 2016, los desplazamientos reales de un punto del sistema estructural, se calcularán como un producto del factor de comportamiento  $R$  para estructuras irregulares y el desplazamiento del mismo punto, los que se obtuvieron mediante análisis modal espectral, donde la respuesta se basa en el espectro de respuesta de diseño. En este caso, el factor  $R$  asciende a 4.76. Los desplazamientos correspondientes se presentan en la Tabla N°48.

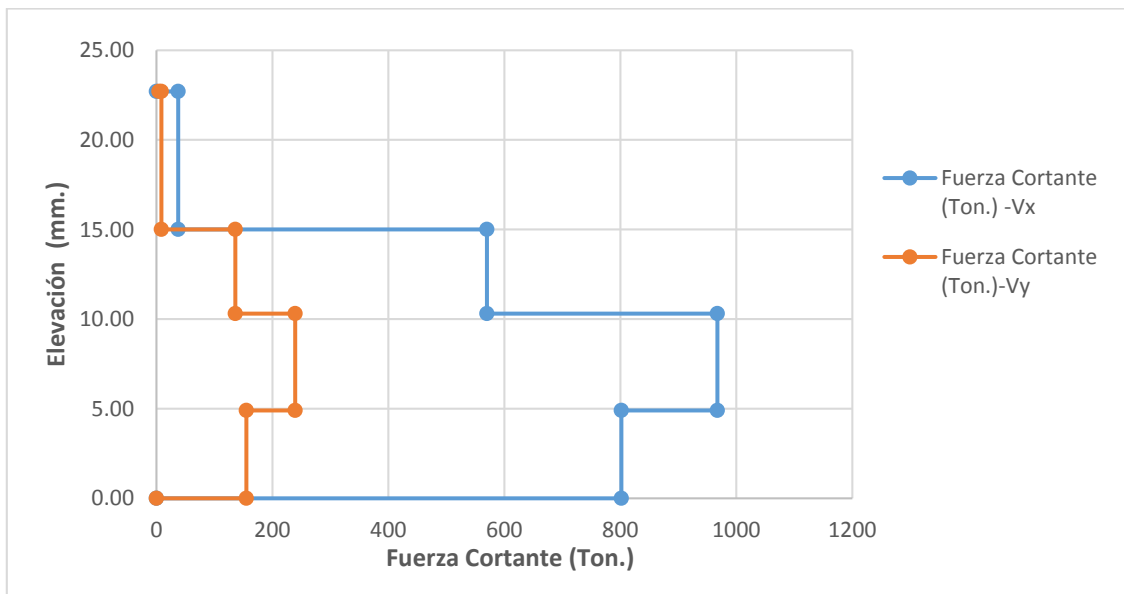
**3.6.2.1.4. ANÁLISIS DE FUERZA CORTANTE MÁXIMA DEL SISTEMA CON VIBRACIONES POR TURBINA FRANCIS.**

<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>	
Prueba :	Cálculo de Fuerzas Cortantes ante una diferentes solicitaciones de carga
Autor :	Formato Etabs.
Lugar :	C.H.Machupicchu II Fase.
Fecha :	05/04/2016
Observación :	

Tabla N° 47: Fuerzas Cortantes ante una Vibración por Turbina Francis.

Nivel	Elevación (m).	Fuerza Cortante (Ton.) -Vx	Fuerza Cortante (Ton.)-Vy
4°	22.700	0.000	4.534
	22.700	37.477	8.495
3°	15.000	37.477	8.495
	15.000	569.830	136.183
2°	10.300	569.830	136.183
	10.300	967.486	239.217
1°	4.900	967.486	239.217
	4.900	801.838	155.041
Base	0.000	801.838	155.041
	0.000	0.000	0.000

FIGURA N° 88: Fuerzas cortantes por vibración de la turbina Francis.



Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**

Ha podido observarse que cuando se aplica la excitación por Turbina Hidráulica Francis la mayor sollicitación por fuerza cortante que recibe el sistema ocurre en la dirección X, y se registra para el segundo piso. Considerando que las fuerzas internas actúan sobre los componentes de una estructura dependen de los desplazamientos o deformaciones específicas La distribución de la fuerza cortante en planta se hará teniendo en cuenta los desplazamientos laterales existentes y reglamentarios.

**3.6.2.1.5. ANÁLISIS DE FUERZA CORTANTE MÁXIMA DEL SISTEMA CON VIBRACIÓN POR PUENTE GRÚA.**



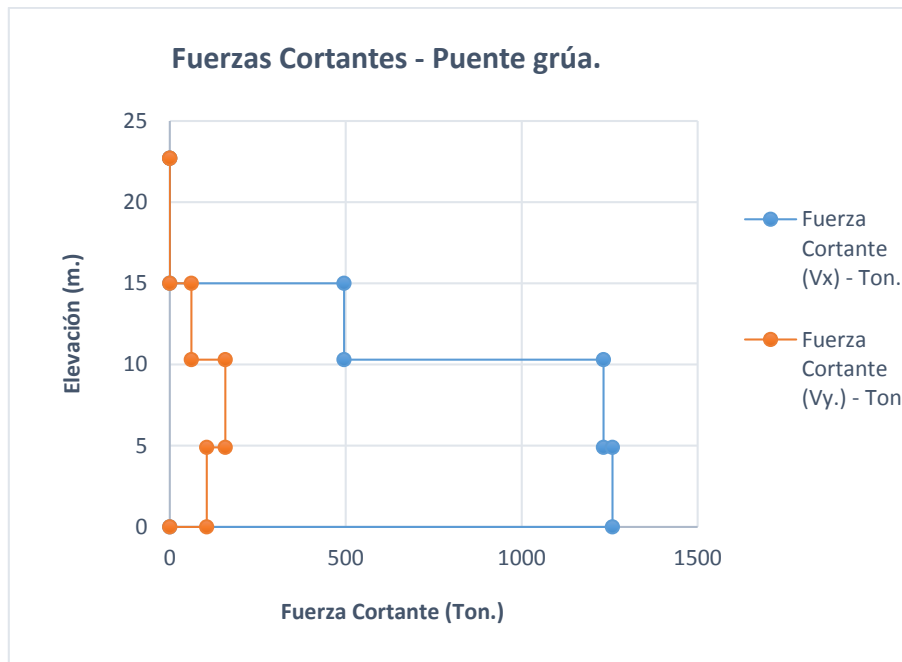
	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Fuerzas Cortantes ante una diferentes sollicitaciones de carga	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :	CASA DE MAQUINAS CH. MACHUPICCHU.	
Fecha :	10 / 04 / 2016.	
Observación :		

Tabla N° 48: Fuerzas cortantes ante una vibración por puente grúa.

Nivel	Elevación - m.	Fuerza Cortante (Vx) - Ton.	Fuerza Cortante (Vy.) - Ton.
4°	22.700	0.000	0.000
	22.700	0.000	0.000
3°	15.000	0.000	0.000
	15.000	495.326	61.444
2°	10.300	495.326	61.444
	10.300	1232.613	157.822
1°	4.900	1232.613	157.822
	4.900	1257.670	104.869
Base	0.000	1257.670	104.869
	0.000	0.000	0.000

**FIGURA N° 89: Fuerzas cortantes ante una vibración por puente grúa.**

Fuente: Resultados ETABS.

### Comentario:

Se grafica las fuerzas de cortante en elevación, de varias plantas para ambas direcciones.

Las solicitaciones atribuidas por la vibración de puente grúa indican que en el segundo piso del sistema estructural ocurren las máximas fuerzas cortantes en la dirección X, ante una máxima solicitación podría ocurrir una falla por corte, esto se debe a que allí se desarrollan las mayores esfuerzos en los muros y se podría generar una reducción de la resistencia a fuerza cortante a diferencia del resto de pisos.

En los muros de concreto reforzado es posible obtener una forma de falla por flexión y/o corte, los elementos resistentes deben ser capaces de absorber las vibraciones generadas, de esta manera estos proporcionan rigidez y resistencia necesaria ante la solicitación por Puente Grúa.



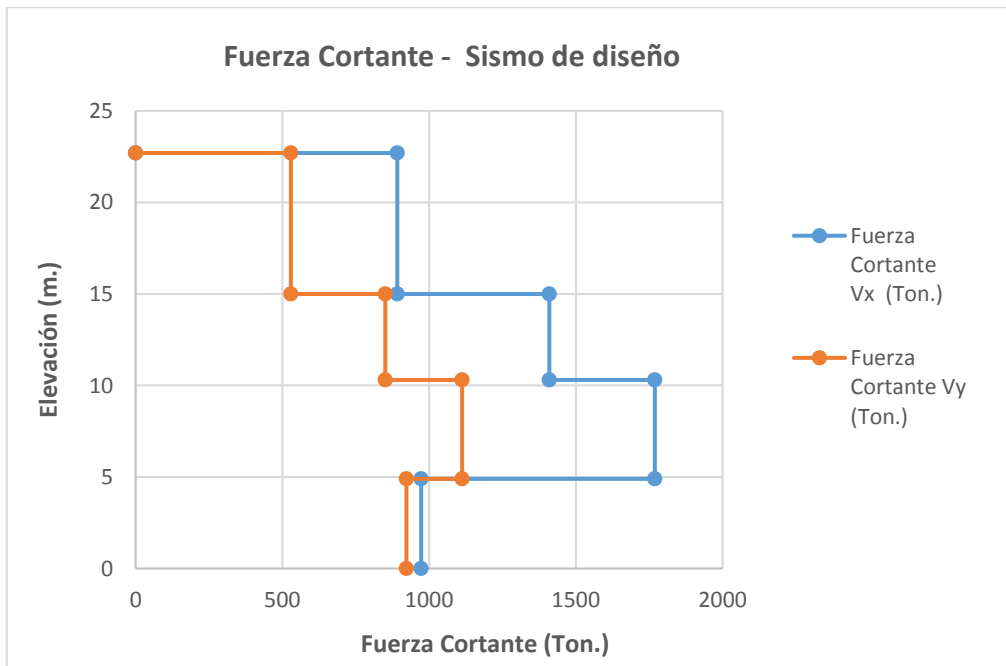
**3.6.2.1.6. ANÁLISIS DE FUERZA CORTANTE MÁXIMA DEL SISTEMA CON VIBRACIONES SÍSMICAS**

<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>		
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUNTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Fuerzas Cortantes ante una diferentes sollicitaciones de carga	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :	CASA DE MAQUINAS CH. MACHUPICCHU.	
Fecha :	10/04/2016.	
Observación :		

Tabla N° 49: Fuerzas Cortantes ante una Vibración Sísmica.

Nivel	Elevación (m).	Fuerza Cortante (Ton.)	
		Vx	Vy
4°	22.700	0.000	0.000
	22.700	891.587	528.609
3°	15.000	891.587	528.609
	15.000	1409.433	850.368
2°	10.300	1409.433	850.368
	10.300	1768.930	1112.624
1°	4.900	1768.930	1112.624
	4.900	972.885	922.340
Base	0.000	972.885	922.340
		0.00	0.00

FIGURA N° 90: Fuerzas cortantes ante una vibración sísmica.





Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**


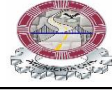
Con la intención de disipar la energía sísmica a través de elementos intencionalmente dúctiles se han dispuesto muros reforzados, para que actúen antes que el "sismo" produzca la fractura en la estructura. Se han dispuesto elementos como las placas de concreto armado, cuyo refuerzo horizontal deberá ser capaz de soportar la fuerza cortante asociada a su mecanismo de falla por flexión.

Cualquier incremento de fuerza sísmica se traducirá en energía de deformación de sistemas resistentes y en una redistribución de cortantes para el resto de muros, lo que causará un estado de fallas progresivas, causando que cada muro alcance su nivel de resistencia y genere los correspondientes desplazamientos.

Cabe la posibilidad de que los pisos superiores al primero ( $i > 1$ ) fallen primero, Esto ocurre cuando la fuerza cortante última excede la resistencia correspondiente.

**3.6.2.1.7. ANÁLISIS DE DERIVA O DISTORSIÓN DEL SISTEMA CON VIBRACIONES POR TURBINA FRANCIS.**

Tabla N° 50: Derivas Máximas ante una Vibración Turbina Hidráulica Francis.

 <b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>						
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>						
Prueba :	Cálculo de Derivas Máximas ante diferentes sollicitaciones de carga.					
Autor :	Formato Etabs.					
Lugar :	Casa de Máquinas CH. MACHUPICCHU.					
Fecha :	16-04-2016.					
Observación :						
Factor de reducción:		4.46				
N°Piso	Altura	Desplazamiento	Derivas Elastica	Derivas Inelastica Δ	Derivas Limite	Observ.
	m.	mm				
4	19.70	0.217	0.000003	0.00001	0.007	ok
3	12.00	0.196	0.000010	0.00003	0.007	ok
2	8.00	0.156	0.000018	0.00006	0.007	ok
1	4.00	0.085	0.000021	0.00007	0.007	ok
Base	-	-				

$$\Delta \text{elásticas } i = \frac{\delta i - \delta (i - 1)}{h i}$$

$$\Delta \text{Inelásticas } i = \frac{0.75 * R * (\delta i - \delta (i - 1))}{h i}$$

Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**



La intención de identificar las derivas máximas que adopta la estructura ante la vibración por Turbina Hidráulica Francis es para tratar de mantener los desplazamientos laterales de entrepiso fuera del límite de falla. Comprobándose que la estructura no registra derivas más allá del límite permisible.

ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

El daño en elementos no estructurales adosados a la estructura es particularmente muy leve en este caso, es necesario tener presente que dicho daño está asociado al valor del desplazamiento relativo inelástico de un nivel con respecto al inmediato anterior, o deriva. Se ha establecido que no son deseables que los valores de la deriva que superen el 7 por mil de la altura libre entre los dos niveles para un sistema estructural dual de concreto armado, y asumir valores que asciendan de manera ordenada. Sin embargo, este límite depende, además de la fragilidad y la resistencia de los materiales de los elementos no estructurales.

### 3.6.2.1.8. ANÁLISIS DE DERIVA O DISTORSIÓN DEL SISTEMA CON VIBRACIONES POR PUENTE GRÚA.

Tabla N° 51: Derivas Máximas ante una Vibración por Puente Grúa.

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>				
		<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.</b>				
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>						
Prueba :	Cálculo de Derivas Máximas ante diferentes solicitaciones de carga.					
Autor :	Formato Etabs.					
Lugar :	Casa de Máquinas CH. MACHUPICCHU.					
Fecha :	17-04-2016.					
Observación :						
<b>Factor:</b>					0.75	
<b>Factor de Reducción:</b>					4.46	
N°Piso	Altura	Desplazamiento	Derivas Elastica	Derivas Inelastica - $\Delta$	Derivas Limite	Observ.
	m.	mm				
4	19.700	0.33970	0.00003	0.00010	0.007	ok
3	12.000	0.10330	0.00002	0.00006	0.007	ok
2	8.000	0.02820	0.00001	0.00002	0.007	ok
1	4.000	0.00740	0.00000	0.00001	0.007	ok
BASE	0	0				



Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**

Los criterios de la máxima deriva, frente a solicitaciones externas tales como vibraciones, se enfocan en mantener la utilidad o el rendimiento funcional, de la estructura bajo dicha carga, al considerar la deriva estructural como el nivel de daño que sufre durante una sollicitación. Toma como base que la deflexión lateral es el movimiento predictivo de una estructura ante cargas laterales, mientras la deriva está definida como la diferencia de desplazamiento lateral entre dos pisos ambos ocasionan daños a nivel estructural y no estructural.

Por lo tanto, la máxima desviación que registra la estructura ante la acción de las fuerzas por puente grúa, muestra que los desplazamientos laterales no ponen en peligro la seguridad del sistema no estructural. Además, el daño que pueden sufrir los elementos no estructurales en general, estos valores traen consigo el riesgo de colapso parcial o total de dicho sistema.

**3.6.2.1.9. ANÁLISIS DE DERIVA O DISTORSIÓN DEL SISTEMA CON VIBRACIONES SÍSMICAS.**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA.</b>	
<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO ANTE VIBRACIONES INDUCIDAS POR ROTACIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA FRANCIS, EQUIPO DE PUENTE GRÚA Y VIBRACIONES SÍSMICAS EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II FASE.</b>		
Prueba :	Cálculo de Derivas Máximas ante diferentes solicitaciones de carga.	
Autor :	Formato Etabs.	
Lugar :	Casa de Máquinas CH. MACHUPICCHU.	
Fecha :	20-04-2016.	

Escala de fuerza sísmica

DATOS		
Factores de Zona	<b>Z =</b>	0.3
Categoría de la Edificación.	<b>U =</b>	1.5
Parámetros de sitio.	<b>S =</b>	1
Coeficiente de Reducción.	<b>Rd =</b>	4.5
<b>Altura</b>	<b>=</b>	22.7 mts.
Carga Muerta	<b>=</b>	4485.28 Ton.
Carga Viva	<b>=</b>	146.25 Ton.
Total	<b>=</b>	<b>4631.54Ton.</b>
Fuerza Cortante - Vx (Estático)	568.10	Ton.
Fuerza Cortante - Vy (Estático)	347.14	Ton.
RESULTADOS		
Periodo T =	0.11	seg.
Peso Total =	4645.84	Ton.
Coeficiente de Amplificación sísmica - C =	2.50	
C X S =	2.50	
Cb =	0.21	
<b>FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE</b>		
Cortante Basal (V) =	973.01	Ton.

Tabla N° 52: Derivas Máximas ante una Vibración Sísmica.

Factor desplazamiento irregular:		0.75				
Factor de reducción sísmica:		4.46				
N°Piso	Altura	Desplazamiento	Derivas Elastica	Derivas Inelastica Δ	Derivas Limite	Observ
	m.	mm				
4	19.700	2.78940	0.00018	0.00061	0.007	ok
3	12.000	1.38350	0.00012	0.00041	0.007	ok
2	8.000	0.89280	0.00014	0.00046	0.007	ok
1	4.000	0.34680	0.00009	0.00029	0.007	ok
BASE	0	0				

$$\Delta \text{elásticas } i = \frac{\delta i - \delta (i - 1)}{h i}$$

$$\Delta \text{Inelásticas } i = \frac{0.75 * R * (\delta i - \delta (i - 1))}{h i}$$

Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**

La Norma E.030 permite el análisis sísmico en forma independiente para cada dirección principal del edificio (X e Y), como si el 100% del sismo actuase en X-X con 0% en Y-Y, y viceversa.

Las derivas inelásticas no deben sobrepasar de 0.007 (para que el edificio sea reparable), y que hasta el límite entre los sismos moderados y severos la estructura se comporte elásticamente.

De acuerdo con estos datos, para un análisis adecuado de los problemas de derivas y estabilidad, ha resultado de gran importancia el cálculo de unos valores adecuados de desplazamiento inelástico. Ser conservador en este aspecto es más conveniente a diferencia de otras construcciones, debido a las implicaciones que los daños en elementos no estructurales y estructurales tienen para los ocupantes y la comunidad en general.

Se puede mencionar que ante la fuerza lateral que impone el sismo los elementos resistentes asumen un comportamiento efectivo, pues son capaces de soportar las fuerzas cortantes y por consiguiente los momentos generados por dicha sollicitación.



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

En consecuencia, para cumplir con la deriva máxima permisible se ha requerido el uso de muros de hormigón reforzado. Hay ventajas claras para el uso de un sistema lateral fuerte y rígido, tales como muros de corte de hormigón armado, ya que el daño estructural puede limitarse al agrietamiento y desconchado de las paredes de corte, elementos que protege la carga vertical a resistir de daño significativo.

Daños en los elementos no estructurales, tales como muros divisorios, maquinaria, paredes, revestimientos, y las ventanas serán igualmente limitados y dichos elementos deberán ser diseñados para soportar fuerzas sísmicas según lo menciona la E030.



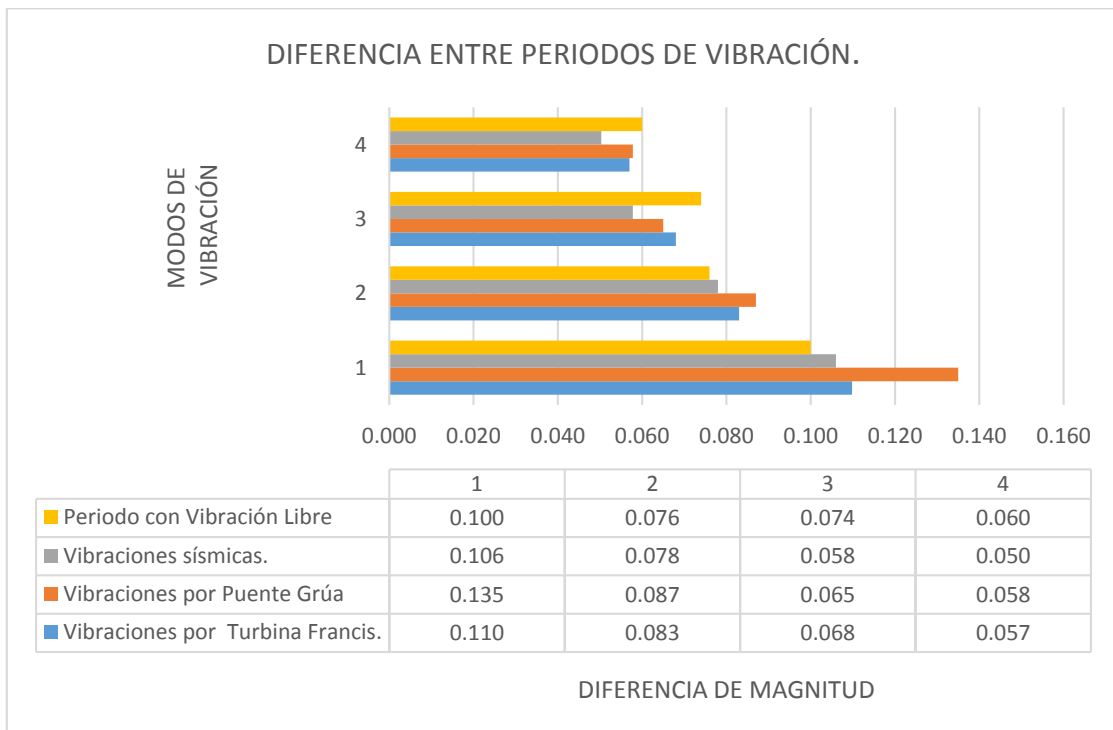
### CAPITULO IV: RESULTADOS

#### 4.1. PARÁMETROS DINÁMICOS

Tabla N° 53: Diferencias entre los Parámetros Dinámicos para cada de Fuente de Excitación.

MOD O	PERIODO INICIAL	PERIODO ACTUAL			DIFERENCIAS DEL PERIODO FUNDAMENTAL CON RESPECTO A LA VIBRACIÓN LIBRE.		
	Periodo con Vibración Libre	Periodo con Vibración por Turbina Francis.	Periodo con Vibración por Punte Grúa	Periodo con Vibraciones sísmicas	Vibraciones por Turbina Francis.	Vibraciones por Punte Grúa	Vibraciones Sísmicas
	seg.	seg.	seg.	seg.	seg.	seg.	seg.
1	0.106	0.110	0.135	0.106	0.004	0.029	0.000
2	0.078	0.083	0.087	0.078	0.005	0.009	0.000
3	0.058	0.068	0.065	0.058	0.010	0.007	0.000
4	0.050	0.057	0.058	0.050	0.007	0.008	0.000

FIGURA N° 91: Diferencia entre Periodos Fundamentales para cada Fuente de Excitación.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 54: Parámetros Dinámicos del Sistema con Vibraciones por Turbina Francis.

MODO	Periodo Estructural (T)	Frecuencia Natural (f).	Frecuencia Circular ( $\omega$ )	Ratio Asumido ( $\xi$ )	Ratio de amortiguamiento		Amortiguamiento Crítico (C)	Frecuencia de Excitación	Relación de frecuencias (r)	Factor de Amplificación (Rd)	Angulo de fase ( $\phi$ )
	sec.	ciclo/sec.	rad/sec.		$\alpha =$	$\beta =$					ton*sec/m.
1	0.110	0.017	57.224	0.050	3.534	0.0007	1107.195	47.000	1.200	2.980	164.745
2	0.083	0.013	75.701	0.050			1375.803	47.000	0.621	1.619	5.769
3	0.068	0.011	92.400	0.050			1480.362	47.000	0.509	1.346	3.926
4	0.057	0.009	110.231	0.050			522.960	47.000	0.426	1.221	2.983

Tabla N° 55: Parámetros Dinámicos del Sistema con Vibraciones por Punteo Grúa.

Modo	Periodo Estructural (T)	Frecuencia Natural (f).	Frecuencia Circular ( $\omega$ )	Ratio Asumido ( $\xi$ )	Ratio de amortiguamiento		Amortiguamiento (C)	Frecuencia de Excitación	Relación de frecuencias (r)	Factor de Amplificación (Rd)	Angulo de fase ( $\phi$ )
	sec.	ciclo/sec.	rad/sec.		$\alpha =$	$\beta =$					ton*sec/m.
1	0.135	0.021	46.542	0.050	2.934	0.0007	1367.550	60.000	1.289	1.483	1367.550
2	0.087	0.014	72.221	0.050			1456.610	60.000	0.831	3.118	1456.610
3	0.065	0.010	96.664	0.050			1409.548	60.000	0.621	1.619	1409.548
4	0.058	0.009	108.706	0.050			440.816	60.000	0.552	1.434	440.816

Fuente: Elaboración propia.



Tabla N° 56: Parámetros Dinámicos del Sistema con Vibraciones Sísmicas.

MODO	Periodo Estructural (T)	Frecuencia Natural (f).	Frecuencia Circular ( $\omega$ )	Ratio Asumido ( $\xi$ )	Ratio de amortiguamiento		Amortiguamiento (C)
	sec.	ciclo/sec.	rad/sec.		$\alpha =$	$\beta =$	ton*sec/m.
1	0.106	0.017	59.275	0.050	3.836	0.0006	1060.197
2	0.078	0.012	80.554	0.050			1317.509
3	0.058	0.009	108.706	0.050			1258.781
4	0.050	0.008	124.914	0.050			544.171

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 57: Magnitudes para el primer modo de vibración.

PARÁMETROS DINÁMICOS	VIBRACIÓN LIBRE	VIBRACIÓN TURBINA FRANCIS	VIBRACIÓN PUENTE GRÚA	VIBRACIÓN SÍSMICA
Periodo Estructural (T)	0.106	0.110	0.135	0.106
Frecuencia Natural (f).	0.017	0.017	0.021	0.017
Frecuencia Circular ( $\omega$ )	59.275	57.224	46.542	59.275

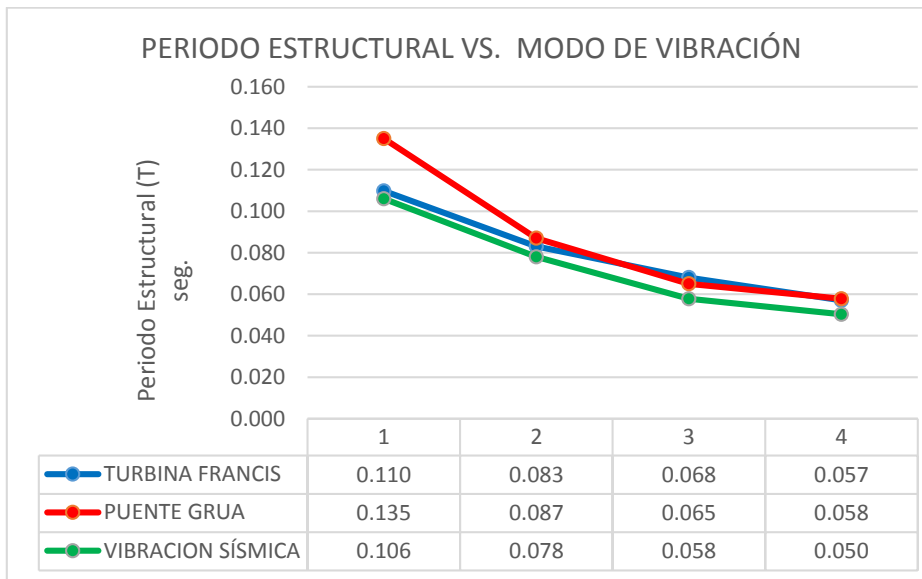
Tabla N° 58: Diferencia de magnitudes para el primer modo de vibración.

DIFERENCIA DE MAGNITUDES				DIFERENCIA MÁXIMA
Periodo Estructural (T)	0.004	0.029	0.000	0.029
Frecuencia Natural (f).	0.001	0.005	0.000	0.005

Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.1. PERIODO ESTRUCTURAL

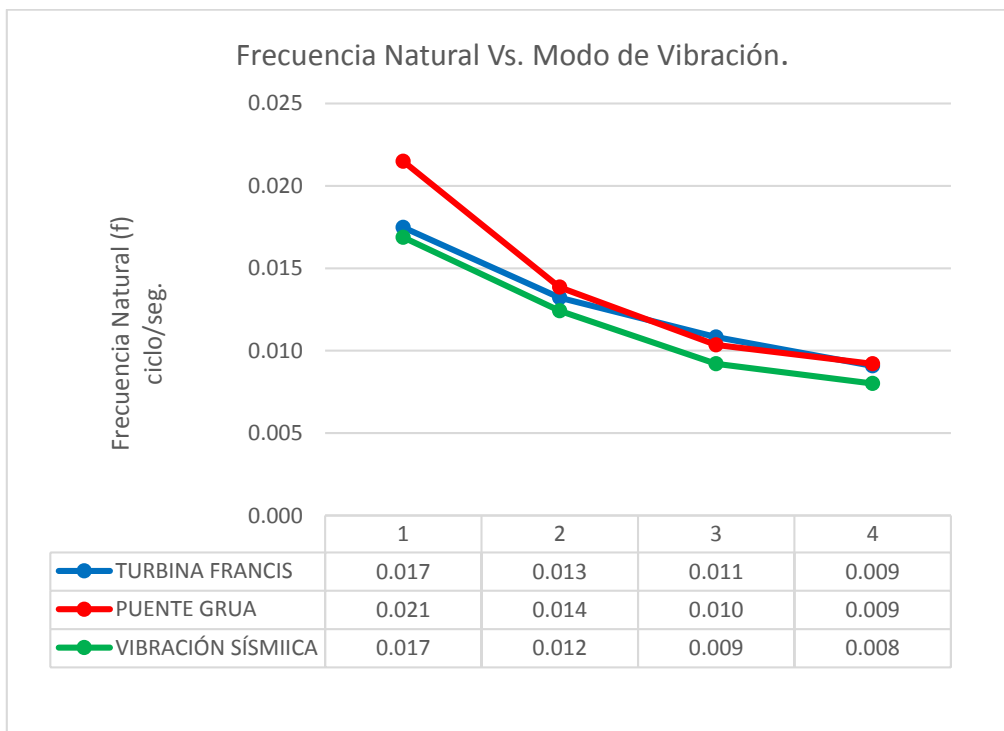
FIGURA N° 92: Periodo Estructural Vs. Modo de Vibración.



Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.2. FRECUENCIA NATURAL

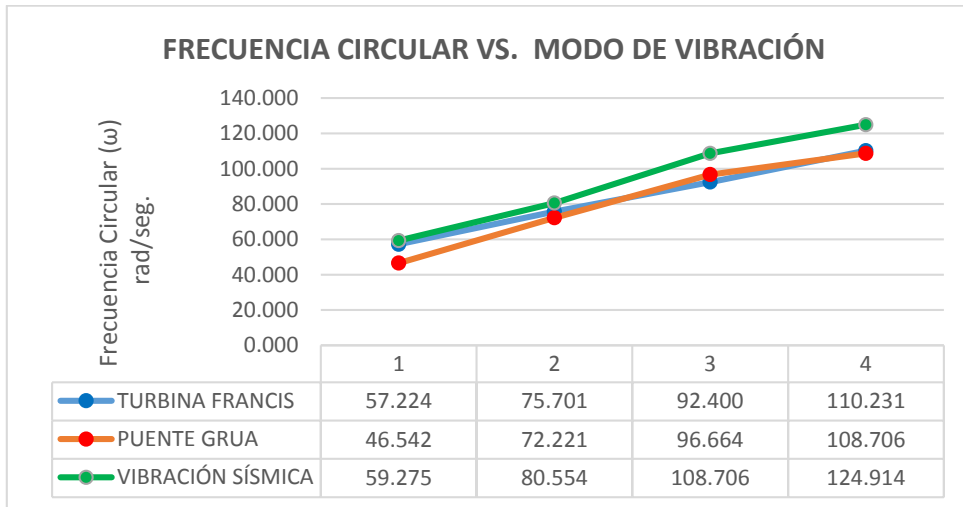
FIGURA N° 93: Frecuencia Natural Vs. Modo de Vibración.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. FRECUENCIA CIRCULAR.

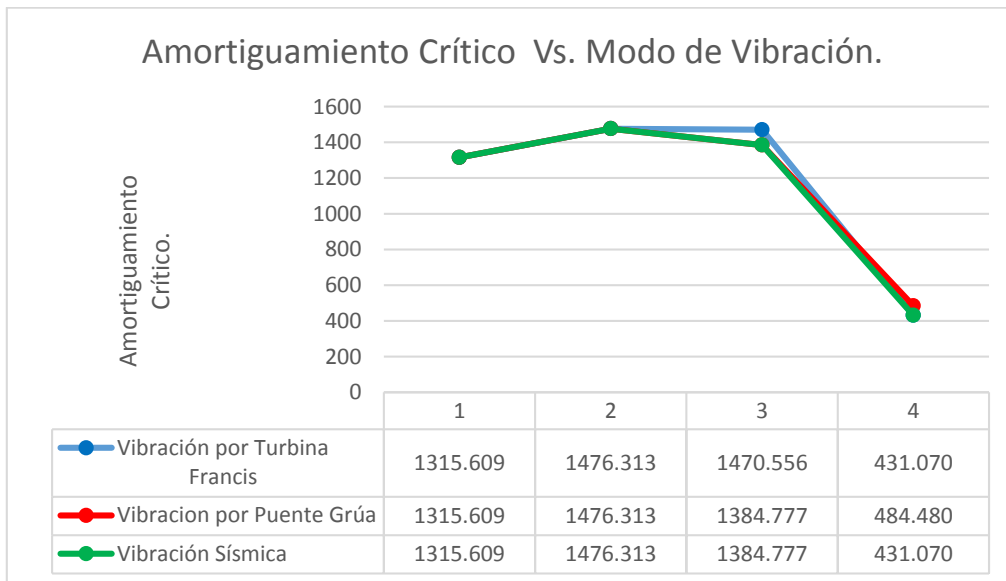
FIGURA N° 94: Frecuencia Circular Vs. Modo de Vibración.



Fuente: Elaboración propia.

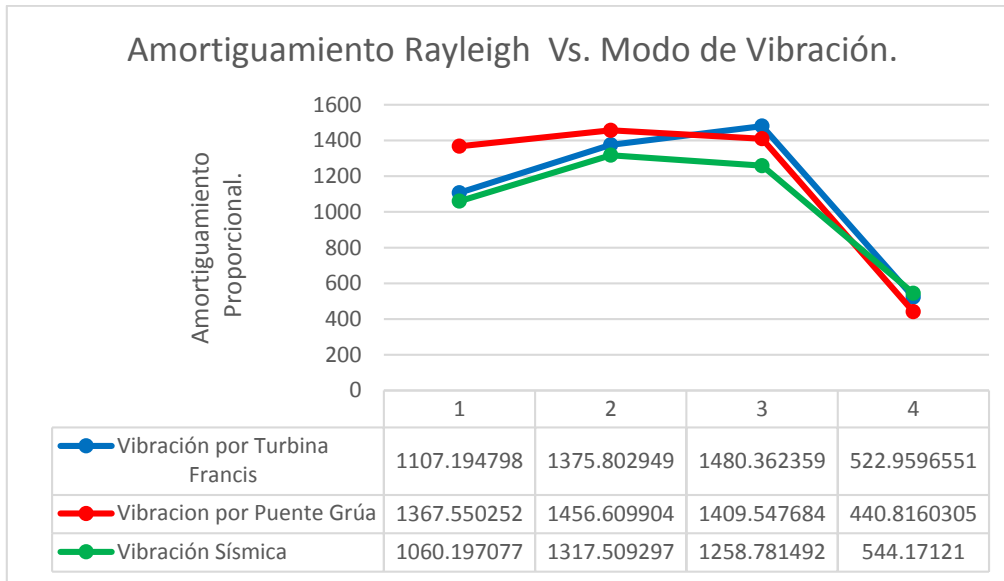
4.1.3. AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO.

FIGURA N° 95: Amortiguamiento crítico Vs. Modo de Vibración.



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA N° 96: Amortiguamiento proporcional Rayleigh Vs. Modo de Vibración.**



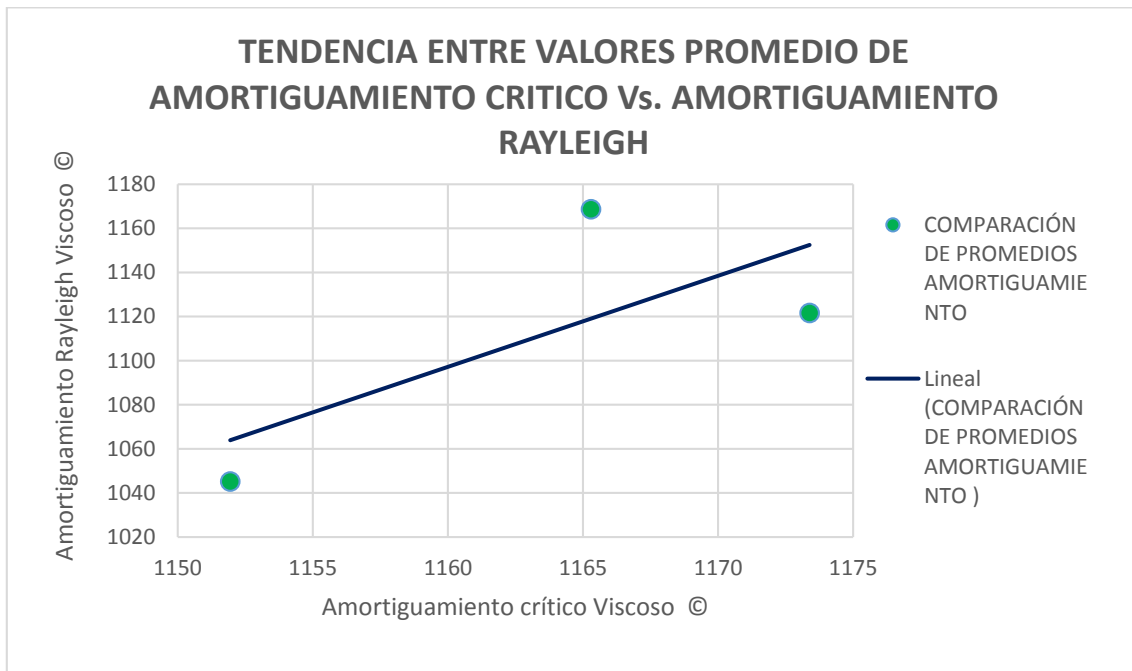
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 59: Comparación de Valores Promedio Amortiguamiento Crítico Vs Amortiguamiento Rayleigh.**

	Ratio de Amortiguamiento Asumido ( $\xi$ )	Coeficiente de proporcionalidad		Amortiguamiento Rayleigh Viscoso (C (rayleigh))	Amortiguamiento o crítico Viscoso (C)
		$\alpha =$	$\beta =$	ton*sec/m.	ton*sec/m.
<b>VIBRACIÓN TURBINA FRANCIS</b>	0.050	3.534	0.001	1121.580	1173.387
<b>VIBRACIÓN PUENTE GRÚA</b>	0.050	2.934	0.001	1168.631	1165.295
<b>VIBRACIÓN SÍSMICA</b>	0.050	3.836	0.001	1045.165	1151.942

Fuente: Elaboración propia.

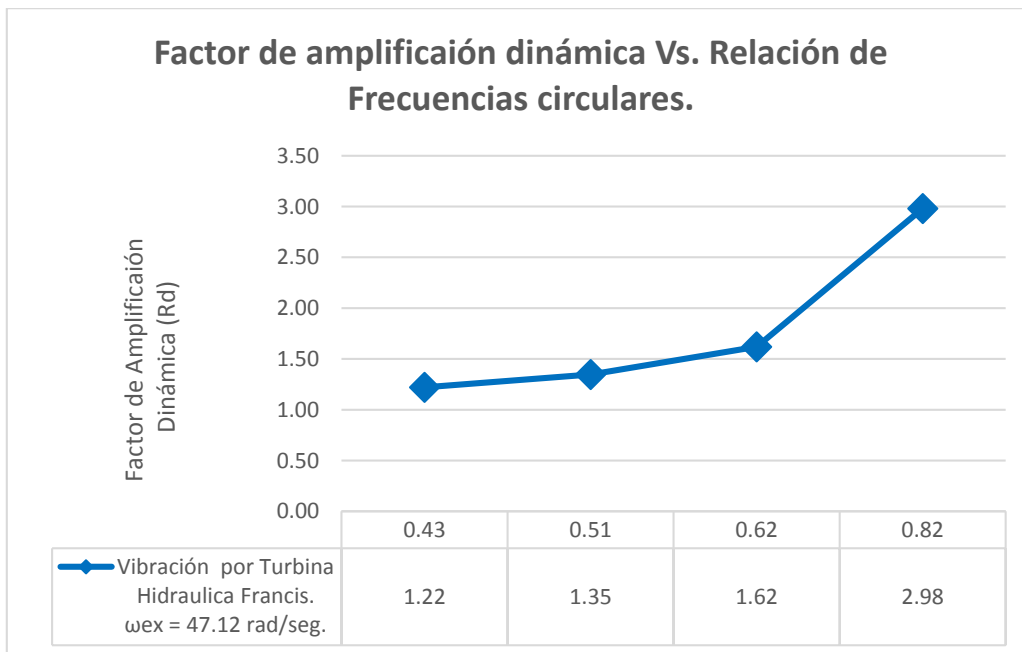
**FIGURA N° 97: Comparación de valores promedio de Amortiguamiento Rayleigh y crítico viscoso.**



Fuente: Elaboración propia.

**4.1.4. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA.**

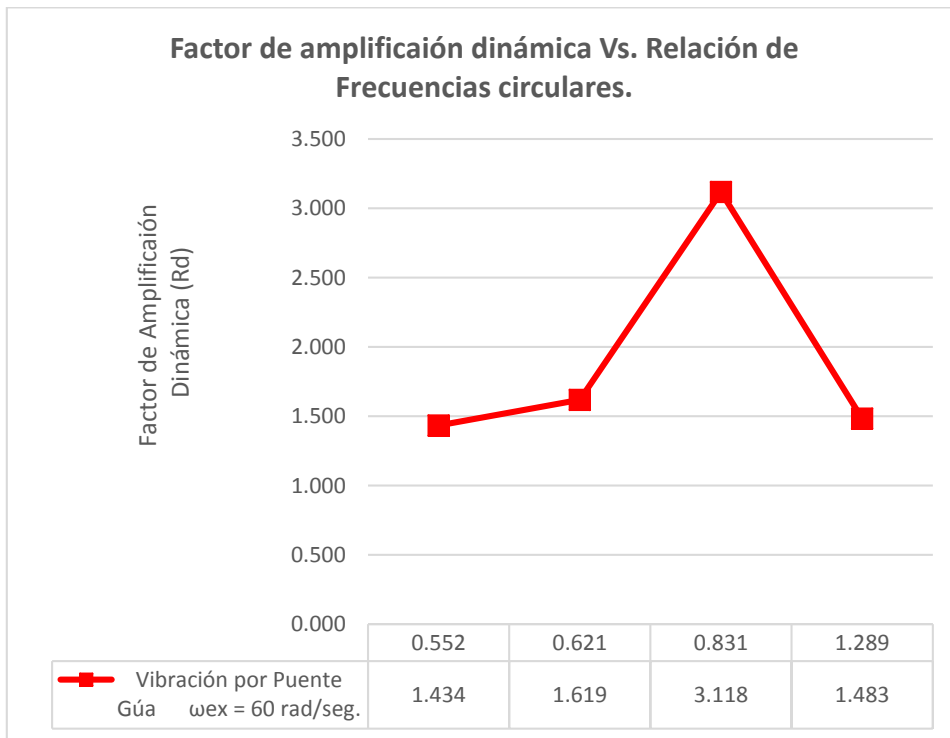
**FIGURA N° 98: Factor de Amplificación Dinámica del Sistema con Vibraciones por Turbina Hidráulica Francis.**



Fuente: Elaboración propia.



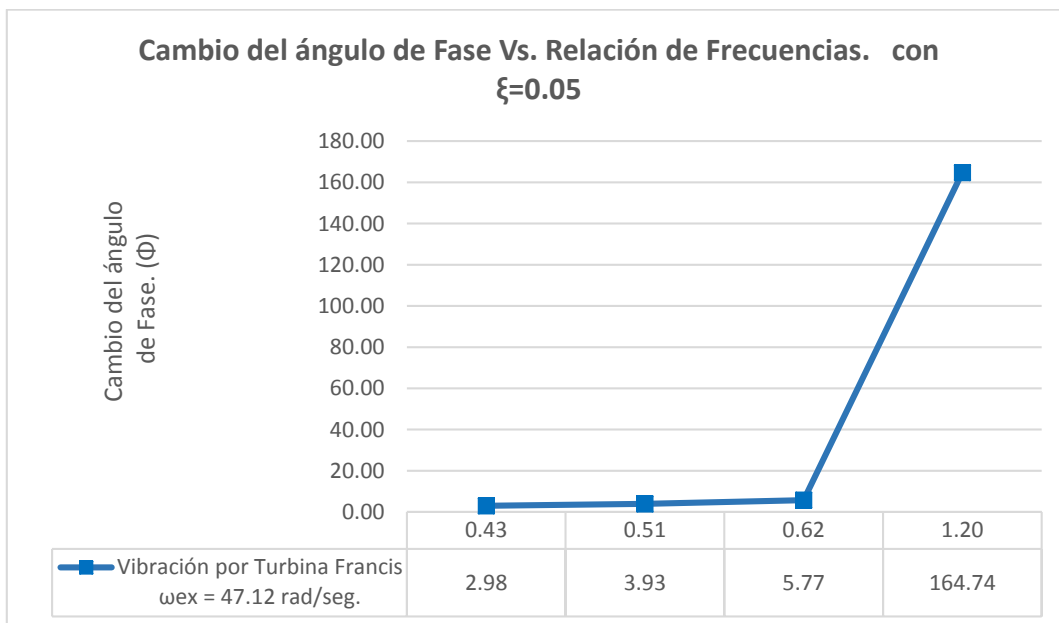
**FIGURA N° 99: Factor de Amplificación Dinámica del Sistema con Vibraciones por Puente Grúa.**



Fuente: Elaboración propia.

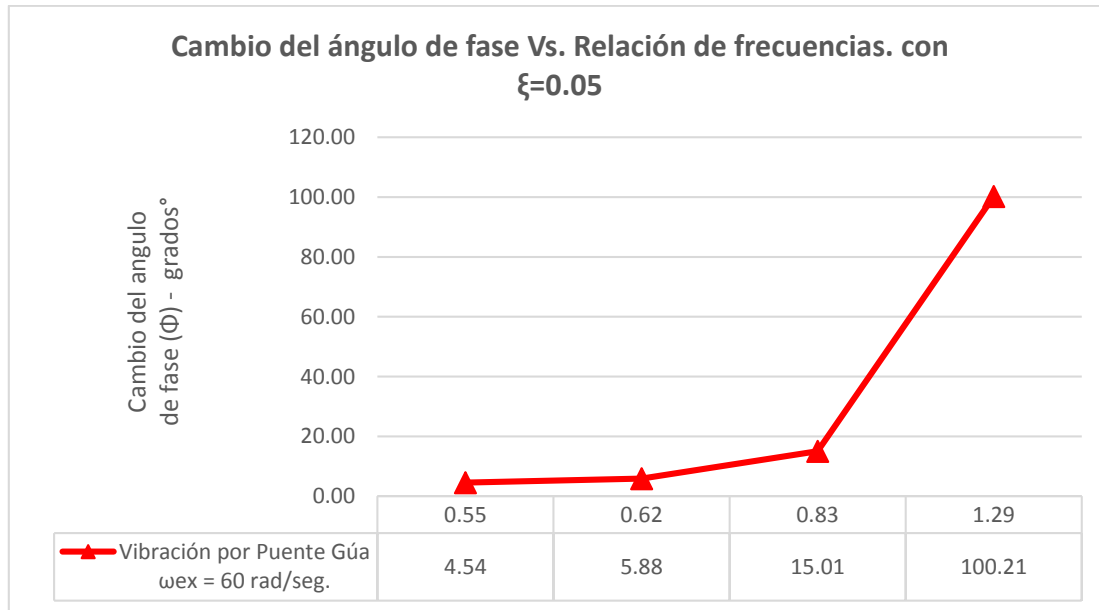
**4.1.5. CAMBIO DE ÁNGULO DE FASE.**

**FIGURA N° 100: Cambio de Angulo de Fase Vs. Relación de Frecuencias de excitación.**



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA N° 101: Cambio de Angulo de Fase Vs. Relación de Frecuencias de excitación.**



Fuente: Elaboración propia.

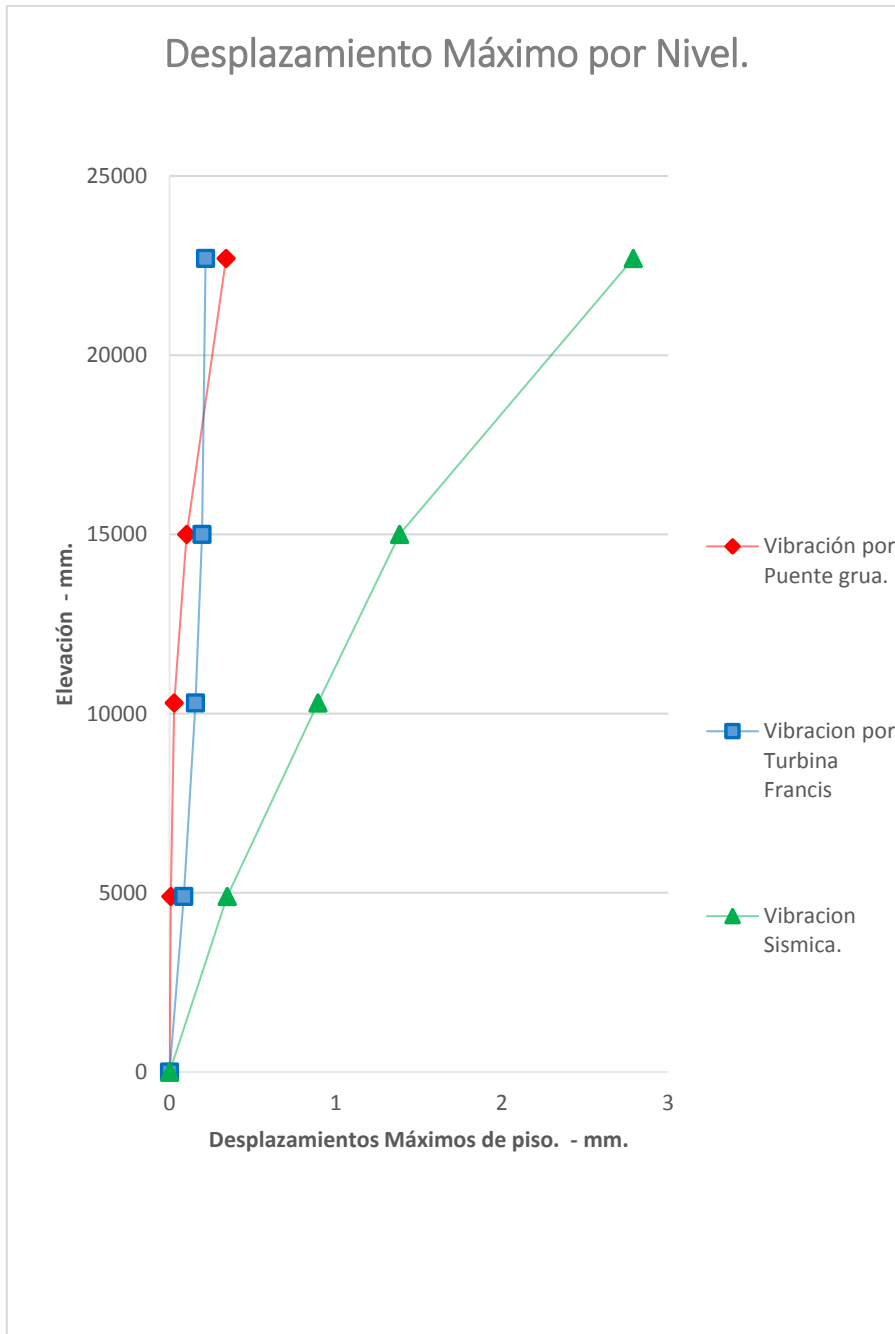
## 4.2. PARÁMETROS GLOBALES DE RESPUESTA ESTRUCTURAL.

### 4.2.1. DESPLAZAMIENTOS LATERALES MÁXIMOS TOTALES.

Tabla N° 60: Resumen de Desplazamiento lateral Máximos por nivel- Dirección X.

N° Piso	Desplazamiento máximo (mm).		
	Turbina Francis	Puente Grúa	Sismo
1°	0.000	0.005	0.347
2°	0.085	0.027	0.893
3°	0.156	0.098	1.384
4°	0.196	0.340	2.789

FIGURA N° 102: Desplazamiento máximo - mm.



Fuente: Elaboración propia.

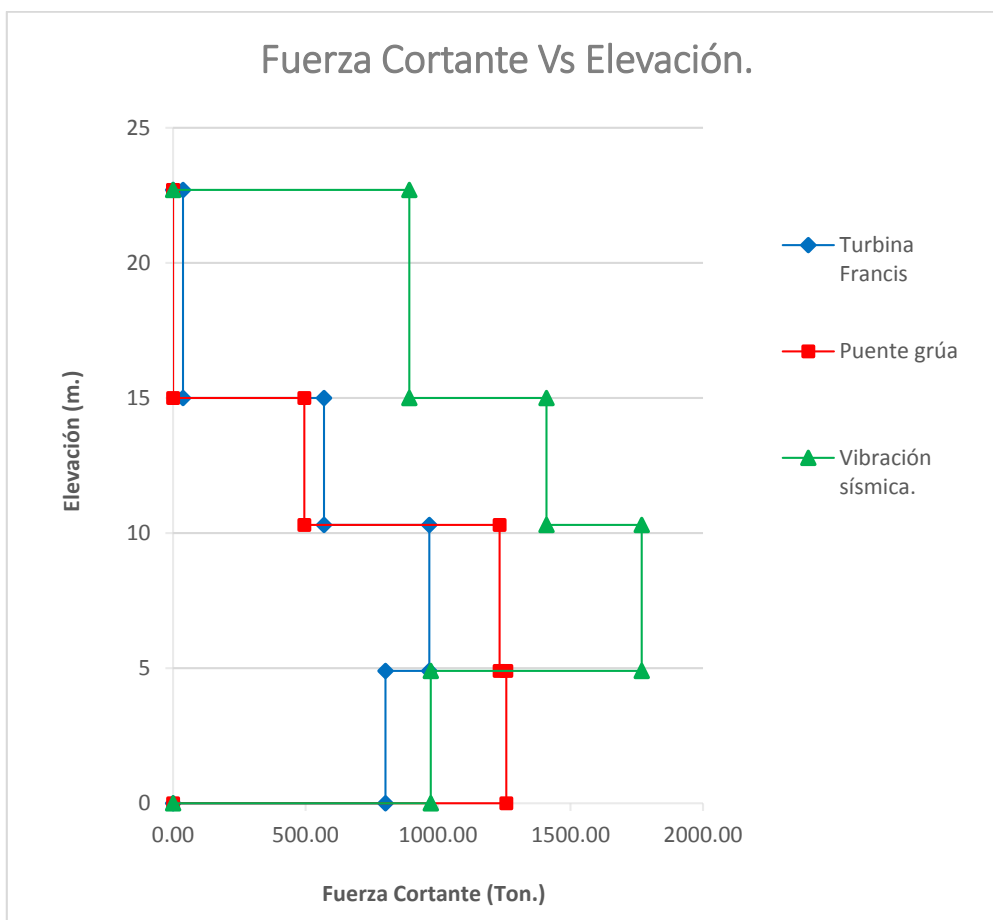
4.2.2. FUERZAS CORTANTES.

Tabla N° 61: Resumen de Fuerzas Cortantes.

Nivel	FUERZAS CORTANTES Vx - (Ton)			
	Elevación - m.	Vibraciones por Turbina Francis.	Vibraciones por Puente Grúa	Vibraciones por Sismo
4°	22.700	0.000	0.000	0.000
	22.700	37.477	0.000	891.587
3°	15.000	37.477	0.000	891.587
	15.000	569.830	495.326	1409.433
2°	10.300	569.830	495.326	1409.433
	10.300	967.486	1232.613	1768.930
1°	4.900	967.486	1232.613	1768.930
	4.900	801.838	1257.670	972.885
Base	0.000	801.838	1257.670	972.885
	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 103: Fuerzas cortantes.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 62: Cortante máximo en la base

Caso de Carga	FX	FY	FZ
	Ton.	Ton.	Ton.
Sismo de Diseño.	1768.93	1112.62	116.45
Puente Grúa.	1257.67	157.82	41969.76
Turbina Francis	967.49	239.22	4.90

Fuente: Elaboración propia.

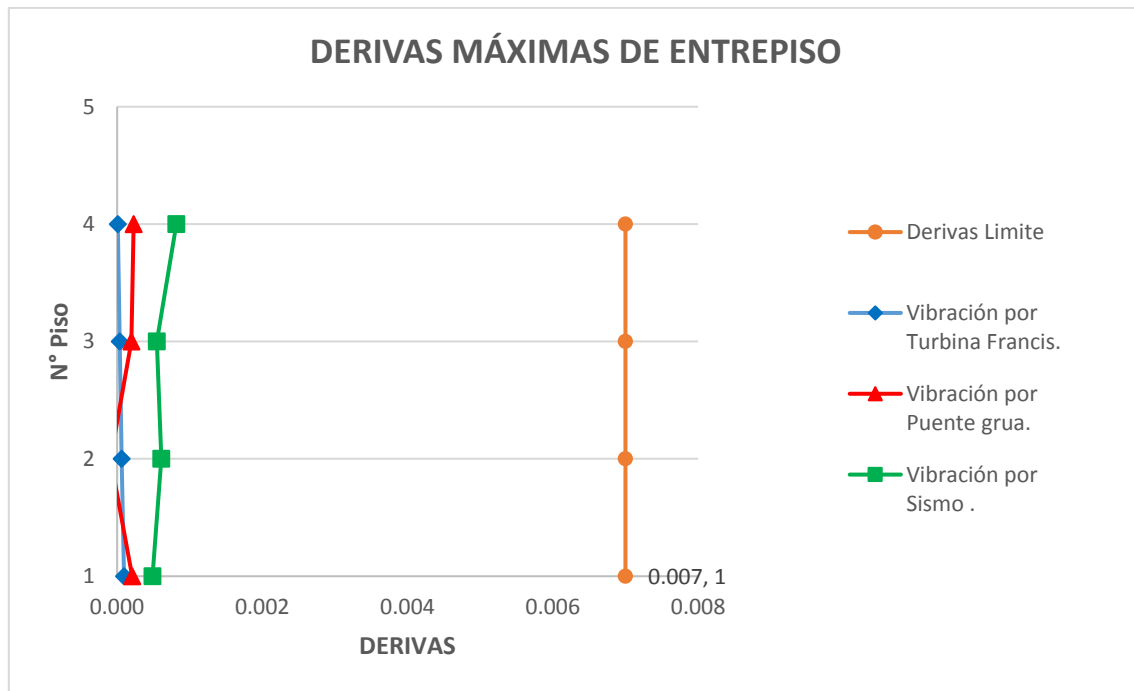
#### 4.2.3. DERIVA O DISTORSIÓN DE ENTREPISO PARA DIFERENTES EXCITACIONES.

Tabla N° 63: Resumen Derivas Máximas de entrepiso.

N°Piso	Vibración por Turbina Francis.	Vibración por Puente grúa.	Vibración por Sismo.	Observ
4	0.00001	0.00010	0.0006	ok
3	0.00003	0.00006	0.0004	ok
2	0.00006	0.00002	0.0005	ok
1	0.00007	0.00001	0.0003	ok
Base				

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA N° 104: Deriva Máxima de Entrepiso



Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Para los fines de la presente investigación se ha recurrido a una herramienta reconocida en el mercado internacional para el diseño estructural; ETABS ha sido usado para diseñar importantes estructuras en el mundo. Sin embargo, con el objetivo de verificar los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que el periodo fundamental de vibración es el parámetro más importante para definir la respuesta dinámica de la estructura, se han buscado otras alternativas para su solución, en este sentido se encontró que para desarrollar la ecuación de movimiento se tienen diversos métodos, pero específicamente se realizó mediante la solución de determinantes, para lo que se recurrió al uso de ecuaciones algebraicas, y por otro lado la solución correspondiente con valores y vectores propios, desarrollada en el software computacional Matlab.

Es así que durante el desarrollo se planteó hacer una comparación de resultados entre los obtenidos del modelo realizado en ETABS con los correspondientes a los métodos antes mencionados. Por un lado, el algoritmo generado en MATLAB para el análisis modal de un edificio cortante, usa el método de valores propios



para resolver la ecuación dinámica, muestra que tiene leves diferencias en los resultados obtenidos por el software ETABS V2015.

Por otro lado, el método basado en la solución de determinantes de la ecuación dinámica, donde los cambios en el periodo fundamental de vibración se producen de manera más brusca al ser comparado con los resultados del software ETABS V2015, un ejemplo de esto se puede ver en la Figura N° 105.

Las Figuras N° 104 y 106, muestran la comparación de los resultados obtenidos, entre ETABS y MATLAB para cada periodo fundamental de vibración.

Para la comparación de resultados se buscó una forma de cuantificar el grado de dispersión de los resultados obtenidos, por lo tanto han sido evaluados mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson, este índice mide la relación lineal entre variables aleatorias cuantitativas, definido de la siguiente manera:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \sigma_X)(Y - \sigma_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

$\sigma_{XY}$  = Covarianza de (X, Y).

$\sigma_X$  = Desviación típica de la variable X.

$\sigma_Y$  = Desviación típica de la variable Y.

El primer escenario evaluó los resultados del periodo fundamental de vibración entre el software Etabs y los resultados del algoritmo generado en Matlab (que usa el método de vectores propios) para los cuatro primeros modos de vibración de la estructura.

Tabla N° 64: Resumen de periodos de vibración resultados Etabs y Matlab.

ESTRUCTURA EN VIBRACIÓN LIBRE				
MODO DE VIBRACIÓN.	1	2	3	4
Periodo fundamental (seg.) - Etabs	0.100	0.076	0.074	0.060
Periodo fundamental (seg.) - Matlab	0.106	0.078	0.058	0.050

Fuente: Elaboración propia.

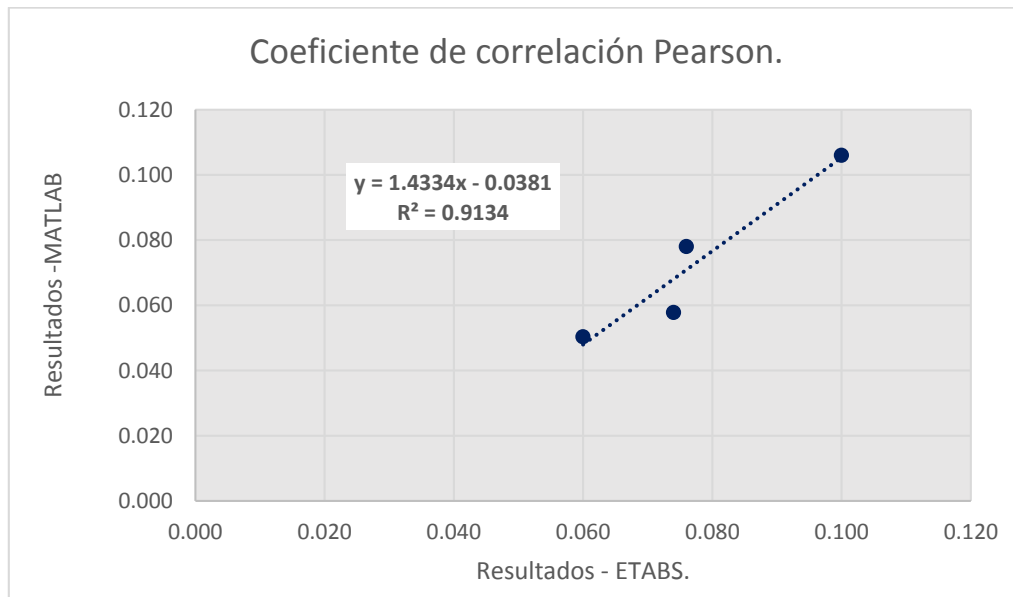
**COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL PEARSON**

**0.95**

El coeficiente es < 1; de lo que se interpreta, que hay una relación directa, de manera tal que una variable aumenta la otra también tratando de compensar.

Como era de esperar este coeficiente refleja, que los periodos de vibración mostrados por Etabs son mayores a medida que aumenta el valor de los periodos mostrados por Matlab, es decir, varían linealmente.

FIGURA N° 105: Coeficiente de Pearson entre los resultados de Etabs y Matlab.



Fuente: Elaboración propia.



Tabla N° 65: Cálculo Estadístico tendencia proporcionalmente lineal

	Periodo fundamental (seg.) - Etabs	Periodo fundamental (seg.)- Matlab
<b>Media</b>	0.08	0.07
<b>Promedio</b>	0.08	0.07
<b>Desviación Típica</b>	0.02	0.02
<b>Varianza</b>	0.0003	0.0006

Fuente: Elaboración propia.

El segundo escenario evaluó los resultados del periodo fundamental de vibración entre el software Etabs y los resultados de solución de la ecuación dinámica mediante el uso de determinantes, para los 7 primeros modos de vibración.

Tabla N° 66: Resumen de periodos de vibración resultados Etabs y solución con determinantes.

POR VIBRACIÓN LIBRE							
MODO DE VIBRACIÓN.	1	2	3	4	5	6	7
<b>Periodo fundamental (seg.)- Etabs</b>	0.100	0.076	0.074	0.060	0.059	0.058	0.057
<b>Periodo fundamental (seg.)- solución con determinantes.</b>	0.206	0.130	0.206	0.130	0.013	0.013	0.006

Fuente: Elaboración propia.

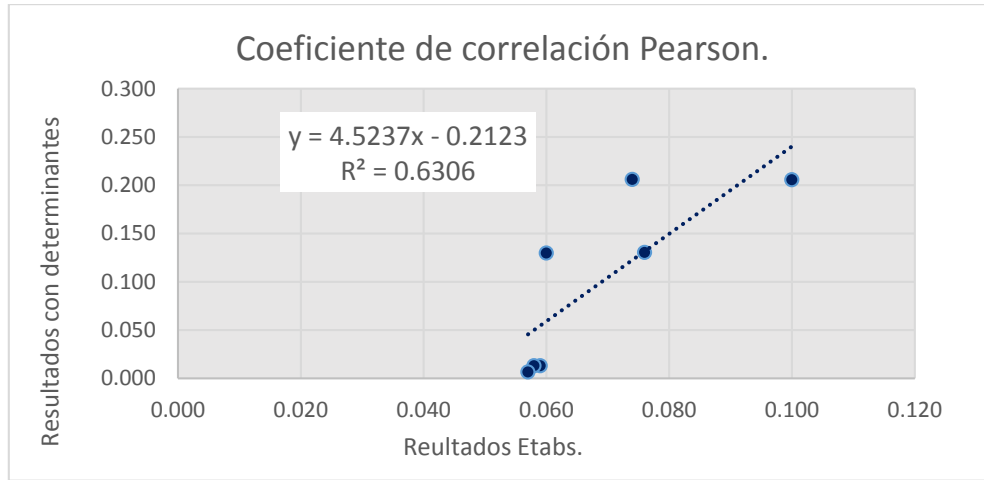
**COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL PEARSON**

**0.7941**

El coeficiente es  $< 1$ ; de lo que se interpreta, que hay una relación directa, de manera tal que una variable aumenta la otra también tratando de compensar.

El grafico de dispersión mostrado a continuación muestra que los valores son parecidos pero están más dispersos de la media de los valores evaluados, a diferencia de la dispersión de datos obtenidos por Matlab.

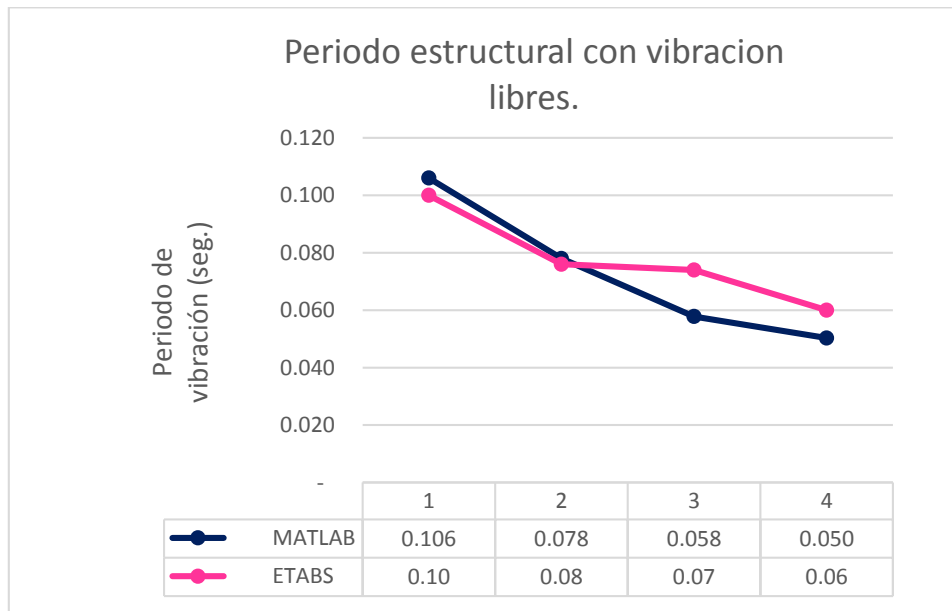
**FIGURA N° 106: Coeficiente de Pearson entre los resultados de Etabs y la solución con determinantes.**



Fuente: Elaboración propia.

Se han escogido los resultados del Matlab y el Etabs por representar una menor dispersión en los datos, donde el periodo oscila 0.10- 0.21 seg. Para los primeros modos de vibración. Éste fenómeno puede observarse en la Figura N° 95.

**FIGURA N° 107: Comparación de periodo fundamental entre resultados Etabs Vs Matlab.**



Fuente: Elaboración propia.

A pesar de las diferencias de la comparación caso a caso de ambos métodos, las relaciones medias entre el periodo son similares (Figura N° 95). Los



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

resultados medios son parecidos y se desarrollan con una misma tendencia, siendo las diferencias ambos métodos del orden de centésimas de segundos. El coeficiente de correlación lineal de Pearson:  $\rho = 0.95$  en el método basado en el análisis modal con solución por vectores propios.



## CAPITULO V: DISCUSIÓN

### De la validación de la hipótesis:

1. ¿Por qué los valores de amortiguamiento para las 3 vibraciones son de magnitudes muy semejantes, que componente en su determinación puede haber influido en la diferencia existente?

En cuanto a los valores de amortiguamiento proporcional Rayleigh no muestran una gran variación ante las diferentes fuentes de excitación, por lo tanto indica que dicho parámetro depende más de las propias características estructurales que de la excitación que se imponga a la estructura. Condición que nos permite señalar que se valida la sub hipótesis N°4. En este sentido, figura N° 94 referida al Amortiguamiento crítico Vs. Modo de Vibración. Nos muestra la condición de amortiguamiento en los 4 modos de vibración para las 3 excitaciones estudiadas, el factor que probablemente ha influido en las diferencias de este parámetro es la masa cuya participación varía para cada modo de vibración y además se incrementa o disminuye según la fuente de excitación que se evalué.

2. ¿Qué consideraciones se han tomado en el estudio para lograr validar la sub hipótesis N°1?

En un primer escenario, en el cual el funcionamiento de los excitadores de vibración es referido a la acción de la turbina hidráulica Francis, se han evaluado los registros físicos generados por su vibración y son mostrados en el capítulo III subíndice 3.5.5.

El análisis se ha basado en considerar el modelo gráfico mostrado en la figura N° 66 de la pág. 159, representando un oscilador dinámico. Se ha podido observar además el comportamiento de la frecuencia de vibración de la turbina Francis, este parámetro toma valores muy similares en el tiempo. Ha permitido caracterizar dicha vibración por una fuerza armónica que actúa sobre la estructura, de la cual se considera que existe proporcionalidad entre la magnitud máxima de la fuerza externa con la



masa del oscilador, la frecuencia circular y un valor de excentricidad que generan en su movimiento. Por lo tanto, si una de las fuentes usadas como la frecuencia angular que genera las vibraciones, es constante también lo será la magnitud de la fuerza de excitación que induce la vibración por Turbina Hidráulica Francis.

3. ¿Son convenientes las características actuales de diseño para la estructura, conociendo la naturaleza de las acciones a las que está sometida?

Dadas las condiciones de rigidez que la estructura presenta, este factor beneficia la respuesta de los parámetros estructurales en términos de desplazamientos máximos, fuerzas cortantes, etc., manteniéndolas en un margen seguro ante las fuentes de excitación que se imponen, incluso ante la sollicitación del sismo de diseño, de la que se han registrado valores de respuesta global y desplazamientos mayores a las otras dos fuentes de vibración, en concordancia con la hipótesis general.

Sin embargo, como consecuencia se tiene el diseño de una estructura costosa, para lograr cubrir la demanda de las fuerzas cortantes que actúan sobre ella.

4. ¿Cuál es la relación que describen las fuerzas que actúan sobre el sistema estructural con respecto a la fuerza que gobierna el diseño?

Ante los resultados de respuesta global del sistema, se ha establecido que el diseño por vibración de turbina Francis o el correspondiente al puente grúa no gobiernan sobre el diseño sísmico, lo que nos permite pensar que se ha adoptado un modelo estructural basado en el código sísmico peruano en concordancia con la sub hipótesis N°5. Teniendo en cuenta que la demanda sísmica está cubierta por el sistema resistente a carga laterales bajo consideraciones de diseño sísmico.



Por lo tanto, la fuerza de diseño ante vibraciones sísmicas puede llegar a ser 1.83 veces mayor que el diseño ante vibraciones por Turbina Hidráulica Francis y 1.41 veces el diseño por Puente Grúa.

#### **Del aporte de la investigación:**

5. Se ha logrado caracterizar numéricamente las vibraciones inducidas por Turbina Hidráulica Francis y por el accionar de un dispositivo del motor de la del Puente Grúa.
6. Se ha establecido una secuencia ordenada y replicable para ejecutar el análisis estructural de una edificación particular, la que es sometida a acciones dinámicas producidas por una Turbina Hidráulica Francis y por el accionar de un dispositivo del Puente Grúa.
7. Se ha insertado en el anexo N°05 la hoja electrónica que permite el cálculo de la distribución de momentos flectores y el comportamiento de líneas de influencia por efecto del puente grúa. Hoja electrónica cuyo funcionamiento se ha validado en la presente investigación.
8. En el anexo N°06 se inserta el algoritmo desarrollado en el software Matlab, el cual ha permitido el análisis modal y la validación de datos del presente estudio.
9. La presente investigación ha implementado el procedimiento de un análisis modal para estimar la demanda ante vibraciones sísmicas, por puente grúa y turbina hidráulica Francis, el que será incluido en el registro de un flujograma.
10. Se ha logrado comprobar en el Anexo N° 01, que la acción de fuerzas de amortiguamiento para un análisis modal no influyen en la determinación del periodo fundamental de vibración de una estructura.

#### **Del contrastaste con el marco teórico:**

11. ¿Qué componente es el que mayoritariamente influye en los parámetros de amortiguación estructural?

Para el amortiguamiento estructural se utilizaron los coeficientes proporcionales a las propiedades de masa y rigidez, los valores de amortiguación tienden a aumentar con la frecuencia, indica una fuerte



proporcionalidad más a la rigidez que a la masa. Del análisis se identifica que el mayor aporte al amortiguamiento proporcional de la estructura lo genera en su mayoría la rigidez de los elementos. Puede interpretarse como la disipación de energía derivada de la deformación de entrepisos.

12. ¿Qué implicancias tienen los valores de relación de frecuencia cercanos a la unidad en el cálculo del factor de amplificación dinámica?

El valor de relación de frecuencia cercano a 1, muestra que la estructura no entra en resonancia ante la excitación por Puente Grúa, y tampoco por Turbina Francis. Como se menciona en el capítulo II en el subíndice 2.2.6.1.4. págs. 55 - 57 del Marco Teórico, dicho factor está definido por un ratio de amortiguación constante y la relación entre frecuencias de excitación y la frecuencia natural de la estructura.

Considerando que la estructura maneja un ratio de amortiguamiento muy bajo y la relación de frecuencias varía para cada modo de vibración, existe la posibilidad que el factor de amplificación dinámica incremente sus valores. Basándonos en la referencia antes mencionada y los resultados obtenidos se entiende que las fuerzas no se incrementen de manera infinita, es decir que la estructura y las fuerzas no entran en resonancia.

13. ¿Cómo se han evaluado las fuerzas inducidas por las vibraciones del puente grúa en el sistema estructural?

Para el caso de excitación por puente grúa las vibraciones son atribuidas al funcionamiento de su motor, está definido como un excitador de vibración electro dinámico que funciona generando un campo de flujo magnético y se asume que este es constante, donde el voltaje que fluye a través del sistema hace posible que la bobina del motor oscile en una frecuencia establecida. En concordancia con el subíndice 2.2.8.3.3. pág. 106 del Marco Teórico, que indica que el valor de amplitud generada por los excitadores es asumida proporcional a la corriente de ingreso,



entonces las características dinámicas de dicho sistema quedan limitadas al valor de las frecuencias de oscilación característicos del funcionamiento del motor.

En cuanto a la fuerza generada, en un principio se ha considerado el análisis de líneas de influencia debido a la carga móvil que representa el puente grúa y por la incertidumbre de ubicar la posición más crítica de la carga en el sistema. Además, la carga que actúa en el sistema se ha considerado como una fuerza de pulso tipo rampa.

El análisis presentado se refiere a un sistema sin amortiguamiento debido a que el efecto de este sobre la respuesta a una excitación de pulso, no suele ser importante ya que el tiempo en el que actúa dicha es fuerza es muy corto y ocurre antes de que actué el amortiguamiento del sistema. En concordancia con los parámetros impuestos por la normativa E - 020, este puente grúa, podría influir con el desbalance de la estructura por carga viva.

#### **De los resultados:**

14. ¿Porque la acción del puente grúa genera mayores periodos de vibración en el modo fundamental respecto a la vibración generada por la vibración de la turbina hidráulica y las vibraciones sísmicas?

En la medida en que los periodos de vibración están determinados en términos de masa y rigidez; ante la acción del puente grúa en la estructura dicho parámetro modifica ligeramente las características intrínsecas iniciales, donde el factor de masa estructural muestra un incremento correspondiente a la masa que impone el sistema del puente grúa, por la relación inversamente proporcional de la masa con respecto al periodo fundamental, este parámetro sufre un ligero incremento de 0.03 seg. Por lo tanto, la excitación por el puente grúa es la fuente ligeramente más significativa en cuanto a variaciones en el periodo fundamental, se entiende que dicha vibración genera periodos fundamentales más energéticos y capaces de movilizar mayor masa del sistema.





15. ¿Por qué no se ha determinado la frecuencia circular de excitaciones sísmicas?

Por el tipo de análisis que se ha realizado, análisis modal espectral, donde no se caracteriza el sismo como una acción; sino este se determina como una envolvente de respuesta espectral de probable ocurrencia, razón por la cual no se ha considerado la frecuencia. Haciendo uso de un espectro de respuesta elástica de diseño, en general un espectro de pseudoaceleraciones, donde se ha establecido un ratio de amortiguamiento de la estructura de 0.05 y para un tipo de suelo tipo roca.

16. ¿Qué significan los valores que toma el factor de amplificación respecto de la carga dinámica y la respuesta estructural?

Las figuras N° 97 y N° 98 referidas al Factor de Amplificación Dinámica del Sistema con Vibraciones por Turbina hidráulica Francis y Vibraciones por Puente Grúa respectivamente. Nos muestran en los primeros modos de vibración que la rigidez del sistema es la que determina la condición de respuesta estructural ya que los valores de relación de frecuencia son menores a 1, la estructura todavía mantiene su integridad. En cambio, por ejemplo para el modo 4 en la respuesta por puente grúa se evidencia que predomina la frecuencia de la fuerza excitatriz, en ninguno de los casos el factor de amplificación muestra condiciones críticas.

17. ¿Qué implicancias tienen los valores de las tablas N° 54 y N° 55 referidas al ángulo de fase del Sistema con Vibraciones por Turbina Francis y Puente Grúa respectivamente?

El ángulo de fase de la estructura muestra que la acción de las fuentes de excitación, ambas no coinciden en el espacio de tiempo ni en el ángulo que describe al iniciar la vibración, por lo tanto las fuentes de



vibración por Puente Grúa y Turbina Francis no se eliminan y tampoco se amplifican. Las tablas nos muestran que los armónicos que representan las acciones dinámicas no son coincidentes en el tiempo por lo que se espera no exista amplificación de carga.

18. ¿Porque la mayor fuerza cortante registrada en el sistema ocurre en el 2° piso para la vibración por turbina Francis?

En la medida en que la turbina se ubica en el 2 nivel, se puede suponer que es la razón por la cual la mayor fuerza cortante se genera en ese piso, adicionalmente por la irregularidad de piso que la estructura presenta en dicho nivel.

19. ¿Que evidencia el grafico de la distribución de fuerzas cortantes Figura N° 102 para los tres casos de excitación estudiados?

Se observa un patrón para las 3 fuerzas, donde desde los 5 – 10 m. hay una creciente, hay un patrón constante que muestra la influencia de los pesos presente en el sistema, más concreto debido al peso por turbina.

La fuerza cortante, registrada para diferentes fuentes de vibración (puente grúa, turbina Francis) en la estructura estudiada, son menores si se comparan con el cortante basal sísmico, el mismo que es desarrollado a partir de la fuerza lateral equivalente a la carga de diseño, de acuerdo con la norma E-030.

20. ¿Con que certeza se pueden adoptar los resultados obtenidos en el análisis realizado con el programa computacional ETABS?

A pesar de haber usado un software de uso comercial, el que ha sido utilizado para el diseño de estructuras importantes en el mundo. En esta investigación se implementando un algoritmo alfanumérico para validar los resultados obtenidos, desarrollado en el software Matlab



basado en el análisis modal, calcula los parámetros dinámicos de una estructura a través del método de valores y vectores propios. Además, calcula los desplazamientos registrados ante excitaciones dinámicas generales que se desarrollan en el tiempo bajo el cálculo de la integral de DUHAMEL, para un sistema amortiguado y que sigue el procedimiento descrito por (Paz, 1992, págs. 80-86). Toma como datos de entrada la masa, la rigidez el número de grados de libertad, el factor de amortiguamiento y una fuerza en función del tiempo.



## CONCLUSIONES:

1. Se logró demostrar parcialmente la hipótesis general que determina que:

***“La magnitud de los parámetros dinámicos del sistema estructural, dispuesto en la Casa de Máquinas de La Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, con respecto a vibraciones inducidas por rotación de la Turbina hidráulica Francis, puente grúa y vibraciones sísmicas toman valores semejantes; los parámetros globales de respuesta estructural son mayores para el caso de vibraciones sísmicas”.***

En las Tablas N° 54, 55, 56, se muestra el resumen de magnitudes registradas para los parámetros dinámicos más representativos. Los resultados demuestran que los parámetros dinámicos de la casa de máquinas no manifiestan diferencias significativas. Por otro lado estos valores si manifiestan leves variaciones en su magnitud.

Con respecto al periodo fundamental de la estructura tiene una variación máxima de 0.029 seg. Correspondiente a la vibración inducida por el puente grúa.

Se considera que la variación de dicho parámetro para el primer modo de vibración ante la acción del puente grúa desencadena la mayor diferencia registrada a comparación de los demás casos estudiados para la excitación por turbina hidráulica Francis y por sismo de diseño. Por ejemplo, comparando el incremento asociado al primer modo con el correspondiente al tercer modo, la excitación por puente grúa alcanza una diferencia 0.029 y 0.010 seg, respectivamente.

Los parámetros globales de respuesta estructural registran mayores magnitudes ante la vibración sísmica, han sido evaluados en función a los valores de desplazamientos máximos, fuerzas cortantes, derivas máximas; que toma la estructura.

Evaluados en términos de fuerza cortante la vibración sísmica resulta ser 1.83 veces la fuerza ante la vibración por Turbina Hidráulica Francis. Mientras, es 1.41 veces la fuerza ante la excitación por Puente Grúa.



2. Se logró demostrar la Subhipótesis N°01, la cual indica:

***“Las características de la vibración inducida por una turbina hidráulica Francis se asemejan a una vibración libre armónica asociadas a su frecuencia vibratoria”.***

Los características de vibración, generada por la rotación de la turbina hidráulica Francis, fueron estudiados, mediante el registro tiempo – historia, ha permitido obtener los parámetros dinámicos de su movimiento, donde se registra una frecuencia ( $f$ ) máxima de 7.5 Hz, con un periodo ( $T$ ) de 0.133 seg, caracterizado por ser un sistema sin amortiguación, su movimiento describe una característica armónica. Por lo tanto, la vibración de la turbina Francis se asemeja a una vibración libre armónica.

Por otro lado, la magnitud de los parámetros dinámicos de vibración de la turbina hidráulica Francis previamente descritos, han sido comparados con la magnitud de los parámetros dinámicos de la propia estructura que muestran ser menores y diferentes a la frecuencia de vibración de la estructura, por lo tanto, se descarta algún caso de resonancia estructural.

Comparando en términos de frecuencia circular la vibración de la turbina hidráulica Francis es 0.255 veces mayor con respecto a la frecuencia de la estructura de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase.

3. Se logró demostrar la Subhipótesis N°02, el cual indica:

***“Las características de la vibración inducida por el puente grúa se asemejan a una vibración libre armónica por ciclos, asociadas a la frecuencia de su motor”.***

Las características dinámicas de la vibración generadas por el Puente Grúa, han sido evaluadas, considerando dicho sistema como un oscilador simple, sin



amortiguamiento, es decir en vibración libre, que muestran los parámetros dinámicos, con una Frecuencia natural de 60 Hz, un Periodo Fundamental de vibración de 0.017 seg. Este sistema carece de amortiguación. Dichos valores están asociados a una velocidad del motor para una carga de izaje máxima de 210 Ton.

Considerando el análisis de dichos parámetros, se ha comprobado que puede considerarse como una vibración armónica por ciclos, asociadas a la frecuencia de su motor.

4. Se logró demostrar la Subhipótesis N°03, la cual indica:

***“Las características de los parámetros de la vibración sísmicas están referidas a los valores que toma la aceleración espectral en el tiempo”.***

Las características de la vibración sísmica ha sido estudiada mediante el análisis del espectro de respuesta de diseño, el que toma en cuenta: la microzonificación sísmica de Cusco en una zona tipo 2, por la importancia de la edificación se le asignó una categoría “A2”, la estructura esta cimentada sobre un suelo firme, considerando las irregularidades en altura, el factor de reducción ha sido afectado, con lo que se calculó una Pseudo aceleración espectral de 0.21 seg para un periodo estructural de 0.10 seg.

Por las observaciones realizadas, la respuesta a la excitación sísmica, no es estacionaria, ni tiene las características de vibraciones por turbina hidráulica Francis o puente grúa.

5. Se logró demostrar la Subhipótesis N°04, la cual indica:

***“En la medida que los parámetros dinámicos de un sistema estructural están en función de sus características de masa y rigidez, las diferentes acciones dinámicas, no determinan diferencias significativas en los valores de los parámetros dinámicos para el sistema estructural de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, obtenidos a***



***partir de las vibraciones por la turbina hidráulica Francis, vibraciones por el puente grúa y vibraciones sísmicas”.***

La magnitud de las diferencias de los parámetros dinámicos mencionados se han evaluado con respecto a las vibraciones libres pues suponen una condición inicial del sistema, teniendo en cuenta cuatro modos de vibración principales correspondientes a cada piso de la estructura, de lo cual se puede observar:

Para ningún modo de vibración las vibraciones sísmicas generan variaciones en el periodo fundamental de la estructura. Para el primer modo las vibraciones por puente grúa, son las registran un leve incremento y difieren en un 0.029 seg. En el segundo modo de vibración, la variación la gobierna la vibración por Puente Grúa, el periodo en los escenarios estudiados, difieren en un rango de 0.005 – 0.009 seg. A diferencia de los casos anteriores, en el tercer modo de vibración, las vibraciones por Turbina Francis muestran un leve incremento en sus diferencias, con una variación de 0.010 seg. Finalmente. Para el cuarto modo los periodos de vibraciones por puente grúa muestran mayor diferencia con 0.008 seg.

Otros parámetros dinámicos de la estructura, tales como la frecuencia estructural toman valores cercanos ( $f_p, f_t, f_s = 0.008 - 0.021$  Hz.), y los valores de amortiguación estructural  $C_p, C_t, C_s = 1121.58, 1168.63, 1045.16$  ton\*seg/m. respectivamente, que también toman valores cortos muy similares, en todos los casos se asumió un ratio de amortiguamiento de  $\xi = 0.05$ ”.

6. Se logró demostrar la subhipótesis N°5, la cual indica:

***“Los parámetros globales de respuesta estructural como fuerza cortante en la base, desplazamientos máximos, y derivas de entrepiso, determinantes para el diseño, corresponden a vibraciones sísmicas”.***



En cuanto a los parámetros de diseño de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica Machupicchu II Fase, Se puede concluir que:

Los valores correspondientes a desplazamientos máximos, son alentadores en el sentido de que entran en el rango establecido por la norma E-030, ante las vibraciones por turbina hidráulica y puente grúa que son transmitidas a la estructura, cumplen las especificaciones estructurales no causan daños graves y tampoco se considera que entran en casos de resonancia. Por otro lado, las vibraciones sísmicas causan un desplazamiento máximo de 2.789 mm. En el último nivel, lugar donde opera el puente grúa. Por lo tanto, causarían mayores desplazamientos, pero no llegarían a sobrepasar los límites establecidos, esto nos indica que el diseño está gobernado por la fuerza sísmica.

En cuanto a los valores máximos de deriva estructural llegan a 0.0006 correspondiente a la vibración sísmica de diseño. Se encuentran que es un valor menor a la deriva máxima admisible en concordancia con la norma E-030, pero existe mucha irregularidad entre los valores de derivas máximas entre pisos que significaría que a pesar de que la estructura no sobre pasa el 0.007 de deriva límite del reglamento en los niveles de piso, si hay daños que serían significativos en los componentes no estructurales tal es el caso de los equipos hidromecánicos, muros divisorios, etc. Lo cual se atribuye a que hay un cambio en la configuración estructural del sistema, pues a partir del piso de mantenimiento hasta el último nivel, se ha dispuesto un sistema mixto, por lo que la rigidez del último piso es inferior a aquella de los pisos inferiores.

El análisis muestra que las respuestas máximas correspondientes a fuerzas cortantes en la base son producidas por vibraciones sísmicas de diseño, con una magnitud de 1768.93 ton, que ocurrieron en el nivel 2°, correspondiente al piso de Turbina.





En general, los valores necesarios para el diseño, son alentadores en el sentido de que entran en el rango establecido por la norma E-030, ante las vibraciones por turbina hidráulica, puente grúa y vibraciones sísmicas.



## RECOMENDACIONES

### Recomendaciones para futuras líneas de investigación:

1. Análisis comparativo de respuesta dinámica ante vibraciones considerando una estructura de acero y una de mampostería.
2. Evaluar la relación entre el periodo fundamental de vibración y la degradación de rigidez en un edificio de concreto armado.
3. Análisis comparativo entre métodos de medición para vibraciones forzadas en una estructura de concreto armado.
4. Análisis comparativo entre métodos de evaluación de los parámetros dinámicos; con vibraciones medidas experimentalmente y el análisis en un modelo matemático para una estructura de concreto armado.
5. Implementar el análisis del comportamiento estructural ante vibraciones como técnica de inspección de servicio en estructuras con algún grado de daño.
6. Evaluar la relación entre el esfuerzo y el nivel vibratorio generado por una vibración forzada para una estructura particular de concreto armado.

### Recomendaciones al replicar esta investigación:

1. Considerar para el análisis modal que los valores atribuidos a las fuerzas de amortiguamiento son mínimas y se pueden despreciar, debido a que el ratio de amortiguamiento que maneja la estructura es muy bajo.
2. Considerando que una máquina con movimiento alternativo, como un motor, es una máquina robusta diseñada para soportar los esfuerzos que generan las explosiones que se producen dentro de ella. Tener en cuenta que se evalúa la severidad vibratoria no para considerar el efecto sobre la máquina misma, sino que considera el efecto que ella tiene en elementos sobre la máquina (bombas, intercambiadores de calor, instrumentos, etc.)



Y los conectados a ella (elementos estructurales, fundaciones, etc.).

3. Considerar la fatiga a la que se exponen los materiales, que surge en consecuencia del patrón de esfuerzos generados, el tipo de carga aplicada, frecuencia de la carga, y cambios de temperatura generados que son situaciones que se replican de manera similar en la casa de máquinas. Por lo tanto, se recomienda el uso de modelos histeréticos más realistas y mejores técnicas numéricas de manera que el cálculo del periodo fundamental sea más preciso.
4. Considerando que existe una normativa internacional para vibraciones en la estructura, tales como: ASA 95-1990 ó ANSI S2.47: "American National Standard". "Vibration of Buildings". "Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings". Se recomienda evaluar si estas entran en los límites permisibles y en caso de sobrepasar dicho límite evaluar la causa.
5. Considerar algún estándar que defina y dé valores numéricos para los límites de exposición a los que puede estar sometido un ser humano. Estos límites establecen valores que permiten cuantificar diferentes efectos de las vibraciones sobre el individuo.

#### **Recomendaciones a la Universidad Andina Del Cusco:**

Con el objetivo de implementar equipos de medición de vibraciones. Se recomienda a la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Andina del Cusco, adquirir los siguientes equipos:

1.- Acelerómetro : Triaxial.

Marca : Güralp.

Modelo : CMG-5T.

Ancho de banda: 0 a 200 Hz.



Se emplean para la medida de aceleración y vibración en múltiples sectores, con el mismo elemento se pueden medir simultáneamente la aceleración o vibración en las tres coordenadas, mientras que con los acelerómetros uniaxiales solo tenemos una coordenada.

2.- Sensores : Uniaxiales.

Marca : Kinematics.

Modelo : FBA-11.

Ancho de banda: 4.5 a 100 Hz.

Sensores sensibles a un amplio espectro de magnitudes. Para monitorear respuestas de aceleraciones y/o desplazamientos, el acelerógrafo es un medidor de movimiento.

3.- Lectores digitales inalámbricos

Marca : HOFSTRAGroup.

Modelo : ALTUS K2.

Ancho de banda: 200 Hz.

Transmiten eficientemente la información adquirida en la prueba realizada a la estructura del movimiento de una superficie o del suelo segundo a segundo. Esto es llamado monitoreo en tiempo real.

4.- Programa Computacional: Antelope Environment. Software.

Para el monitoreo ambiental, diseñado para permitir la comprensión del conjunto de datos e información procesada en tiempo real del monitoreo ambiental.

5.- Software para proceso de señales:

a.- **Scream:** Es una aplicación Windows y Linux para la configuración de mediciones sísmicas con el monitoreo y adquisición de datos en tiempo real.



b.- **SeismoSignal:** Permite procesar de manera eficiente la información de fuertes movimientos, maneja parámetros sísmicos.

Programa computacional para el Análisis Estructural.

c.- **Ruaumoko.**

d.- **SAP.**

6.- Se sugiere además, implementar un curso de programación dirigido al análisis estructural.

7.- Se recomienda la compra de normativas para evaluar los efectos de las vibraciones en las estructuras, tales como: ASA 95-1990 S2.47: "American National Standard", "Vibration of Buildings". "Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings".



## GLOSARIO

- **Aceleración:** Indica la variación de velocidad por unidad de tiempo. esta medida en  $m / \text{seg}^2$ ,  $g$  ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ) o en  $\text{gal} (\text{cm} / \text{s}^2)$ .

$$\left( a = \frac{dx^2}{dt^2} = \ddot{x} \right)$$

- **Acelerograma:** Es una representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un terremoto. Los acelerogramas se caracterizan por ser altamente irregulares y oscilatorios, con pequeñas amplitudes iniciales que crecen rápidamente hasta alcanzar los valores máximos y decrecer igualmente rápido hasta que se detiene el movimiento. Desplazamiento ( $x$ ), velocidad  $v = \frac{dx}{dt}$ .
- **Análisis dinámico:** Comprende el análisis de las fuerzas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones que aparecen en una estructura o mecanismo como resultado de los desplazamientos y deformaciones que aparecen en la estructura.
- **Análisis modal:** Es el proceso de determinación de las características dinámicas inherentes a un sistema mecánico y necesario para la posterior formulación de un modelo matemático del comportamiento dinámico de dicho sistema. Esta modelización dinámica se lleva a cabo en base a los parámetros modales (frecuencias naturales, modos naturales de vibración y relaciones de amortiguamiento) propios del sistema, y que dependen de la distribución de sus características de masa, rigidez y amortiguamiento.
- **Angulo de fase:** Se mide en grados, está definido convencionalmente como un número y menos que  $+180$ . Indica la posición de un punto en el tiempo en un ciclo de onda, el que es definido en  $360^\circ$ , la fase puede ser una expresión relativa del desplazamiento entre o sobre las ondas teniendo las mismas frecuencias.
- **Amortiguación:** ( $c$ ) es la capacidad de disipar o absorber la energía, referida al amortiguamiento viscoso ( $f = c \dot{x}$ ) es medido en  $N \cdot s / m$ .



- **Casa de máquinas:** La Casa de Máquinas concentra los equipos electromecánicos directamente responsables por la producción de la energía. En ella están la caja espiral, la turbina, el generador, el sistema de excitación y el regulador de velocidad.
- **Centro de Gravedad:** El centro de gravedad es el punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas porciones materiales de un cuerpo, de tal forma que el momento respecto a cualquier punto de esta resultante aplicada en el centro de gravedad es el mismo que el producido por los pesos de todas las masas materiales que constituyen dicho cuerpo.
- **Coefficiente de Pearson:** En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.
- **Deriva de piso:** Es la deformación relativa que sufre un piso en particular por la acción de una fuerza horizontal, calculado como la diferencia entre el desplazamiento del extremo superior y el desplazamiento del extremo inferior del piso, no está reglamentado cual es la deriva máxima que puede experimentar un edificio; lo que sí está determinado es que el índice de deriva es decir la relación entre la deriva y la altura de un piso no será mayor al 7%, al sobrepasar este límite los elementos no estructurales frágiles que se verían muy afectados en un sismo si la estructura es muy flexible.
- **Discretización:** El comportamiento dinámico y estático de estructuras es comúnmente descrito mediante modelos discretizados, representa la continuidad dada por un conjunto de puntos denominados nudos, cada nudo puede moverse en cierta dirección por lo menos 6, cada componente corresponde a un grado de libertad, en ingeniería sísmica los modelo



discretizados son básicamente elementos finitos (con técnicas de discretización similares) o son representados como sistemas de masa concentrada. Las masas concentradas son modelos donde se representa las masas distribuidas concentradas en los nudos generados.

- **Diafragma estructural:** Elemento estructural, como una losa de piso o cubierta, que transmite fuerzas que actúan en el plano del diafragma hacia los elementos verticales del sistema de resistencia ante fuerzas sísmicas. En un sistema con diafragma estructural o diafragma rígido, la losa de piso no presenta deformaciones sobre su plano.
- **Espectro:** cualquier función de frecuencia o periodo.
- **Espectro de Respuesta:** Se denomina de respuesta ya que lo que mide es cómo responde la estructura a las acciones que se le inducen desde el exterior, en vista de que mide la reacción de una estructura ante la vibración del suelo que la soporta.

Asociado a un acelerograma es una curva que representa la aceleración máxima que experimentaría un oscilador de 1 grado de libertad y de periodo  $T_i$  si se sometiera al citado acelerograma. Un oscilador de periodo  $T_1$  experimentaría una aceleración  $a_1$ ; otro de  $T_2$  tendría  $a_2$  y así sucesivamente. La representación de todas estas parejas de valores  $[T, a]$  constituye un espectro de respuesta.

- **Excitación:** (valor de entrada), representan las acciones dinámicas como pueden ser los: sismos, cargas sinusoidales, triangulares.
- **Frecuencia natural:** Un sólido alterado de su posición de descanso tiende a vibrar a ciertas frecuencias denominadas naturales o resonantes cuando éste es excitado. Para cada frecuencia natural, el sólido adquiere una determinada forma denominada forma modal. El análisis de frecuencia calcula las frecuencias naturales y las formas modales asociadas.
- **Masa:** (m);  $F=m \cdot a$ , es muy común medir en Kg (SI).





- **Método de elementos finitos:** Es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales, que caracterizan el comportamiento físico del problema. Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.
- **Modelo estructural:** Es la representación física, mecánica y numérica de una estructura actual
- **Módulo de elasticidad:** Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material.
- **Momento de Inercia:** El momento de inercia refleja la distribución de masa de un cuerpo o de un sistema de partículas en rotación, respecto a un eje de giro. El momento de inercia sólo depende de la geometría del cuerpo y de la posición del eje de giro; pero no depende de las fuerzas que intervienen en el movimiento.
- **Movimiento Armónico Simple (M.A.S.):** Movimiento vibratorio armónico simple (M.V.A.S.), es un movimiento periódico, y vibratorio en ausencia de fricción, producido por la acción de una fuerza recuperadora que es directamente proporcional a la posición. Y que queda descrito en función del tiempo por una función senoidal (seno o coseno). Si la descripción de un movimiento requiriese más de una función armónica, en general sería un movimiento armónico, pero no un (M.A.S).
- **Parámetros Dinámicos:** Son aquellos que describen las magnitudes físicas constantes que describen el comportamiento de un sistema, se pueden clasificar, dependiendo de su naturaleza, en parámetros



cinemáticos y dinámicos, Los parámetros cinemáticos definen la geometría del sistema.

- **Periodo Fundamental:** Es el tiempo que esta toma en dar un ciclo completo, cuando experimenta vibración no forzada. Su determinación es primordial porque de él depende la magnitud de la fuerza sísmica que experimentara la estructura, se han desarrollado fórmulas que permiten hacer un cálculo aproximado del periodo del edificio con el propósito de estimar las fuerzas sísmicas.
- **Puente grúa:** Es un tipo de grúa que se utiliza en fábricas e industrias, para izar y desplazar cargas pesadas, permitiendo que se puedan movilizar piezas de gran porte en forma horizontal y vertical.
- **Propiedades modales:** Identifica propiedades como: las frecuencias naturales de cada modo, ratios de amortiguamiento, masa generalizada y rigidez
- **Respuesta:** (Dato de salida), en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración.
- **Rigidez:** (k,C) puede ser ambos  $f = k * x$  (N/m).
- **Señal:** Cualquier función de tiempo (expresada en gráficos llamados acelerogramas).
- **Señal armónica:** puede ser representada por una función seno o coseno,  $A \cos wt$  o  $A \text{seno } wt$ ; A es la amplitud; w frecuencia (rad/seg.);  $f = 2 * \pi / w$  (Hz o  $\text{seg}^{-1}$ ); periodo  $T = 1 / f$  (seg).
- **Sistema Estructural:** Elementos estructurales interconectados que en conjunto cumplen la función de transmisión de cargas al suelo.
- **Turbina Hidráulica Francis:** La turbina Francis fue desarrollada por James B. Francis. Se trata de una turbo máquina motora a reacción y de flujo mixto. Una Turbina hidráulica es una turbo máquina motora hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que, transferido mediante un



eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica.

- **Las variables aleatorias:** suelen tomar valores reales, pero se pueden considerar valores aleatorios como valores lógicos, funciones o cualquier tipo de elementos (de un espacio medible). El término elemento aleatorio se utiliza para englobar todo ese tipo de conceptos relacionados. Un concepto relacionado es el de proceso estocástico, un conjunto de variables aleatorias ordenadas (habitualmente por orden o tiempo).
- **Vectores propios:** Es un tipo de ecuación producto de un análisis modal, la interpretación física de vectores propios y valores propios los que vienen a representar las frecuencias y los correspondientes modos de vibración de resolver el sistema, teniendo como preferencia las frecuencias más bajas porque pueden ser los modos más representativo en los que el objeto vibrará y que dominará los las frecuencias modales más altas.
- **Vibración:** Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio), Generan movimientos de menor magnitud que las oscilaciones en torno a un punto de equilibrio, el movimiento es periódico (o cuasi periódico) de mayor frecuencia que las oscilaciones pueden ocasionar fatiga de materiales.
- **Ondas:** Una vibración puede definir las características necesarias y suficientes que caracterizan un fenómeno como onda. En una onda, la energía de una vibración se va alejando de la fuente en forma de una perturbación que se propaga en el medio circundante (Hall, 1980: 8).
- **Oscilación:** Son de una amplitud mucho mayor; así por ejemplo, al caminar, nuestras piernas oscilan. En las oscilaciones, en general, hay conversión de energías cinética en potencial gravitatoria y viceversa, mientras que en las vibraciones hay intercambio entre energía cinética y energía potencial elástica.

**BIBLIOGRAFÍA:**

- ALEX H. BARBAT. (s.f.). *Cálculo sísmico de las estructuras*. Barcelona : Editores técnicos asociados.
- Amrhein, J. E. (s.f.). *Reinforced Masonry Engineering Handbook: Clay and Concrete Masonry*. New York.
- BAKHTERI, J. (2003). GENERATOR LOADS STUDY OF A HYDROELECTRIC POWERHOUSE STRUCTURE. . *JOURNAL TEKNOLOGI*, 30.
- Balachandran, B. (2006). *VIBRACIONES*. Mexico: Editorial: Thomson.
- Barbat., M. B. (2008). *Diseño Sismoresistente de Estructuras*. Lima: Editorial: ICG.
- CASSANO, A. M. (2009). *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS BAJO ACCIONES DINÁMICAS*. Panamá: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional - edUTecNe.
- Charles, J. (1979). *Practical vibration Primer*.
- CHOPRA, A. K. (2014). *DINAMICA DE ESTRUCTURAS*. MEXICO: Ed. PEARSON.
- Departamento de Ingeniería Civil- Universidad de Chile. (OTOÑO de 2012). LINEAS DE. *Análisis de estructuras isostáticas*.
- Dominguez, S. U. (1987). *Maquinas Hidraulicas*. España: Editorial: Club Universitario.
- HARBIN ELECTRICAL MACHINERY COMPANY LIMITED. (julio de 2015). Turbine Structure Training. Cusco.
- HIBBELER, R. C. (2006). *Mecánica de materiales*. México: PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA, S.A.
- Ing Nicola Tarque, I. C. (2003). Análisis sísmico de edificaciones. *Curso internacional de Estructuras*. Quito: Ecuador.



- Jaime de la Colina y Jesús Valdés. (2010). PÉNDULO DE PRUEBA PARA EL ESTUDIO DINÁMICO DE MODELOS ESTRUCTURALES. En J. d. Valdés. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
- Ketchikan Public Facilities. (10 - 2010). Live uniform loads. En *Manual del criterio de diseño para la central hidroelectrica del rio Whitman* (pág. 22). Ketchikan, Alaska.: HATCH.
- Latorre, E. (1996). *Gruas*. españa: Editorial: Publidisa.
- lebed, I. A. (s.f.). *Advanced Methods of Structural Analysis*.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, C. Y. (enero de 2014). Proyecto de la norma E030 Diseño Sismoresistente .
- Navarro, A. d. ( Julio de 2013). RELACIÓN ENTRE EL PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN Y EL ÍNDICE DE DAÑO DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO. Barcelona.
- Ortiz, J. D. (2006). *Mecanica de Fluidos e Hidraulica*. COLOMBIA: Edltorial: Univalle.
- OSCAR MANUEL GONZALEZ CUEVAS. (2003). *Análisis estructural*. Mexico: LIMUSA .
- Paz, M. (1992). *Dinamica Estructural Teoria y Calculo*. mexico: Edotorial: Reverte.
- Recarey Morfa, P. S. (julio de 2011). *Formulación de un método de distribución de fuerzas horizontales en edificios con entrepisos flexibles. Método RNA*. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2011000200005>
- Reyes, E. G. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Colombia.



- Saavedra, P. N. (2007). LA MEDICION Y ANALISIS DE LAS VIBRACIONES COMO TECNICA. Casilla 160 - Concepción, Chile: Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción,.
- SAMPIERI, R. H. (1999). *METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN*.
- Torre, T. E. (2005). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado*. Lima: Fondo Editorial PUCP.
- Universidad Pública de Navarra. (2003). GUÍA PARA LA ADECUACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS EN PUENTES GRÚA. Navarra: Ona Industria Gráfica.
- Wakabayashi, M. (1988). *Diseño de Estructuras Sismoresistentes* . Mexico: McGRAW-HILL.
- Wilson, E. (2014). MODULO II: Diseño Sismoresistente. *Diplomado de Especialización en Ingeniería Estructural*.

**LINK GRAFÍA:**

- Advanced Mechanical Engineering Solutions. (12 de 2015). SINUSOIDAL (SINE) MOTION CALCULATOR (VIBRATION CALCULATOR). Obtenido de SINUSOIDAL (SINE) MOTION CALCULATOR (VIBRATION CALCULATOR):  
<http://www.amesweb.info/SinusMotion/SinusMotion.aspx>
- Alonso, F. M. (2013). *Estructuras Sismoresistente: analisis modal espectral*. Recuperado el 2015, de <https://xfma.wordpress.com/2013/02/19/estructuras-sismoresistentes-analisis-modal-espectral-capitulo-2/>.
- Bhattacharjee, S. (2013). *Mechanism of Earthquake Forces & Methods of Resisting Seismic and Wind Forces* . Recuperado el 2015, de <http://seasoft022.blogspot.com/2013/05/mechanism-of-earthquake-forces-methods.html>
- BINACIONAL ITAIPU. (s.f.). *ITAIPU BINACIONAL*. Obtenido de <http://www.itaipu.gov.py/es/energia/casa-de-maquinas>
- Charleson, A. (septiembre de 2012). *RED INTERNACIONAL PARA EL DISEÑO DE CIUDADES SÍSMICAMENTE RESILIENTES*. Obtenido de [http://15wceesslatin.blogspot.com/2012\\_08\\_01\\_archive.html](http://15wceesslatin.blogspot.com/2012_08_01_archive.html)
- DAVID CHILDS. (07 de 09 de 2010). BRIDGE DESIGN AND ASSESMENT. . Obtenido de <http://www.bridgedesign.org.uk/tutorial/tuil.html>
- ECURED. (18 de 04 de 2015). *Turbina hidráulica*. Obtenido de [http://www.ecured.cu/index.php/Turbina\\_hidr%C3%A1ulica](http://www.ecured.cu/index.php/Turbina_hidr%C3%A1ulica)
- LEARN ENGINEERING. (2013). *TURBMACHINERY*. Obtenido de <http://www.learnengineering.org/>



- MetAs S.A. de C.V. (julio de 2003). ¿Que son las vibraciones mecanicas? Obtenido de <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-03-07-Vib.pdf>
- RAMOS EMILIANI & RINCÓN RUBIANO, N. S. (2012). ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE TRES EDIFICIOS DE. Obtenido de <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/11117/1/EmilianiRamoNicolasSimon2012.pdf>
- Recarey Morfa, P. S. (julio de 2011). *Formulación de un método de distribución de fuerzas horizontales en edificios con entresijos flexibles. Método RNA*. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2011000200005>
- transrem. (2013). ABUS . kransysteme. Obtenido de <http://www.transrem.com.pl/?id=oferta&kat1=240&kat2=262&kat3=268&show=268>
- U.S. Army Corps of Engineers (U.S. Army Corps of Engineers) [Public domain]. (2012). *Water Turbine*. Obtenido de [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Water\\_turbine.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Water_turbine.jpg)
- UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. (2012). *PUENTE GRUA*. Obtenido de <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20l/puente%20grua.htm>.



## ANEXOS

## ANEXO N°01

## CÁLCULO DEL PARÁMETROS DINÁMICOS: MÉTODO DE SOLUCIÓN POR DETERMINANTES EN LA ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

## PROPIEDADES ESTRUCTURALES IDEALIZADAS.

Matriz de masa (Ton\*seg<sup>2</sup>/m.):

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

Matriz de rigidez: (Ton/m)

$$K = \begin{bmatrix} K_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 \end{bmatrix}$$

Ecuación dinámica de movimiento sin amortiguamiento:

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

$$\det |K - \omega^2 M| = 0$$

K = matriz de rigideces de los entrepisos.

M= matriz de masas.

 $\omega$  = frecuencias de vibración.

La ecuación característica que se obtiene:

$$\det \begin{vmatrix} -107x^2+2439390 & -1351380 & -1351380 & 0 \\ -1351380 & -133x^2+2702760 & -118x^2+1531766 & 0 \\ 0 & -1351380 & -180387 & -180386 \\ 0 & 0 & 0 & -113x^2+180386 \end{vmatrix}$$

$$1.9 \text{ E}+08 y^8 - 1.15 \text{ E}+10 y^7 - 1.07 \text{ E}+11 y^6 + 3.6 \text{ E}+14 y^5 + 1.6 \text{ E}+16 y^4 - 2.04 \text{ E}+18 y^3 - 5.03 \text{ E}+20 y^2 + 1.19 \text{ E}+20 y + 3.58 \text{ E}+20$$

Resolviendo la ecuación anterior se tienen las siguientes raíces correspondientes a la frecuencia de vibración.



$$\gamma_n = \omega_n = \text{Frecuencia angular } \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}}\right).$$

- $\omega_1 = 206.86;$                        $\omega_2 = 143.57;$                        $\omega_3 = -171.88$
- $\omega_4 = -125.09$                        $\omega_5 = 60.419$                        $\omega_6 = 30.715$
- $\omega_7 = -54.47$                        $\omega_8 = -29.262$

7. Se asumirá un amortiguamiento inferior al crítico pues  $C < C_c$

$$C_c = 2 * \xi * \sqrt{km}$$

$C_c$  = Amortiguamiento viscoso

$\xi$  = Relación de amortiguamiento = 0.05

K = Rigidez.

M = Masa.

RELACIÓN AMORTIGUAMIENTO CRITICO - (Ton*s/m.) - $\xi = 0.05$	
<b>C1 =</b>	1,315.61
<b>C2 =</b>	1,476.31
<b>C3 =</b>	1,384.78
<b>C4 =</b>	431.07

Matriz de amortiguamiento (Ton/seg.)

$$c = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ -C_2 & C_2 + C_3 & -C_3 & 0 \\ 0 & -k_3 & C_3 + C_4 - C_4 & \\ 0 & 0 & -C_4 & C_4 \end{bmatrix}$$

MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO VISCOSO- subcritico				
C =	2791.92	-1476.31	0.00	0.00
	-1476.31	2861.09	-1384.78	0.00
	0.00	-1384.78	1815.85	-431.07
	0.00	0.00	-431.07	431.07

$$|\omega^2 M + C\omega + K| = 0$$

K = matriz de rigideces de los entrepisos.

M= matriz de masas.

C=matriz de amortiguamiento.

$\omega$  = frecuencias de vibración.

Se obtiene una ecuación característica:

$$1.9 \text{ E}+08 y^8 - 1.09 \text{ E}+11 y^6 + 1.6 \text{ E}+16 y^4 - 5.37 \text{ E}+20 y^2 + 3.58 \text{ E}+20$$

Resolviendo la ecuación anterior se tienen las siguientes raíces:

$$y_n = \omega n = \text{Frecuencia angular} \left( \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right).$$

$$\omega_1 = 485.93 + 808.81i$$

$$\omega_2 = 485.93 - 808.81i$$

$$\omega_3 = -972.07$$

$$\omega_4 = +/- 48.502$$

$$\omega_5 = +/- 30.517$$

- Se calcula la Frecuencia natural del ciclo  $f = 1/w$ . (seg-1 o Hz).
- Se calculará el periodo estructural con la relación entre la frecuencia angular  $T = 2\pi/w$  (seg).

Tabla N° 67: Cálculo de la Frecuencia Natural y Periodo Estructural con Análisis Modal.

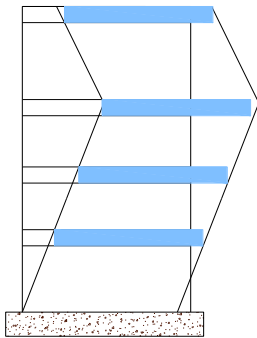
Fuente: Elaboración propia.

NO AMORTIGUADO			AMORTIGUADO		
Frecuencias circulares ( $\omega$ )	Periodo Estructural (T)	Frecuencia Natural (f)	Frecuencias circulares ( $\omega$ )	Periodo Estructural (sec.)	Frecuencia Natural (f)
rad/sec.	sec.	seg <sup>-1</sup> ó Hz.	rad/sec	sec.	seg <sup>-1</sup> ó Hz.
(1)= $\det   k - m\omega^2  $	(2) $T = \frac{2\pi}{\omega a}$	(3)=1/(2)	(4)= $\det   m\omega a^2 + C\omega a + k  $	(5) $Ta = \frac{2\pi}{\omega a}$	(6)=1/(5)
206.86	0.03	32.92	485.93 + 808.81i	0.01	77.19
143.57	0.04	22.85	485.93 - 808.81i	0.01	77.19
-171.88	0.04	27.36	-972.07	0.01	154.71
-125.09	0.05	19.91	48.50	0.13	7.72
60.42	0.10	9.62	30.52	0.21	4.86
30.72	0.20	4.89	-48.25	0.13	7.68
-54.47	0.12	8.67	-30.56	0.21	4.86
-29.26	0.21	4.66			
<b>PROMEDIO</b>	0.10	10.01		0.1005	9.9483

c).- Análisis de la prueba:

Se puede ver que la parte imaginaria de los modos obtenidos es nula, al tener valores similares en ambos casos, el sistema resulta ser un caso de amortiguamiento clásico. El amortiguamiento de la estructura es una combinación lineal de la masa y la rigidez, y sus vectores característicos son iguales a los de un sistema no amortiguado.

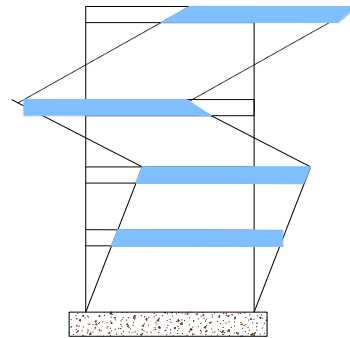
**ANÁLISIS DE FORMA MODAL POR LA SOLUCIÓN DE DETERMINANTES  
EN LA ECUACIÓN DINÁMICA.**



**MODO 1**

$\omega = 206.86 \text{ rad/sec.}$

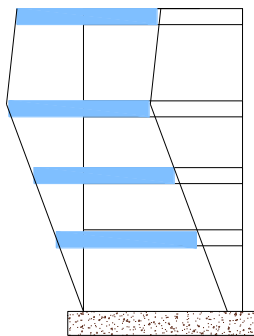
$T = 0.03 \text{ sec.}$



**MODO 2**

$\omega = 143.57 \text{ rad/sec.}$

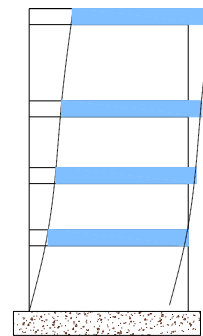
$T = 0.04 \text{ sec.}$



**MODO 3**

$\omega = 60.412 \text{ rad/sec.}$

$T = 0.1040 \text{ sec.}$



**MODO 4**

$\omega = 30.71 \text{ rad/sec.}$

$T = 0.20 \text{ sec.}$

**ANEXO N°02****CÁLCULO DEL PARÁMETROS DINÁMICOS: RESULTADOS EN ETABS****SISTEMA ESTRUCTURAL CON VIBRACIÓN POR TURBINA FRANCIS**

<b>Masa Turbina Hidráulica Francis</b>	<b>=</b>	185.00	Ton* m/sec ^2.
<b>Aceleración de la gravedad</b>	<b>=</b>	9.80	m/sec ^2.
<b>Masa</b>	<b>=</b>	18.88	Ton* sec ^2./m

Tabla N° 68: Periodo Estructural con Vibraciones por Turbina Francis.

Modo	Periodo Estructural	Frecuencia Natural	Frecuencia Circular
	sec	cyc/sec	rad/sec
1	0.106	9.465	59.472
2	0.076	13.139	82.557
3	0.074	13.542	85.085
4	0.065	15.356	96.487
5	0.061	16.509	103.731
6	0.059	16.809	105.618
7	0.058	17.217	108.178
8	0.046	21.836	137.1983
9	0.046	21.853	137.3074
10	0.044	22.667	142.4184
11	0.043	23.43	147.2178
12	0.042	23.711	148.9775

Fuente: Resultados ETABS.

**SISTEMA ESTRUCTURAL CON VIBRACIÓN POR PUENTE GRÚA**

<b>Peso del Puente Grúa</b>	=	294	Ton.
<b>Aceleración de la gravedad</b>	=	9.8	m / sec ^2.
<b>Masa</b>	=	30	Ton* sec ^2./m.

Tabla N° 69: Periodo Estructural con Vibraciones por Puente Grúa.

Modo	Periodo Estructural	Frecuencia Natural	Frecuencia Circular
	sec	cyc/sec	rad/sec
1	0.116	8.611	54.103
2	0.076	13.139	82.5567
3	0.074	13.532	85.0263
4	0.067	14.842	93.2553
5	0.064	15.525	97.5436
6	0.06	16.645	104.5806
7	0.058	17.204	108.0941
8	0.046	21.837	137.2062
9	0.045	22.418	140.8582
10	0.044	22.486	141.2849
11	0.043	23.423	147.1729
12	0.042	23.659	148.6515

Fuente: Resultados ETABS.

**SISTEMA ESTRUCTURAL CON VIBRACIÓN SÍSMICA**

Tabla N° 70: Periodo Estructural con Vibración Sísmica.

Modo	Periodo Estructural	Frecuencia Natural	Frecuencia Circular
	sec	cyc/sec	rad/sec
1.00	0.10	10.05	63.12
2.00	0.08	13.14	82.56
3.00	0.07	13.55	85.11
4.00	0.06	16.60	104.30
5.00	0.06	16.90	106.18
6.00	0.06	17.16	107.81
7.00	0.06	17.51	110.02
8.00	0.05	21.84	137.21
9.00	0.05	22.44	141.00
10.00	0.04	22.79	143.20
11.00	0.04	23.43	147.24
12.00	0.04	23.76	149.29

Fuente: Resultados ETABS.

**Comentario:**

Se ha calculado las propiedades básicas modales de la estructura. Para los tres escenarios analizados de vibración por Turbina Francis, Puente Grúa y Sísmica, el primer periodo fundamental de vibración de la estructura registran cantidades de 0.106, 0.116 y 0.10 seg. Respectivamente. La masa efectiva indica que el primer modo es predominante es traslacional en la dirección en X, el segundo modo es traslacional en la dirección Y, en el tercer modo es predominante torsional.

Para el análisis fueron tomados en cuenta de los 18 modos de vibración (como la suma de la masa modal efectiva referida al 100% de la masa total de la estructura.)



**ANEXO N°03**

**PARÁMETROS DE RESPUESTA GLOBAL – RESULTADOS MATLAB.**

**ANÁLISIS DE MÁXIMA RESPUESTA DEL SISTEMA CON VIBRACIÓN POR TURBINA FRANCIS – RESULTADOS ETABS.**

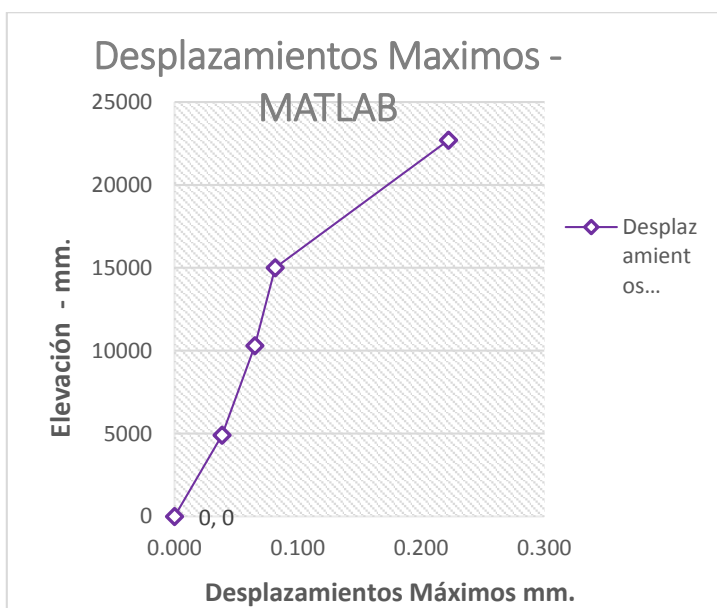
	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL</b>	
	Desplazamiento máximo de piso.	
Lugar :	CASA DE MAQUINAS CH. MACHUPICCHU.	
Fecha :	10 / 07 / 2015.	
Observación :		

$$[M]\{X\} + [C]\{X\} + [K]\{X\} = \{ Pt \}$$

Tabla N° 71: Desplazamientos por Turbina Hidráulica Francis Resultados - Matlab.

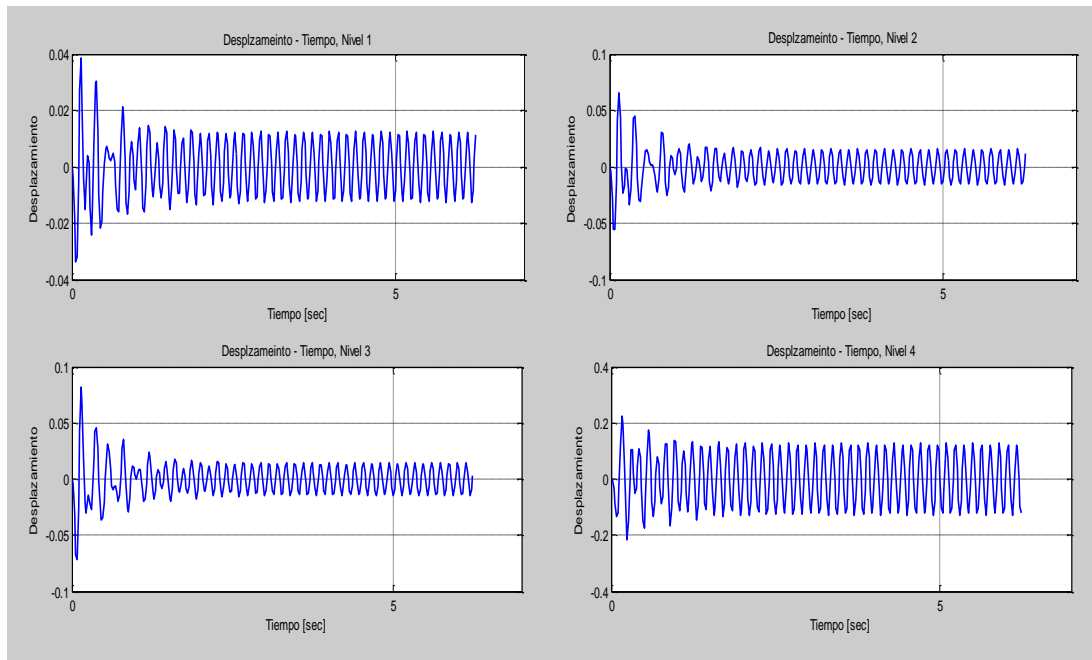
N° Piso	Elevación - mm.	Desplazamiento (mm).			Tiempo - seg.
		Máximo.	Tiempo - seg.	Mínimo	
4	22700	0.222	1.080	-0.034	0.24
3	15000	0.082	1.060	-0.056	0.08
2	10300	0.065	1.060	-0.071	0.06
1	4900	0.038	1.060	-0.215	0.06
Base	0	0	0	0	

FIGURA N° 108: Desplazamientos por Turbina Hidráulica Francis Resultados - Matlab.



Fuente: elaboración Matlab.

**FIGURA N° 109: Desplazamientos por nivel – Turbina Hidráulica Francis - Matlab.**



Fuente: Elaboración Matlab.

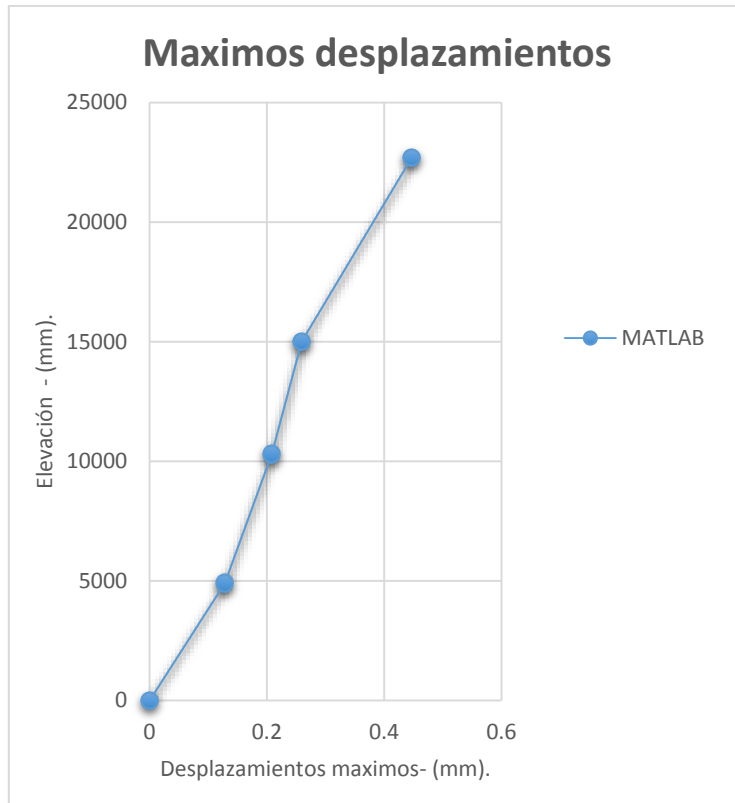
**ANÁLISIS DE MÁXIMA RESPUESTA DEL SISTEMA CON VIBRACIONES POR PUENTE GRÚA**

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>	
	<b>CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL</b>	
	Desplazamiento máximo de piso.	
Lugar :	CASA DE MAQUINAS CH. MACHUPICCHU.	
Fecha :	10 / 07 / 2015.	
Observación :		

**Tabla N° 72: Desplazamientos por Puente Grúa Resultados - Matlab.**

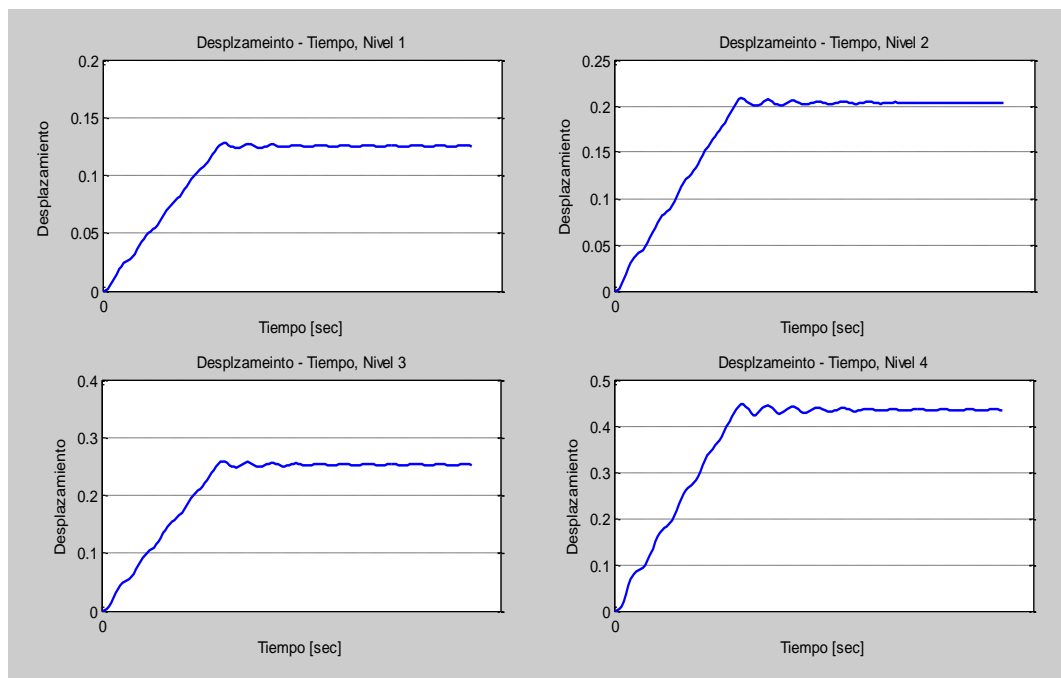
N° Piso	Elevación - (mm).	Desplazamiento			
		Máximo.	Tiempo - (seg).	Mínimo	Tiempo - (seg).
4	22700	0.44715	0.16	-0.033791	0.24
3	15000	0.25919	0.14	-0.055515	0.08
2	10300	0.20822	0.14	-0.071341	0.06
1	4900	0.12819	0.14	-0.21456	0.06
Base	0	0		0	

FIGURA N° 110: Desplazamientos por Puente Grúa Resultados - Matlab.



Fuente: Elaboración Matlab

FIGURA N° 111: Desplazamientos por nivel - Puente Grúa - Matlab.



Fuente: Resultados Matlab.



ANEXO N°04

PARÁMETROS DINÁMICOS - RESULTADOS EN MATLAB

Resultados de análisis Modal, Varios grados de libertad [edificio cortante] - Matlab, Vibraciones por Turbina Francis.

Matriz de Masa:

Matrix of Mass with values: 107.54, 0, 0, 0, 0, 133.74, 0, 0, 0, 163.33, 0, 0, 0, 0, 113.87

Matriz de Rigidez:

Matrix of Rigidity with values: 2.44E+06, -1.35E+06, 0, 0, -1.35E+06, 2.70E+06, -1.35E+06, 0, 0, -1.35E+06, 1.53E+06, -1.80E+05, 0, 0, -1.80E+05, 1.80E+05

Modo - 1

Table for Mode 1: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 2

Table for Mode 2: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 3

Table for Mode 3: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 4

Table for Mode 4: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Eigenvector:

Eigenvector matrix with 4 columns and 4 rows of values

Eigenvalue:

- 29.888
57.202
133.69
188.07

Historia de Desplazamiento de piso en cada punto de tiempo: Resultados de análisis Modal - Matlab, Vibraciones por puente grúa.

Table with 5 columns: Tiempo, 1°, 2°, 3°, 4°. Rows show displacement in mm at various time intervals from 0.000 to 0.080.



ESTRUCTURAL DE LA CASA DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

0.100	-0.005	-0.013	-0.026	-0.120
0.120	0.027	0.041	0.043	-0.023
0.140	0.038	0.065	0.082	0.123
0.160	0.022	0.044	0.066	0.222
0.180	-0.004	0.002	0.018	0.195
0.200	-0.015	-0.023	-0.022	0.044
0.220	-0.007	-0.017	-0.030	-0.134
0.240	0.004	-0.002	-0.020	-0.215
0.260	0.002	-0.002	-0.015	-0.150
0.280	-0.014	-0.020	-0.022	-0.005
0.300	-0.024	-0.033	-0.027	0.104
0.320	-0.015	-0.020	-0.014	0.102
0.340	0.009	0.014	0.016	0.019
0.360	0.029	0.043	0.042	-0.050
0.380	0.030	0.045	0.046	-0.035
0.400	0.013	0.021	0.027	0.047
0.420	-0.010	-0.010	-0.002	0.110
0.440	-0.021	-0.030	-0.025	0.080
0.460	-0.019	-0.031	-0.036	-0.035
0.480	-0.009	-0.020	-0.034	-0.150
0.500	0.001	-0.006	-0.021	-0.172
0.520	0.006	0.007	0.000	-0.076
0.540	0.007	0.014	0.021	0.074
0.560	0.005	0.015	0.031	0.174
0.580	0.003	0.011	0.025	0.157
0.600	0.002	0.005	0.009	0.042
0.620	0.004	0.002	-0.006	-0.085
0.640	0.005	0.002	-0.010	-0.134
0.660	0.002	0.000	-0.007	-0.081
0.680	-0.006	-0.008	-0.007	0.020
0.700	-0.015	-0.019	-0.013	0.080
0.720	-0.016	-0.022	-0.020	0.055
0.740	-0.006	-0.011	-0.014	-0.028
0.760	0.010	0.012	0.005	-0.087
0.780	0.021	0.030	0.027	-0.061
0.800	0.018	0.029	0.035	0.037
0.820	0.003	0.010	0.021	0.125
0.840	-0.013	-0.014	-0.005	0.123
0.860	-0.017	-0.025	-0.026	0.020
0.880	-0.008	-0.018	-0.029	-0.110
0.900	0.004	-0.001	-0.015	-0.166
0.920	0.009	0.010	0.002	-0.102
0.940	0.004	0.008	0.012	0.034
0.960	-0.005	-0.001	0.010	0.138
0.980	-0.008	-0.007	0.004	0.134
1.000	-0.002	-0.002	0.000	0.032
1.020	0.008	0.009	0.003	-0.080
1.040	0.014	0.016	0.008	-0.113
1.060	0.009	0.011	0.009	-0.047
1.080	-0.004	-0.003	0.001	0.054
1.100	-0.015	-0.018	-0.011	0.100
1.120	-0.016	-0.022	-0.020	0.051
1.140	-0.006	-0.012	-0.018	-0.052
1.160	0.007	0.006	-0.004	-0.118
1.180	0.015	0.019	0.013	-0.086
1.200	0.012	0.020	0.024	0.024
1.220	0.002	0.008	0.019	0.124
1.240	-0.008	-0.007	0.004	0.134
1.260	-0.010	-0.014	-0.012	0.040
1.280	-0.004	-0.010	-0.018	-0.086
1.300	0.005	0.002	-0.010	-0.146
1.320	0.008	0.009	0.002	-0.095



PARÁMETROS DINÁMICOS - RESULTADOS EN MATLAB

Resultados de análisis Modal, Varios grados de libertad [edificio cortante] - Matlab, Vibraciones por Turbina Francis.

\*\*\*\*\*

Matriz de Masa:

Matrix of Mass with values: 107.54, 0, 0, 0, 0, 133.74, 0, 0, 0, 0, 163.33, 0, 0, 0, 113.87

Matriz de Rigidez:

Matrix of Stiffness with values: 2.44E+06, -1.35E+06, 0, 0, -1.35E+06, 2.70E+06, -1.35E+06, 0, 0, -1.35E+06, 1.53E+06, -1.80E+05, 0, 0, -1.80E+05, 1.80E+05

Modo - 1

Table for Mode 1: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 2

Table for Mode 2: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 3

Table for Mode 3: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 4

Table for Mode 4: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Eigenvector:

Matrix of Eigenvectors with values: 0.02, 0.03, -0.07, -0.06, 0.03, 0.05, -0.03, 0.06, 0.04, 0.05, 0.06, -0.03, 0.08, -0.05, -0.01, 0.00

Eigenvalue:

- 29.888, 57.202, 133.69, 188.07

Historia de Desplazamiento de piso en cada punto de tiempo: Resultados de análisis Modal - Matlab, Vibraciones por puente grúa.

Table of floor displacement over time for 4 floors



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

0.100	-0.005	-0.013	-0.026	-0.120
0.120	0.027	0.041	0.043	-0.023
0.140	0.038	0.065	0.082	0.123
0.160	0.022	0.044	0.066	0.222
0.180	-0.004	0.002	0.018	0.195
0.200	-0.015	-0.023	-0.022	0.044
0.220	-0.007	-0.017	-0.030	-0.134
0.240	0.004	-0.002	-0.020	-0.215
0.260	0.002	-0.002	-0.015	-0.150
0.280	-0.014	-0.020	-0.022	-0.005
0.300	-0.024	-0.033	-0.027	0.104
0.320	-0.015	-0.020	-0.014	0.102
0.340	0.009	0.014	0.016	0.019
0.360	0.029	0.043	0.042	-0.050
0.380	0.030	0.045	0.046	-0.035
0.400	0.013	0.021	0.027	0.047
0.420	-0.010	-0.010	-0.002	0.110
0.440	-0.021	-0.030	-0.025	0.080
0.460	-0.019	-0.031	-0.036	-0.035
0.480	-0.009	-0.020	-0.034	-0.150
0.500	0.001	-0.006	-0.021	-0.172
0.520	0.006	0.007	0.000	-0.076
0.540	0.007	0.014	0.021	0.074
0.560	0.005	0.015	0.031	0.174
0.580	0.003	0.011	0.025	0.157
0.600	0.002	0.005	0.009	0.042
0.620	0.004	0.002	-0.006	-0.085
0.640	0.005	0.002	-0.010	-0.134
0.660	0.002	0.000	-0.007	-0.081
0.680	-0.006	-0.008	-0.007	0.020
0.700	-0.015	-0.019	-0.013	0.080
0.720	-0.016	-0.022	-0.020	0.055
0.740	-0.006	-0.011	-0.014	-0.028
0.760	0.010	0.012	0.005	-0.087
0.780	0.021	0.030	0.027	-0.061
0.800	0.018	0.029	0.035	0.037
0.820	0.003	0.010	0.021	0.125
0.840	-0.013	-0.014	-0.005	0.123
0.860	-0.017	-0.025	-0.026	0.020
0.880	-0.008	-0.018	-0.029	-0.110
0.900	0.004	-0.001	-0.015	-0.166
0.920	0.009	0.010	0.002	-0.102
0.940	0.004	0.008	0.012	0.034
0.960	-0.005	-0.001	0.010	0.138
0.980	-0.008	-0.007	0.004	0.134
1.000	-0.002	-0.002	0.000	0.032
1.020	0.008	0.009	0.003	-0.080
1.040	0.014	0.016	0.008	-0.113
1.060	0.009	0.011	0.009	-0.047
1.080	-0.004	-0.003	0.001	0.054
1.100	-0.015	-0.018	-0.011	0.100
1.120	-0.016	-0.022	-0.020	0.051
1.140	-0.006	-0.012	-0.018	-0.052
1.160	0.007	0.006	-0.004	-0.118
1.180	0.015	0.019	0.013	-0.086
1.200	0.012	0.020	0.024	0.024
1.220	0.002	0.008	0.019	0.124
1.240	-0.008	-0.007	0.004	0.134
1.260	-0.010	-0.014	-0.012	0.040
1.280	-0.004	-0.010	-0.018	-0.086
1.300	0.005	0.002	-0.010	-0.146
1.320	0.008	0.009	0.002	-0.095



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

1.340	0.003	0.006	0.009	0.025
1.360	-0.007	-0.005	0.005	0.117
1.380	-0.011	-0.012	-0.004	0.111
1.400	-0.006	-0.009	-0.008	0.016
1.420	0.006	0.005	-0.002	-0.085
1.440	0.014	0.017	0.009	-0.108
1.460	0.012	0.017	0.016	-0.035
1.480	0.001	0.004	0.011	0.070
1.500	-0.012	-0.013	-0.004	0.116
1.520	-0.015	-0.021	-0.018	0.061
1.540	-0.007	-0.014	-0.020	-0.051
1.560	0.005	0.003	-0.008	-0.128
1.580	0.013	0.016	0.008	-0.102
1.600	0.010	0.016	0.018	0.008
1.620	-0.001	0.004	0.015	0.115
1.640	-0.009	-0.009	0.002	0.133
1.660	-0.009	-0.013	-0.010	0.047
1.680	-0.001	-0.005	-0.012	-0.074
1.700	0.008	0.007	-0.004	-0.134
1.720	0.010	0.012	0.006	-0.085
1.740	0.003	0.006	0.009	0.028
1.760	-0.008	-0.007	0.002	0.114
1.780	-0.013	-0.015	-0.008	0.101
1.800	-0.007	-0.012	-0.012	0.004
1.820	0.004	0.002	-0.006	-0.095
1.840	0.013	0.015	0.007	-0.112
1.860	0.012	0.017	0.016	-0.033
1.880	0.002	0.006	0.014	0.077
1.900	-0.010	-0.009	0.001	0.125
1.920	-0.013	-0.018	-0.013	0.070
1.940	-0.007	-0.012	-0.017	-0.046
1.960	0.005	0.002	-0.009	-0.128
1.980	0.012	0.014	0.006	-0.107
2.000	0.008	0.013	0.015	0.000
2.020	-0.002	0.002	0.012	0.107
2.040	-0.010	-0.010	0.000	0.128
2.060	-0.010	-0.013	-0.010	0.047
2.080	-0.001	-0.004	-0.011	-0.070
2.100	0.009	0.009	-0.001	-0.127
2.120	0.012	0.015	0.009	-0.079
2.140	0.004	0.008	0.012	0.033
2.160	-0.007	-0.006	0.003	0.115
2.180	-0.013	-0.016	-0.009	0.100
2.200	-0.009	-0.013	-0.015	0.000
2.220	0.003	0.000	-0.009	-0.101
2.240	0.012	0.014	0.005	-0.118
2.260	0.012	0.017	0.015	-0.035
2.280	0.002	0.007	0.014	0.078
2.300	-0.009	-0.008	0.002	0.129
2.320	-0.012	-0.016	-0.011	0.075
2.340	-0.006	-0.011	-0.015	-0.042
2.360	0.005	0.003	-0.008	-0.125
2.380	0.012	0.014	0.006	-0.108
2.400	0.008	0.012	0.013	-0.003
2.420	-0.003	0.001	0.010	0.103
2.440	-0.011	-0.012	-0.002	0.124
2.460	-0.010	-0.014	-0.012	0.044
2.480	-0.001	-0.004	-0.011	-0.071
2.500	0.010	0.009	0.000	-0.125
2.520	0.012	0.016	0.011	-0.075
2.540	0.005	0.009	0.013	0.037
2.560	-0.007	-0.005	0.005	0.118





DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

2.580	-0.013	-0.016	-0.009	0.101
2.600	-0.009	-0.014	-0.015	-0.001
2.620	0.002	-0.001	-0.010	-0.103
2.640	0.012	0.013	0.003	-0.121
2.660	0.011	0.016	0.014	-0.038
2.680	0.002	0.006	0.014	0.077
2.700	-0.009	-0.008	0.002	0.130
2.720	-0.012	-0.015	-0.010	0.077
2.740	-0.005	-0.010	-0.014	-0.039
2.760	0.006	0.004	-0.006	-0.123
2.780	0.012	0.014	0.006	-0.106
2.800	0.008	0.012	0.013	-0.003
2.820	-0.003	0.000	0.009	0.101
2.840	-0.011	-0.012	-0.003	0.122
2.860	-0.011	-0.015	-0.013	0.042
2.880	-0.001	-0.005	-0.012	-0.072
2.900	0.010	0.009	-0.001	-0.126
2.920	0.012	0.016	0.011	-0.075
2.940	0.005	0.010	0.014	0.038
2.960	-0.006	-0.005	0.005	0.120
2.980	-0.013	-0.015	-0.008	0.103
3.000	-0.009	-0.014	-0.015	0.000
3.020	0.002	-0.001	-0.010	-0.104
3.040	0.011	0.012	0.003	-0.122
3.060	0.011	0.015	0.013	-0.040
3.080	0.002	0.006	0.013	0.075
3.100	-0.009	-0.008	0.002	0.129
3.120	-0.012	-0.015	-0.010	0.077
3.140	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
3.160	0.006	0.004	-0.006	-0.121
3.180	0.012	0.015	0.007	-0.105
3.200	0.008	0.013	0.014	-0.003
3.220	-0.003	0.000	0.009	0.101
3.240	-0.011	-0.013	-0.003	0.121
3.260	-0.011	-0.015	-0.013	0.041
3.280	-0.001	-0.005	-0.012	-0.073
3.300	0.009	0.009	-0.001	-0.127
3.320	0.012	0.016	0.011	-0.075
3.340	0.005	0.010	0.014	0.039
3.360	-0.006	-0.004	0.006	0.121
3.380	-0.012	-0.015	-0.007	0.104
3.400	-0.008	-0.013	-0.015	0.001
3.420	0.002	-0.001	-0.010	-0.103
3.440	0.011	0.012	0.003	-0.122
3.460	0.011	0.015	0.013	-0.041
3.480	0.001	0.006	0.012	0.074
3.500	-0.009	-0.009	0.002	0.128
3.520	-0.012	-0.015	-0.010	0.077
3.540	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
3.560	0.006	0.004	-0.006	-0.120
3.580	0.012	0.015	0.007	-0.104
3.600	0.008	0.013	0.014	-0.002
3.620	-0.003	0.000	0.009	0.102
3.640	-0.011	-0.013	-0.003	0.121
3.660	-0.011	-0.015	-0.013	0.041
3.680	-0.001	-0.005	-0.012	-0.074
3.700	0.009	0.009	-0.001	-0.127
3.720	0.012	0.016	0.011	-0.076
3.740	0.005	0.010	0.014	0.038
3.760	-0.006	-0.004	0.006	0.121
3.780	-0.012	-0.015	-0.007	0.104
3.800	-0.008	-0.013	-0.014	0.002



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

3.820	0.002	-0.001	-0.010	-0.103
3.840	0.011	0.012	0.003	-0.122
3.860	0.011	0.015	0.013	-0.041
3.880	0.001	0.005	0.012	0.073
3.900	-0.009	-0.009	0.002	0.128
3.920	-0.012	-0.016	-0.010	0.077
3.940	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
3.960	0.006	0.004	-0.006	-0.120
3.980	0.012	0.015	0.007	-0.104
4.000	0.008	0.013	0.014	-0.002
4.020	-0.003	0.001	0.009	0.102
4.040	-0.011	-0.012	-0.003	0.122
4.060	-0.011	-0.015	-0.013	0.041
4.080	-0.001	-0.006	-0.012	-0.074
4.100	0.009	0.009	-0.002	-0.128
4.120	0.012	0.016	0.011	-0.076
4.140	0.005	0.010	0.014	0.038
4.160	-0.006	-0.004	0.006	0.121
4.180	-0.012	-0.015	-0.007	0.105
4.200	-0.008	-0.013	-0.014	0.002
4.220	0.003	-0.001	-0.010	-0.102
4.240	0.011	0.012	0.003	-0.122
4.260	0.011	0.015	0.013	-0.042
4.280	0.001	0.005	0.012	0.073
4.300	-0.009	-0.009	0.001	0.127
4.320	-0.012	-0.016	-0.011	0.077
4.340	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
4.360	0.006	0.004	-0.006	-0.120
4.380	0.012	0.015	0.007	-0.104
4.400	0.008	0.013	0.014	-0.002
4.420	-0.003	0.001	0.010	0.102
4.440	-0.011	-0.012	-0.003	0.122
4.460	-0.011	-0.015	-0.013	0.041
4.480	-0.001	-0.006	-0.012	-0.073
4.500	0.009	0.009	-0.002	-0.128
4.520	0.012	0.016	0.011	-0.077
4.540	0.005	0.010	0.014	0.037
4.560	-0.006	-0.004	0.006	0.121
4.580	-0.012	-0.015	-0.007	0.105
4.600	-0.008	-0.013	-0.014	0.002
4.620	0.003	-0.001	-0.010	-0.102
4.640	0.011	0.012	0.003	-0.122
4.660	0.011	0.015	0.013	-0.042
4.680	0.001	0.005	0.012	0.073
4.700	-0.009	-0.009	0.002	0.127
4.720	-0.012	-0.016	-0.011	0.077
4.740	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
4.760	0.006	0.004	-0.006	-0.121
4.780	0.012	0.015	0.007	-0.104
4.800	0.008	0.013	0.014	-0.002
4.820	-0.002	0.001	0.010	0.102
4.840	-0.011	-0.012	-0.003	0.122
4.860	-0.011	-0.015	-0.013	0.042
4.880	-0.001	-0.006	-0.012	-0.073
4.900	0.009	0.009	-0.002	-0.128
4.920	0.012	0.016	0.011	-0.077
4.940	0.005	0.010	0.014	0.037
4.960	-0.006	-0.004	0.006	0.121
4.980	-0.012	-0.015	-0.007	0.105
5.000	-0.008	-0.013	-0.014	0.002
5.020	0.003	-0.001	-0.010	-0.102
5.040	0.011	0.012	0.003	-0.122



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

5.060	0.011	0.015	0.013	-0.042
5.080	0.001	0.006	0.012	0.073
5.100	-0.009	-0.009	0.002	0.127
5.120	-0.012	-0.016	-0.011	0.077
5.140	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
5.160	0.006	0.004	-0.006	-0.121
5.180	0.012	0.015	0.007	-0.105
5.200	0.008	0.013	0.014	-0.002
5.220	-0.002	0.001	0.010	0.102
5.240	-0.011	-0.012	-0.003	0.122
5.260	-0.011	-0.015	-0.013	0.042
5.280	-0.001	-0.006	-0.012	-0.073
5.300	0.009	0.009	-0.002	-0.128
5.320	0.012	0.016	0.011	-0.077
5.340	0.005	0.010	0.014	0.037
5.360	-0.006	-0.004	0.006	0.120
5.380	-0.012	-0.015	-0.007	0.105
5.400	-0.008	-0.013	-0.014	0.003
5.420	0.002	-0.001	-0.010	-0.102
5.440	0.011	0.012	0.003	-0.122
5.460	0.011	0.015	0.013	-0.042
5.480	0.001	0.006	0.012	0.073
5.500	-0.009	-0.009	0.002	0.127
5.520	-0.012	-0.016	-0.011	0.077
5.540	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
5.560	0.006	0.004	-0.006	-0.120
5.580	0.012	0.015	0.007	-0.105
5.600	0.008	0.013	0.014	-0.003
5.620	-0.002	0.001	0.010	0.102
5.640	-0.011	-0.012	-0.003	0.122
5.660	-0.011	-0.015	-0.013	0.042
5.680	-0.001	-0.006	-0.012	-0.073
5.700	0.009	0.009	-0.002	-0.128
5.720	0.012	0.016	0.011	-0.077
5.740	0.005	0.010	0.014	0.037
5.760	-0.006	-0.004	0.006	0.120
5.780	-0.012	-0.015	-0.007	0.105
5.800	-0.008	-0.013	-0.014	0.003
5.820	0.002	-0.001	-0.010	-0.102
5.840	0.011	0.012	0.003	-0.122
5.860	0.011	0.015	0.013	-0.042
5.880	0.001	0.006	0.012	0.073
5.900	-0.009	-0.009	0.002	0.128
5.920	-0.012	-0.016	-0.011	0.077
5.940	-0.005	-0.010	-0.014	-0.037
5.960	0.006	0.004	-0.006	-0.120
5.980	0.012	0.015	0.007	-0.105
6.000	0.008	0.013	0.014	-0.003
6.020	-0.002	0.001	0.010	0.102
6.040	-0.011	-0.012	-0.003	0.122
6.060	-0.011	-0.015	-0.013	0.042
6.080	-0.001	-0.006	-0.012	-0.073
6.100	0.009	0.009	-0.002	-0.128
6.120	0.012	0.016	0.011	-0.077
6.140	0.005	0.010	0.014	0.037
6.160	-0.006	-0.004	0.006	0.120
6.180	-0.012	-0.015	-0.007	0.105
6.200	-0.008	-0.013	-0.014	0.003
6.220	0.002	-0.001	-0.010	-0.102
6.240	0.011	0.012	0.003	-0.122



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

6.180	-0.012	-0.015	-0.007	0.105
6.200	-0.008	-0.013	-0.014	0.003
6.220	0.002	-0.001	-0.010	-0.101
6.240	0.011	0.012	0.003	-0.122

Nivel	Máximo:	Tiempo	Minimo:	Tiempo
	mm.	seg.	mm.	seg.
1	0.038	0.140	-0.034	0.060
2	0.065	0.140	-0.056	0.060
3	0.082	0.140	-0.071	0.080
4	0.222	0.160	-0.215	-0.240



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

Resultados de análisis Modal, Varios grados de libertad [edificio cortante] - Matlab, Vibraciones por puente grúa.

\*\*\*\*\*

Matriz de Masa:

Matrix of Mass with values: 107.54, 0, 0, 0, 0, 133.74, 0, 118.43, 0, 0, 0, 143.87

Matriz de Rigidez:

Matrix of Stiffness with values: 2.44E+06, -1.35E+06, 0, 0, -1.35E+06, 2.70E+06, -1.35E+06, 0, 0, -1.35E+06, 1.53E+06, -1.80E+05, 0, 0, -1.80E+05, 1.80E+05

Modo - 1

Table for Mode 1: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 2

Table for Mode 2: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 3

Table for Mode 3: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Modo - 4

Table for Mode 4: Eigenvalue, Circle Freq., Frecuencia, Periodo

Eigenvector:

Eigenvector matrix with values: 0.02, 0.03, -0.07, -0.06, 0.03, 0.05, -0.03, 0.06, 0.04, 0.05, 0.06, -0.03, 0.08, -0.05, -0.01, 0.00

Eigenvalue:

- 29.888, 57.202, 133.69, 188.07

Historia de Desplazamiento de piso en cada punto de tiempo: Resultados de análisis Modal - Matlab, Vibraciones por puente grúa.

Table with columns: Tiempo, Desplazamiento en Piso Nro (1°, 2°, 3°, 4°) and rows for time intervals from 0.000 to 0.080



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

0.080	0.008	0.013	0.015	0.021
0.100	0.012	0.019	0.023	0.037
0.120	0.015	0.025	0.031	0.054
0.140	0.018	0.030	0.038	0.069
0.160	0.022	0.035	0.044	0.079
0.180	0.024	0.039	0.049	0.085
0.200	0.025	0.041	0.051	0.088
0.220	0.026	0.043	0.053	0.090
0.240	0.027	0.044	0.055	0.093
0.260	0.029	0.048	0.059	0.099
0.280	0.032	0.052	0.065	0.108
0.300	0.036	0.058	0.072	0.121
0.320	0.039	0.064	0.079	0.135
0.340	0.042	0.069	0.086	0.149
0.360	0.045	0.074	0.092	0.161
0.380	0.048	0.078	0.097	0.169
0.400	0.050	0.081	0.101	0.175
0.420	0.052	0.084	0.104	0.178
0.440	0.053	0.086	0.107	0.182
0.460	0.055	0.089	0.110	0.188
0.480	0.057	0.092	0.115	0.196
0.500	0.060	0.097	0.121	0.206
0.520	0.063	0.103	0.128	0.218
0.540	0.067	0.108	0.134	0.231
0.560	0.069	0.113	0.140	0.243
0.580	0.072	0.117	0.146	0.253
0.600	0.074	0.121	0.150	0.260
0.620	0.076	0.124	0.154	0.265
0.640	0.078	0.127	0.158	0.270
0.660	0.080	0.130	0.161	0.276
0.680	0.082	0.133	0.165	0.283
0.700	0.085	0.137	0.171	0.292
0.720	0.088	0.142	0.177	0.302
0.740	0.091	0.147	0.183	0.314
0.760	0.094	0.152	0.189	0.325
0.780	0.096	0.156	0.195	0.336
0.800	0.099	0.160	0.200	0.344
0.820	0.101	0.164	0.204	0.351
0.840	0.103	0.167	0.208	0.357
0.860	0.105	0.170	0.212	0.363
0.880	0.107	0.174	0.216	0.370
0.900	0.110	0.178	0.221	0.378
0.920	0.112	0.182	0.226	0.388
0.940	0.115	0.187	0.232	0.398
0.960	0.118	0.191	0.238	0.409
0.980	0.121	0.196	0.244	0.419
1.000	0.123	0.200	0.249	0.428
1.020	0.126	0.204	0.253	0.436
1.040	0.127	0.207	0.257	0.443
1.060	0.128	0.208	0.259	0.447
1.080	0.128	0.207	0.258	0.447
1.100	0.126	0.205	0.256	0.443
1.120	0.125	0.203	0.253	0.436
1.140	0.124	0.202	0.251	0.429
1.160	0.124	0.201	0.249	0.424
1.180	0.124	0.200	0.248	0.424
1.200	0.124	0.201	0.249	0.427
1.220	0.125	0.202	0.252	0.433
1.240	0.126	0.205	0.255	0.439
1.260	0.127	0.206	0.257	0.443



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

2.520	0.126	0.204	0.253	0.436
2.540	0.126	0.204	0.254	0.436
2.560	0.126	0.204	0.254	0.436
2.580	0.126	0.204	0.253	0.435
2.600	0.125	0.203	0.253	0.435
2.620	0.125	0.203	0.253	0.434
2.640	0.125	0.203	0.252	0.434
2.660	0.125	0.203	0.252	0.434
2.680	0.125	0.203	0.253	0.434
2.700	0.125	0.203	0.253	0.435
2.720	0.126	0.204	0.253	0.435
2.740	0.126	0.204	0.253	0.436
2.760	0.126	0.204	0.253	0.436
2.780	0.126	0.204	0.253	0.436
2.800	0.125	0.204	0.253	0.435
2.820	0.125	0.203	0.253	0.434
2.840	0.125	0.203	0.253	0.434
2.860	0.125	0.203	0.253	0.434
2.880	0.125	0.203	0.253	0.434
2.900	0.125	0.203	0.253	0.435
2.920	0.125	0.204	0.253	0.435
2.940	0.126	0.204	0.253	0.435
2.960	0.126	0.204	0.253	0.436
2.980	0.126	0.204	0.253	0.436
3.000	0.125	0.204	0.253	0.435
3.020	0.125	0.203	0.253	0.435
3.040	0.125	0.203	0.253	0.434
3.060	0.125	0.203	0.253	0.434
3.080	0.125	0.203	0.253	0.434
3.100	0.125	0.203	0.253	0.434
3.120	0.125	0.203	0.253	0.435
3.140	0.125	0.204	0.253	0.435
3.160	0.126	0.204	0.253	0.435
3.180	0.126	0.204	0.253	0.435
3.200	0.125	0.204	0.253	0.435
3.220	0.125	0.203	0.253	0.435
3.240	0.125	0.203	0.253	0.435

	Máximo:	Tiempo	Minimo:	Tiempo
Nivel	mm.	seg.	mm.	seg.
1	0.128	1.060	0.000	-0.020
2	0.208	1.060	0.000	-0.020
3	0.259	1.060	0.000	-0.020
4	0.447	1.080	0.000	-0.020

**ANEXO N°05:****SOLUCIÓN DE LÍNEAS DE INFLUENCIA**

Sub GenerateSections()

Dim Nspans%, Nsections%, Length#, SectionX#

Dim i%, j%, k%

Dim a#, B#

Dim rngXloc As Range, rngXGlob As Range

Set rngXloc = Range("XLoc1")

' Clean

rngXloc.Offset(1, -2).Resize(1000, 5).ClearContents

Nspans = Range("Nspans")

Nsections = Range("Nsections")

SectionX = Range("SectionX")

For i = 1 To Nspans

Length = Range("L")(1, i)

Set rngXloc = rngXloc.Offset(1)

rngXloc.Value = 0

If i <> Range("SectionSpan").Value Then

Do

Set rngXloc = rngXloc.Offset(1)

rngXloc.Value = rngXloc.Offset(-1) + Length / Nsections

Loop Until Abs(rngXloc.Value - Length) < SMALL

rngXloc.Value = Length

Else ' Request section is in this span

Do

Set rngXloc = rngXloc.Offset(1)

a = rngXloc.Offset(-1) + Length / Nsections

Select Case a - SectionX

Case Is < -SMALL

rngXloc.Value = a

Case Length / Nsections

If SectionX = 0 Then

rngXloc.Value = SMALL

Set rngXloc = rngXloc.Offset(1)

End If

rngXloc.Value = a

Case Is > Length / Nsections

rngXloc.Value = a

Case Is < Length / Nsections

rngXloc.Value = SectionX

If SectionX = Length Then Exit Do

Set rngXloc = rngXloc.Offset(1)

rngXloc.Value = SectionX + SMALL





DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

```
a = Application.WorksheetFunction.Min(Length, a + Length / Nsections)
Set rngXloc = rngXloc.Offset(1)
rngXloc.Value = a

End Select
Loop While Length - a > SMALL * 0.1
End If
Next i

'fillout X-global

Set rngXGlob = Range("XLoc1").Offset(1, -2)
Set rngXloc = Range("XLoc1").Offset(1, 0)
j = 1
B = 0
rngXGlob(1) = 0

For i = 1 To Nspans
    rngXloc.Offset(j - 1, -1) = i
    Do
        rngXGlob(j) = B + rngXloc(j)
        j = j + 1
    Loop Until rngXloc(j) = 0
    B = rngXGlob(j - 1)
Next i

ActiveSheet.ChartObjects("Chart 7").Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .MinimumScale = 0
    .MaximumScale = B
End With
ActiveChart.Deselect

End Sub

Sub getLine()
Dim rngAct As Range
Dim rngXloc As Range, rngSpan As Range, rngX As Range

Set rngAct = ActiveCell

Set rngXloc = Range("Xloc1").Offset(1)
Set rngX = Range("LoadX")
Set rngSpan = Range("LoadSpan")

'Sheets("input").Unprotect
Application.ScreenUpdating = False
GenerateSections

For i = 1 To Range("Nspans")
    rngSpan.Value = i
    Do
```



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

```
    rngX.Value = rngXloc.Value
    Application.Calculate
    rngXloc.Offset(0, 1) = Range("Moment").Value
    rngXloc.Offset(0, 2) = Range("Shear").Value
    Set rngXloc = rngXloc.Offset(1)
    Loop Until rngXloc.Value = 0
Next i
rngAct.Select
Application.ScreenUpdating = True
'Sheets("Input").Protect
End Sub

Public Function PosNegArea(rngX As Range, rngY As Range) As Variant

Dim MaxArea#, MinArea#
Dim i%, j%
Dim a#, D#, X1#, X2#, Y1#, Y2#
'

X1 = rngX(1)
MinArea = 0
MaxArea = 0
'

With Application.WorksheetFunction
For i = 1 To rngX.Cells.Count - 1
    X1 = rngX(i)
    X2 = rngX(i + 1)
    Y1 = rngY(i)
    Y2 = rngY(i + 1)
    If X2 - X1 > SMALL Then
        If Y1 * Y2 >= 0 Then
            a = (X2 - X1) * (Y1 + Y2) / 2
            MaxArea = MaxArea + .Max(a, 0)
            MinArea = MinArea + .Min(a, 0)
        Else
            D = Y1 / (Y1 - Y2) * (X2 - X1) ' Distance from X1 to where Y(1) = 0'
            If D <= X2 - X1 Then
                MaxArea = 0.5 * .Max(Y1 * D, Y2 * (X2 - X1 - D)) + MaxArea
                MinArea = 0.5 * .Min(Y1 * D, Y2 * (X2 - X1 - D)) + MinArea
            End If
        End If
    End If
End For
Next i

PosNegArea = .Transpose(Array(MaxArea, MinArea))
End With

End Function
```

**ANEXO N°06:****ALGORITMO EN MATLAB: ANÁLISIS MODAL**

```
% Modal analysis of MDOF system
clc
clear all
close all
try
    delete 'output.txt'
catch
end
diary output.txt
k = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'C2:C100');
m = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'B2:B100');
NS = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'H3');
e = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'H1');
NP = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'H6');
g = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'H2');
Ts = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'H4');
td = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'H5');
F = xlsread('ShearBuilding', 'input', 'L2:L100000');
j = ceil(td / Ts) + 2;
F(j:NP) = 0;
F = F(1:NP);
F = -g * F;
K = zeros(NS, NS);
M = zeros(NS, NS);
Frequency = zeros(0); Period = zeros(0); Mn = zeros(0);
T = zeros(0);
T(1) = 0;
for i = 1:NP - 1
    T(i + 1) = i * Ts;
end
for i = 1:NS - 1
    K(i, i) = k(i) + k(i + 1);
    K(i, i + 1) = -k(i + 1);
    K(i + 1, i) = -k(i + 1);
end
K(NS, NS) = k(NS);
for i = 1:NS
    M(i, i) = m(i);
end
[phi, w] = eig(K, M);
w = diag(w);
W = sqrt(w);
Wd = W * sqrt(1 - e ^ 2);
for i = 1:NS
    Frequency(i) = W(i) / (2 * pi);
    Period(i) = 1 / Frequency(i);
end
for i = 1:NS
    m_ = 0;
    for j = 1:NS
        m_ = m_ + m(j) * phi(j, i);
    Mn(i) = m_;
end
end
A = zeros(0); B = zeros(0); Y = zeros(0);
dF = zeros(0); dT = zeros(0); Z = zeros(0);
```



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

```
for n = 1:NS
    A(1) = 0; B(1) = 0; Y(1) = 0;
    for i = 2:NP
        dF(i) = F(i) - F(i - 1);
        dT(i) = T(i) - T(i - 1);
        tmp = (e * W(n)) ^ 2 + Wd(n) ^ 2;
        I12 = exp(e * W(n) * T(i)) * (e * W(n) * cos(Wd(n) * T(i)) + Wd(n) *
sin(Wd(n) * T(i))) / tmp;
        I11 = exp(e * W(n) * T(i - 1)) * (e * W(n) * cos(Wd(n) * T(i - 1)) + Wd(n) *
sin(Wd(n) * T(i - 1))) / tmp;
        I1 = I12 - I11;
        I22 = exp(e * W(n) * T(i)) * (e * W(n) * sin(Wd(n) * T(i)) - Wd(n) *
cos(Wd(n) * T(i))) / tmp;
        I21 = exp(e * W(n) * T(i - 1)) * (e * W(n) * sin(Wd(n) * T(i - 1)) - Wd(n) *
cos(Wd(n) * T(i - 1))) / tmp;
        I2 = I22 - I21;
        I32 = (T(i) - e * W(n) / tmp) * I22 + Wd(n) / tmp * I12;
        I31 = (T(i - 1) - e * W(n) / tmp) * I21 + Wd(n) / tmp * I11;
        I3 = I32 - I31;
        I42 = (T(i) - e * W(n) / tmp) * I12 - Wd(n) / tmp * I22;
        I41 = (T(i - 1) - e * W(n) / tmp) * I11 - Wd(n) / tmp * I21;
        I4 = I42 - I41;
        A(i) = A(i - 1) + (F(i - 1) - T(i - 1) * dF(i) / dT(i)) * I1 + dF(i) / dT(i)
* I4;
        B(i) = B(i - 1) + (F(i - 1) - T(i - 1) * dF(i) / dT(i)) * I2 + dF(i) / dT(i)
* I3;
        Z(i, 1, n) = Mn(n) * exp(-e * W(n) * T(i)) / Wd(n) * (A(i) * sin(Wd(n) *
T(i)) - B(i) * cos(Wd(n) * T(i)));
    end
end
U = zeros(0); f = zeros(0); y = zeros(0); v = zeros(0); V = zeros(0);
for t = 1:NP
    for j = 1:NS
        for n = 1:NS
            Y(j, n, t) = Z(t, 1, n) * phi(j, n);
            f(j, n, t) = m(j) * W(n) ^ 2 * Y(j, n, t);
        end
    end
    for i = 1:NS
        sum1 = 0; sum2 = 0;
        for j = 1:NS
            sum1 = Y(i, j, t) + sum1;
            sum2 = f(i, j, t) + sum2;
        end
        y(t, i) = (sum1);
        v(t, i) = (sum2);
    end
    for ii = 1:NS
        SUM = 0;
        for jj = ii:NS
            SUM = SUM + v(t, jj);
        end
        V(t, ii) = SUM;
    end
end
out1 = zeros(NP, NS + 1);
out1(:,1) = T';
out1(:,2:NS + 1) = y;
out2 = zeros(NP, NS + 1);
out2(:,1) = T';
```



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

```
out2(:,2:NS + 1) = V;
format short g
out = M;
disp('Modal analyze result, Multi Degree Of Freedom [Shear Building]');
disp('*****');
disp('Mass Matrix:');
disp(out)
out = K;
disp(' ');
disp('Striffener Matrix:');
disp(out);
disp(' ');
disp(' ');
for i = 1:NS
    fprintf(' Mode - %g\n', i);
    fprintf(' Eigenvalue (rad/sec)^2 = %g\n', w(i));
    fprintf(' Circle Freq. (rad/sec) = %g\n', W(i));
    fprintf(' Frequency (cyc/sec) = %g\n', Frequency(i));
    fprintf(' Period (sec) = %g\n', Period(i));
    disp('-----');
end
disp(' ');
disp(' ');
out = phi;
disp('Eigenvector:');
disp(out);
disp(' ');
disp(' ');
disp(' ');
disp(' ');
out = W;
disp('Eigenvalue:');
disp(out);
disp(' ');
disp(' ');
disp(' Story displacement in each time points:');
disp([' Time | Story 1 to ', num2str(NS)]);
disp(' -----');
disp(out1);
disp(' Story shear in each time points:');
disp([' Time | Story 1 to ', num2str(NS)]);
disp(' -----');
disp(out2);
n = zeros(NS + 1);
P = zeros(NS + 1);
n(1) = 0;
for i = 2:NS + 1
    n(i) = i - 1;
end
for i = 1:NS
    figure(i * 100);
    hold on;
    P(1) = 0;
    for j = 2:NS + 1
        P(j) = phi(j - 1 ,i);
    end
    h = plot(P, n, 'b-', 'linewidth', 2);
    set(h, 'Marker', 'o');
    set(h, 'MarkerFaceColor', 'b');
    set(h, 'MarkerSize', 5);
```



DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

```
set(h, 'MarkerEdgeColor', 'b');
xlim([-0.5 0.5]);
ylim([0 NS + 1]);
set(gca, 'XTick', -0.2:0.1:0.2);
set(gca, 'YTick', 0:1:NS + 1);
title(['Mode Shape ', num2str(i)]);
hold off;
grid on;
end
disp(' ');
for i = 1:NS
    tmp_y = 0;
    tmp_x = 0;
    tmp_t = 0;
    tmp_u = 0;
    for j = 1:NP
        x = y(j, i);
        if x > tmp_y
            tmp_y = x;
            tmp_t = j;
        end
        if x < tmp_x
            tmp_x = x;
            tmp_u = j;
        end
    end
    disp(['Story ', num2str(i), ' displacement: ', 'Max. is: ', num2str(tmp_y), '
@ ', num2str((tmp_t - 1) * Ts), ' sec ',...
'| Min. is: ', num2str(tmp_x), ' @ ', num2str((tmp_u - 1) * Ts), ' sec']);
end
disp(' ');
for i = 1:NS
    tmp_v = 0;
    for j = 1:NP
        x = abs(V(j, i));
        if x > tmp_v
            tmp_v = x;
        end
    end
    disp(['Maximum shear at story ', num2str(i), ': ', num2str(tmp_v)]);
end
n = 0;
for j = 1:ceil(NS / 4)
    for i = 1:4
        n = n + 1;
        if n == NS + 1
            break;
        end
        figure(j);
        subplot(2,2,i);
        plot(T, y(:,n), 'b-', 'linewidth', 1.5);
        title(['Displacement - Time, Story ', num2str(n)]);
        xlabel('Time [sec]');
        ylabel('Displacement');
        set(gca, 'XTick', 0:5:NP * Ts);
        grid on
    end
end
n = 0;
for j = 1 + ceil(NS / 4):2 * ceil(NS / 4)
```



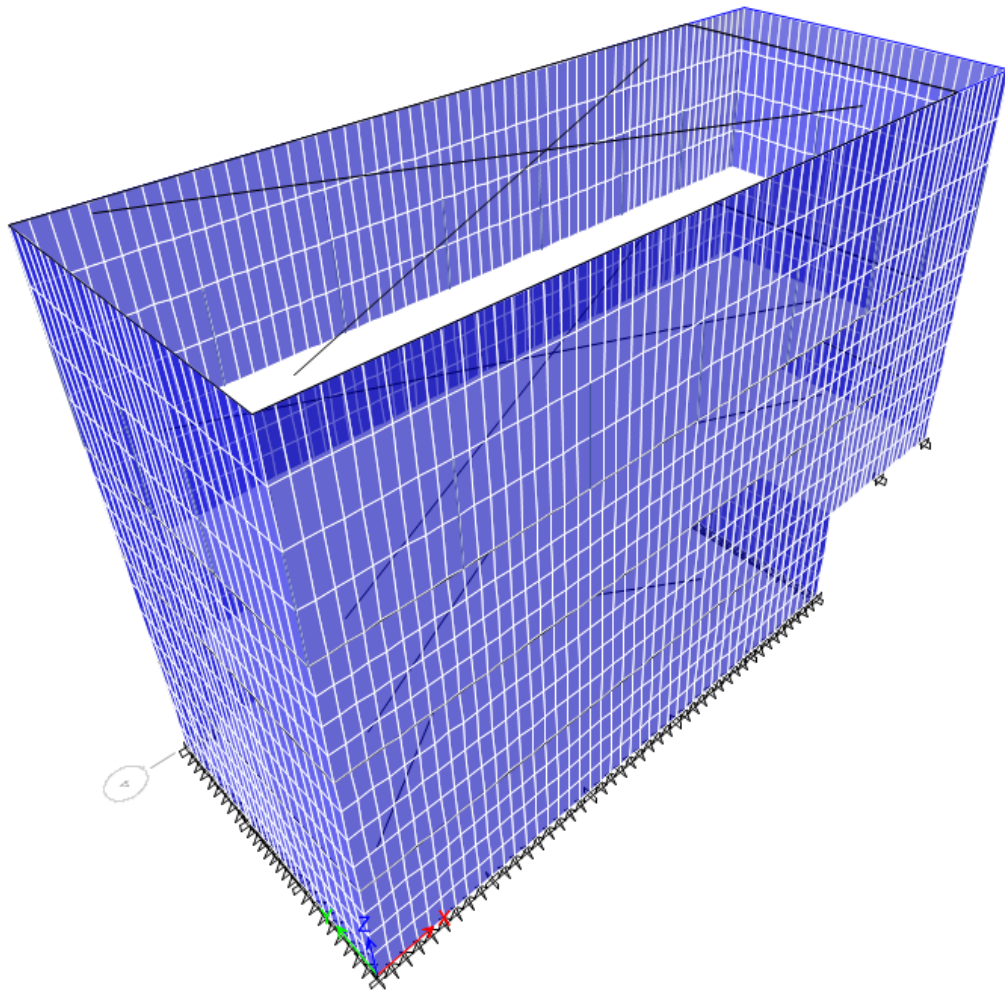
DE MAQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU II FASE "

```
for i = 1:4
n = n + 1;
if n == NS + 1
break;
end
figure(j);
subplot(2, 2, i);
plot(T, V(:,n), 'k-', 'linewidth', 1.5);
title(['Story Shear - Time, Story ', num2str(n)]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Shear');
set(gca, 'XTick', 0:5:NP * Ts);
grid on;
end
end
diary off
```



**ANEXO N°07:**  
**REPORTE DE RESULTADOS ETABS**

**ETABS**<sup>®</sup> 2015  
Integrated Building Design Software



**Summary Report**

Model File: Default, Revision 0



## 1 Structure Data

This chapter provides model geometry information, including items such as story levels, point coordinates, and element connectivity.

### 1.1 Story Data

Table 1.1 - Story Data

Name	Height mm	Elevation mm	Master Story	Similar To	Splice Story
Story4	7700	22700	Yes	None	No
Story3	4700	15000	No	Story4	No
Story2	5400	10300	No	Story4	No
Story1	4900	4900	No	Story4	No
Base	0	0	No	None	No

## 2 Loads

This chapter provides loading information as applied to the model.

### 2.1 Load Patterns

Table 2.1 - Load Patterns

Name	Type	Self Weight Multiplier
Dead	Dead	1
Live	Live	0
superdead	Superimposed Dead	0
sismo x	Other	0
sismo y	Other	0
turbina	Other	0
grua	Other	0

### 2.2 Functions

#### 2.2.1 Response Spectrum Functions

Table 2.2 - Response Spectrum Function - User

Name	Period sec	Acceleration	Damping %
ESPECTRTO R=4.46	0	0.21	5
ESPECTRTO R=4.46	0.041	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.045	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.05	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.055	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.06	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.064	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.07	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.074	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.079	0.21	



Name	Period sec	Accelerati on	Damping %
ESPECTRTO R=4.46	0.084	0.21	5
ESPECTRTO R=4.46	0.1	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.2	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.3	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.4	0.21	
ESPECTRTO R=4.46	0.5	0.168	
ESPECTRTO R=4.46	0.6	0.14	
ESPECTRTO R=4.46	0.7	0.12	
ESPECTRTO R=4.46	0.8	0.105	
ESPECTRTO R=4.46	0.9	0.093	
ESPECTRTO R=4.46	1	0.084	
ESPECTRTO R=4.46	1.1	0.076	
ESPECTRTO R=4.46	1.2	0.07	
ESPECTRTO R=4.46	1.3	0.065	
ESPECTRTO R=4.46	1.4	0.06	
ESPECTRTO R=4.46	1.5	0.056	
ESPECTRTO R=4.46	1.6	0.053	
ESPECTRTO R=4.46	1.7	0.049	
ESPECTRTO R=4.46	1.8	0.047	
ESPECTRTO R=4.46	1.9	0.044	
ESPECTRTO R=4.46	2	0.042	
ESPECTRTO R=4.46	2.1	0.04	
ESPECTRTO R=4.46	2.2	0.038	
ESPECTRTO R=4.46	2.3	0.037	
ESPECTRTO R=4.46	2.4	0.035	
ESPECTRTO R=4.46	2.5	0.034	
ESPECTRTO R=4.46	2.6	0.031	
ESPECTRTO R=4.46	2.7	0.029	
ESPECTRTO R=4.46	2.8	0.027	
ESPECTRTO R=4.46	2.9	0.025	
ESPECTRTO R=4.46	3	0.023	
ESPECTRTO R=4.46	3.1	0.022	
ESPECTRTO R=4.46	3.2	0.021	
ESPECTRTO R=4.46	3.3	0.019	



Name	Period sec	Acceleration	Damping %
ESPECTRTO R=4.46	3.4	0.018	5
ESPECTRTO R=4.46	3.5	0.017	
ESPECTRTO R=4.46	3.6	0.016	
ESPECTRTO R=4.46	3.7	0.015	
ESPECTRTO R=4.46	3.8	0.015	
ESPECTRTO R=4.46	3.9	0.014	
ESPECTRTO R=4.46	4	0.013	

### 2.3 Load Cases

Table 2.3 - Load Cases - Summary

Name	Type
Dead	Linear Static
Live	Linear Static
sismo x	Response Spectrum
sismo y	Response Spectrum
turbina	Linear Modal History
grua	Linear Modal History

### 3 Analysis Results

This chapter provides analysis results.

#### 3.1 Structure Results

Table 3.1 - Base Reactions

Load Case/Combo	FX tonf	FY tonf	FZ tonf	MX tonf-mm	MY tonf-mm	MZ tonf-mm
Dead	0	0	4412.4307	28700175.3	-75387101	0
Live	0	0	331.5	2154750	-9447750	0
sismo x Max	1943.2995	1399.8542	350.8296	22437943.11	32929768.21	28196047.64
sismo y Max	1943.2995	1399.8542	350.8296	22437943.11	32929768.21	28196047.64
turbina Max	1127.3256	273.5395	4.4151	2936574.09	12236400.74	2882331.28
turbina Min	-1127.3487	-274.176	-5.7163	-2928394.28	-12229337	-2884100.07
grua Max	0	10.6288	18270.6553	133181846	0	8506182.56
grua Min	-1129.3702	0	0	0	-363154189	0
UDWal1	0	0	6177.4029	40180245.41	-105541941	0
UDWal2	0	0	6740.9529	43843320.41	-121603116	0
UDWal3 Max	1943.2995	1399.8542	6280.743	61006599.73	-73113795	28196047.64
UDWal3 Min	-1943.2995	-1399.8542	5579.0837	16130713.51	-138973332	-28196048
UDWal4 Max	1943.2995	1399.8542	6280.743	61006599.73	-73113795	28196047.64
UDWal4 Min	-1943.2995	-1399.8542	5579.0837	16130713.51	-138973332	-28196048
UDWal5 Max	1943.2995	1399.8542	4322.0172	48268100.87	-34918622	28196047.64
UDWal5 Min	-1943.2995	-1399.8542	3620.358	3392214.66	-100778159	-28196048
UDWal6 Max	1943.2995	1399.8542	4322.0172	48268100.87	-34918622	28196047.64
UDWal6 Min	-1943.2995	-1399.8542	3620.358	3392214.66	-100778159	-28196048
ENVOLVENTE Max	1943.2995	1399.8542	6740.9529	61006599.73	-34918622	28196047.64
ENVOLVENTE Min	-1943.2995	-1399.8542	3620.358	3392214.66	-138973332	-28196048

Table 3.2 - Centers of Mass and Rigidity

Story	Diaphragm	Mass X tonf-s <sup>2</sup> /mm	Mass Y tonf-s <sup>2</sup> /mm	XCM mm	YCM mm	Cumulati		XCCM mm	YCCM mm	XCR mm	YCR mm
						ve X tonf-s <sup>2</sup> /mm	ve Y tonf-s <sup>2</sup> /mm				
Story1	D1	0.034227	0.034227	15599.07	6500	0.034227	0.034227	15599.07	6500	14151.12	6499.9
Story2	D2	0.038001	0.038001	20448.15	6500	0.038001	0.038001	20448.15	6500	21277.51	6499.85
Story3	D3	0.042271	0.042271	20227.91	6500	0.042271	0.042271	20227.91	6500	19723.25	6499.56
Story4	D4	0.056235	0.056235	19402.65	6539.73	0.056235	0.056235	19402.65	6539.73	17619.44	6499.72

Table 3.3 - Diaphragm Center of Mass Displacements

Story	Diaphragm	Load Case/Combo	UX mm	UY mm	UZ mm	RX rad	RY rad	RZ rad	Point	X mm	Y mm	Z mm
Story4	D4	Dead	0.0268	0.0004	0	0	0	-5.802E-09	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	Live	0.0187	2.798E-05	0	0	0	7.304E-10	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	sismo x Max	0.853	2.0532	0	0	0	1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	sismo y Max	0.853	2.0532	0	0	0	1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	turbina Max	0.2101	0.1591	0	0	0	1E-06	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	turbina Min	-0.2104	-0.159	0	0	0	-1E-06	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	grua Max	0.3336	0	0	0	0	0	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	grua Min	0	-0.0491	0	0	0	-1E-06	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal1	0.0375	0.0005	0	0	0	-8.123E-09	1	19402.65	6539.73	22700



Story	Diaphragm	Load Case/Combo	UX mm	UY mm	UZ mm	RX rad	RY rad	RZ rad	Point	X mm	Y mm	Z mm
Story4	D4	UDWal2	0.0693	0.0006	0	0	0	-6.881E-09	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal3 Max	0.9099	2.0537	0	0	0	1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal3 Min	-0.7962	-2.0527	0	0	0	-1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal4 Max	0.9099	2.0537	0	0	0	1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal4 Min	-0.7962	-2.0527	0	0	0	-1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal5 Max	0.8771	2.0535	0	0	0	1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal5 Min	-0.8289	-2.0529	0	0	0	-1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal6 Max	0.8771	2.0535	0	0	0	1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	UDWal6 Min	-0.8289	-2.0529	0	0	0	-1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	ENVOLV ENTE Max	0.9099	2.0537	0	0	0	1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story4	D4	ENVOLV ENTE Min	-0.8289	-2.0529	0	0	0	-1E-05	1	19402.65	6539.73	22700
Story3	D3	Dead	0.0084	0.0002	0	0	0	-1.86E-09	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	Live	0.0079	1.722E-05	0	0	0	4.085E-10	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	sismo x Max	0.4104	0.9478	0	0	0	6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	sismo y Max	0.4104	0.9478	0	0	0	6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	turbina Max	0.1893	0.1273	0	0	0	1E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	turbina Min	-0.1893	-0.1271	0	0	0	-1E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	grua Max	0.0978	0	0	0	0	0	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	grua Min	0	-0.0213	0	0	0	-1E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal1	0.0118	0.0003	0	0	0	-2.604E-09	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal2	0.0251	0.0003	0	0	0	-1.91E-09	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal3 Max	0.4308	0.9481	0	0	0	6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal3 Min	-0.3901	-0.9476	0	0	0	-6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal4 Max	0.4308	0.9481	0	0	0	6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal4 Min	-0.3901	-0.9476	0	0	0	-6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal5 Max	0.418	0.948	0	0	0	6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal5 Min	-0.4029	-0.9477	0	0	0	-6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal6 Max	0.418	0.948	0	0	0	6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	UDWal6 Min	-0.4029	-0.9477	0	0	0	-6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	ENVOLV ENTE Max	0.4308	0.9481	0	0	0	6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story3	D3	ENVOLV ENTE Min	-0.4029	-0.9477	0	0	0	-6E-06	2	20227.91	6500	15000
Story2	D2	Dead	-0.0003	0.0001	0	0	0	-1.051E-09	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	Live	0.003	8.775E-06	0	0	0	1.599E-10	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	sismo x Max	0.2855	0.5638	0	0	0	6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	sismo y Max	0.2855	0.5638	0	0	0	6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	turbina Max	0.149	0.0901	0	0	0	1E-06	3	20448.15	6500	10300



Story	Diaphragm	Load Case/Combo	UX mm	UY mm	UZ mm	RX rad	RY rad	RZ rad	Point	X mm	Y mm	Z mm
Story2	D2	turbina Min	-0.149	-0.0899	0	0	0	-1E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	grua Max	0.0274	0	0	0	0	0	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	grua Min	0	-0.0114	0	0	0	-1.286E-07	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal1	-0.0004	0.0001	0	0	0	-1.472E-09	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal2	0.0047	0.0002	0	0	0	-1.2E-09	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal3 Max	0.2889	0.564	0	0	0	6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal3 Min	-0.2822	-0.5637	0	0	0	-6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal4 Max	0.2889	0.564	0	0	0	6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal4 Min	-0.2822	-0.5637	0	0	0	-6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal5 Max	0.2852	0.5639	0	0	0	6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal5 Min	-0.2858	-0.5638	0	0	0	-6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal6 Max	0.2852	0.5639	0	0	0	6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	UDWal6 Min	-0.2858	-0.5638	0	0	0	-6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	ENVOLV ENTE Max	0.2889	0.564	0	0	0	6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story2	D2	ENVOLV ENTE Min	-0.2858	-0.5638	0	0	0	-6E-06	3	20448.15	6500	10300
Story1	D1	Dead	-0.0075	1.551E-05	0	0	0	-6.318E-10	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	Live	-0.0011	2.293E-06	0	0	0	2.447E-11	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	sismo x Max	0.1368	0.1652	0	0	0	6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	sismo y Max	0.1368	0.1652	0	0	0	6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	turbina Max	0.0783	0.0328	0	0	0	1E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	turbina Min	-0.0783	-0.0328	0	0	0	-1E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	grua Max	1.219E-05	0.0055	0	0	0	1.972E-07	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	grua Min	-0.0046	0	0	0	0	0	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal1	-0.0105	2.172E-05	0	0	0	-8.845E-10	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal2	-0.0124	2.562E-05	0	0	0	-8.429E-10	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal3 Max	0.126	0.1653	0	0	0	6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal3 Min	-0.1476	-0.1652	0	0	0	-6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal4 Max	0.126	0.1653	0	0	0	6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal4 Min	-0.1476	-0.1652	0	0	0	-6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal5 Max	0.13	0.1653	0	0	0	6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal5 Min	-0.1436	-0.1652	0	0	0	-6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal6 Max	0.13	0.1653	0	0	0	6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	UDWal6 Min	-0.1436	-0.1652	0	0	0	-6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	ENVOLV ENTE Max	0.13	0.1653	0	0	0	6E-06	4	15599.07	6500	4900
Story1	D1	ENVOLV ENTE Min	-0.1476	-0.1652	0	0	0	-6E-06	4	15599.07	6500	4900

Table 3.4 - Diaphragm Drifts

Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story4	Dead	1520	Diaph D4 X	2E-06	32555.56	13000	22700
Story4	Dead	992	Diaph D4 Y	3.214E-08	0	12477.78	22700
Story4	Live	2030	Diaph D4 X	1E-06	32555.56	0	22700
Story4	Live	2210	Diaph D4 Y	0	33000	12477.78	22700
Story4	sismo x Max	1520	Diaph D4 X	6.1E-05	32555.56	13000	22700
Story4	sismo x Max	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	sismo y Max	1520	Diaph D4 X	6.1E-05	32555.56	13000	22700
Story4	sismo y Max	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	turbina Max	1520	Diaph D4 X	3E-06	32555.56	13000	22700
Story4	turbina Max	2210	Diaph D4 Y	4E-06	33000	12477.78	22700
Story4	turbina Min	1520	Diaph D4 X	3E-06	32555.56	13000	22700
Story4	turbina Min	992	Diaph D4 Y	4E-06	0	12477.78	22700
Story4	grua Max	1520	Diaph D4 X	3.1E-05	32555.56	13000	22700
Story4	grua Max	2210	Diaph D4 Y	0	33000	12477.78	22700
Story4	grua Min	2210	Diaph D4 X	0	33000	12477.78	22700
Story4	grua Min	2210	Diaph D4 Y	4E-06	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal1	1520	Diaph D4 X	3E-06	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal1	992	Diaph D4 Y	4.5E-08	0	12477.78	22700
Story4	UDWal2	1520	Diaph D4 X	6E-06	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal2	992	Diaph D4 Y	4.607E-08	0	12477.78	22700
Story4	UDWal3 Max	1520	Diaph D4 X	6.6E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal3 Max	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal3 Min	1520	Diaph D4 X	5.7E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal3 Min	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal4 Max	1520	Diaph D4 X	6.6E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal4 Max	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal4 Min	1520	Diaph D4 X	5.7E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal4 Min	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal5 Max	1520	Diaph D4 X	6.4E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal5 Max	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal5 Min	1520	Diaph D4 X	5.9E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal5 Min	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal6 Max	1520	Diaph D4 X	6.4E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal6 Max	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal6 Min	1520	Diaph D4 X	5.9E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal6 Min	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	ENVOLVENTE Max	1520	Diaph D4 X	6.6E-05	32555.56	13000	22700
Story4	ENVOLVENTE Max	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	ENVOLVENTE Min	1520	Diaph D4 X	5.9E-05	32555.56	13000	22700
Story4	ENVOLVENTE Min	2210	Diaph D4 Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story3	Dead	1520	Diaph D3 X	2E-06	32555.56	13000	15000
Story3	Dead	992	Diaph D3 Y	2.604E-08	0	12477.78	15000
Story3	Live	2030	Diaph D3 X	1E-06	32555.56	0	15000
Story3	Live	2210	Diaph D3 Y	0	33000	12477.78	15000
Story3	sismo x Max	2030	Diaph D3 X	2.8E-05	32555.56	0	15000
Story3	sismo x Max	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000



Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story3	sismo y Max	2030	Diaph D3 X	2.8E-05	32555.56	0	15000
Story3	sismo y Max	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	turbina Max	2030	Diaph D3 X	9E-06	32555.56	0	15000
Story3	turbina Max	2210	Diaph D3 Y	8E-06	33000	12477.78	15000
Story3	turbina Min	2030	Diaph D3 X	9E-06	32555.56	0	15000
Story3	turbina Min	2210	Diaph D3 Y	8E-06	33000	12477.78	15000
Story3	grua Max	1520	Diaph D3 X	1.6E-05	32555.56	13000	15000
Story3	grua Max	828	Diaph D3 Y	1E-06	0	1044.44	15000
Story3	grua Min	2210	Diaph D3 X	0	33000	12477.78	15000
Story3	grua Min	2090	Diaph D3 Y	4E-06	33000	4177.78	15000
Story3	UDWal1	1520	Diaph D3 X	3E-06	32555.56	13000	15000
Story3	UDWal1	992	Diaph D3 Y	3.645E-08	0	12477.78	15000
Story3	UDWal2	1520	Diaph D3 X	4E-06	32555.56	13000	15000
Story3	UDWal2	992	Diaph D3 Y	3.77E-08	0	12477.78	15000
Story3	UDWal3 Max	2030	Diaph D3 X	3.1E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal3 Max	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal3 Min	2030	Diaph D3 X	2.4E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal3 Min	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal4 Max	2030	Diaph D3 X	3.1E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal4 Max	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal4 Min	2030	Diaph D3 X	2.4E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal4 Min	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal5 Max	2030	Diaph D3 X	2.9E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal5 Max	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal5 Min	2030	Diaph D3 X	2.6E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal5 Min	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal6 Max	2030	Diaph D3 X	2.9E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal6 Max	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal6 Min	2030	Diaph D3 X	2.6E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal6 Min	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	ENVOLVENTE Max	2030	Diaph D3 X	3.1E-05	32555.56	0	15000
Story3	ENVOLVENTE Max	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	ENVOLVENTE Min	2030	Diaph D3 X	2.6E-05	32555.56	0	15000
Story3	ENVOLVENTE Min	2210	Diaph D3 Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story2	Dead	1512	Diaph D2 X	3E-06	29888.89	13000	10300
Story2	Dead	2202	Diaph D2 Y	3E-06	33000	9344.44	10300
Story2	Live	2022	Diaph D2 X	1E-06	29888.89	0	10300
Story2	Live	2082	Diaph D2 Y	1E-06	33000	1044.44	10300
Story2	sismo x Max	11	Diaph D2 X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	sismo x Max	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	sismo y Max	11	Diaph D2 X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	sismo y Max	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	turbina Max	18	Diaph D2 X	2.9E-05	33000	13000	10300
Story2	turbina Max	10	Diaph D2 Y	1.5E-05	29000	0	10300
Story2	turbina Min	18	Diaph D2 X	2.9E-05	33000	13000	10300
Story2	turbina Min	10	Diaph D2 Y	1.5E-05	29000	0	10300
Story2	grua Max	1382	Diaph D2 X	6E-06	24444.44	13000	10300
Story2	grua Max	1514	Diaph D2 Y	2E-05	30777.78	13000	10300
Story2	grua Min	534	Diaph D2 X	2.1E-05	27666.67	13000	10300





Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story2	grua Min	2024	Diaph D2 Y	2.7E-05	30777.78	0	10300
Story2	UDWal1	1512	Diaph D2 X	4E-06	29888.89	13000	10300
Story2	UDWal1	2202	Diaph D2 Y	4E-06	33000	9344.44	10300
Story2	UDWal2	1512	Diaph D2 X	6E-06	29888.89	13000	10300
Story2	UDWal2	2202	Diaph D2 Y	4E-06	33000	9344.44	10300
Story2	UDWal3 Max	11	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal3 Max	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal3 Min	2144	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal3 Min	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal4 Max	11	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal4 Max	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal4 Min	2144	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal4 Min	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal5 Max	11	Diaph D2 X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal5 Max	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal5 Min	2144	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal5 Min	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal6 Max	11	Diaph D2 X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal6 Max	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal6 Min	2144	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal6 Min	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	ENVOLVENTE Max	11	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	0	10300
Story2	ENVOLVENTE Max	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	ENVOLVENTE Min	2144	Diaph D2 X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	ENVOLVENTE Min	10	Diaph D2 Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story1	Dead	1892	Diaph D1 X	2E-06	24444.44	0	4900
Story1	Dead	992	Diaph D1 Y	5.177E-09	0	12477.78	4900
Story1	Live	1382	Diaph D1 X	2.312E-07	24444.44	13000	4900
Story1	Live	2318	Diaph D1 Y	0	25000	12477.78	4900
Story1	sismo x Max	1892	Diaph D1 X	2.9E-05	24444.44	0	4900
Story1	sismo x Max	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	sismo y Max	1892	Diaph D1 X	2.9E-05	24444.44	0	4900
Story1	sismo y Max	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	turbina Max	1382	Diaph D1 X	1.7E-05	24444.44	13000	4900
Story1	turbina Max	992	Diaph D1 Y	1E-05	0	12477.78	4900
Story1	turbina Min	1382	Diaph D1 X	1.7E-05	24444.44	13000	4900
Story1	turbina Min	992	Diaph D1 Y	1E-05	0	12477.78	4900
Story1	grua Max	1892	Diaph D1 X	0	24444.44	0	4900
Story1	grua Max	2318	Diaph D1 Y	2E-06	25000	12477.78	4900
Story1	grua Min	1382	Diaph D1 X	1E-06	24444.44	13000	4900
Story1	grua Min	2318	Diaph D1 Y	0	25000	12477.78	4900
Story1	UDWal1	1892	Diaph D1 X	2E-06	24444.44	0	4900
Story1	UDWal1	992	Diaph D1 Y	7.248E-09	0	12477.78	4900
Story1	UDWal2	1892	Diaph D1 X	3E-06	24444.44	0	4900
Story1	UDWal2	992	Diaph D1 Y	7.911E-09	0	12477.78	4900
Story1	UDWal3 Max	1892	Diaph D1 X	2.7E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal3 Max	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900

Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story1	UDWal3 Min	1892	Diaph D1 X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal3 Min	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal4 Max	1892	Diaph D1 X	2.7E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal4 Max	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal4 Min	1892	Diaph D1 X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal4 Min	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal5 Max	1892	Diaph D1 X	2.8E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal5 Max	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal5 Min	1892	Diaph D1 X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal5 Min	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal6 Max	1892	Diaph D1 X	2.8E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal6 Max	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal6 Min	1892	Diaph D1 X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal6 Min	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	ENVOLVENTE Max	1892	Diaph D1 X	2.8E-05	24444.44	0	4900
Story1	ENVOLVENTE Max	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	ENVOLVENTE Min	1892	Diaph D1 X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	ENVOLVENTE Min	992	Diaph D1 Y	5.2E-05	0	12477.78	4900

Table 3.5 - Diaphragm Accelerations

Story	Diaphragm	Load Case/Combo	UX mm/sec <sup>2</sup>	UY mm/sec <sup>2</sup>	UZ mm/sec <sup>2</sup>	RX rad/sec <sup>2</sup>	RY rad/sec <sup>2</sup>	RZ rad/sec <sup>2</sup>
Story4	D4	sismo x Max	11032.99	9626.73	6607.03	8.903	11.524	0.155
Story4	D4	sismo y Max	11032.99	9626.73	6607.03	8.903	11.524	0.155
Story4	D4	turbina Max	136.26	37.79	67.29	0.064	0.09	0.001
Story4	D4	turbina Min	-116.55	-29.36	-70.57	-0.057	-0.113	-0.001
Story4	D4	grua Max	2.98	0.09	7.1	0.002	0.005	0
Story4	D4	grua Min	-2.98	-0.09	-7.1	-0.002	-0.005	0
Story3	D3	sismo x Max	6061.89	5327.54	4260.23	0.904	2.334	0.086
Story3	D3	sismo y Max	6061.89	5327.54	4260.23	0.904	2.334	0.086
Story3	D3	turbina Max	65.64	18.39	48.1	0.005	0.016	0.0004526
Story3	D3	turbina Min	-44.11	-22.98	-51.33	-0.006	-0.014	-0.001
Story3	D3	grua Max	3.82	0.11	5.65	0.001	0.001	5.888E-06
Story3	D3	grua Min	-3.82	-0.11	-5.65	-0.001	-0.001	-5.888E-06
Story2	D2	sismo x Max	4981.22	3887.31	3007.23	1.473	2.433	0.067
Story2	D2	sismo y Max	4981.22	3887.31	3007.23	1.473	2.433	0.067
Story2	D2	turbina Max	48.77	14.78	38.43	0.003	0.007	0.0002492
Story2	D2	turbina Min	-33.18	-18.43	-42.85	-0.002	-0.007	-0.0003521
Story2	D2	grua Max	3.26	0.09	4.96	0.0004178	0.001	0
Story2	D2	grua Min	-3.26	-0.09	-4.96	-0.0004178	-0.001	0
Story1	D1	sismo x Max	3487.52	3830.82	1506.3	0.768	3.858	0.093
Story1	D1	sismo y Max	3487.52	3830.82	1506.3	0.768	3.858	0.093
Story1	D1	turbina Max	24.2	4.55	10.91	0.006	0.008	9.109E-05
Story1	D1	turbina Min	-16.57	-5.59	-12.04	-0.006	-0.005	-0.0001135
Story1	D1	grua Max	1.69	0.03	1.39	0.001	0.001	0
Story1	D1	grua Min	-1.69	-0.03	-1.39	-0.001	-0.001	0

Table 3.6 - Response Spectrum Modal Information

Response Spectrum Case	Modal case	Mode	Period sec	Damping Ratio	U1 Acceleration mm/sec <sup>2</sup>	U2 Acceleration mm/sec <sup>2</sup>	U3 Acceleration mm/sec <sup>2</sup>	U1 Amplitude mm	U2 Amplitude mm	U3 Amplitude mm
sismo x	Modal	1	0.1	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.0078	154.5695	0
sismo x	Modal	2	0.076	0.05	7042.67	5354.08	0	-1.3358	-0.0003	0
sismo x	Modal	3	0.074	0.05	7042.67	5354.08	0	9.2523	0.0065	0
sismo x	Modal	4	0.06	0.05	7042.67	5354.08	0	-13.8766	-0.0617	0
sismo x	Modal	5	0.059	0.05	7042.67	5354.08	0	1.5008	10.3416	0
sismo x	Modal	6	0.058	0.05	7042.67	5354.08	0	22.3212	-0.1488	0
sismo x	Modal	7	0.057	0.05	7042.67	5354.08	0	64.4287	-0.1958	0
sismo x	Modal	8	0.046	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.0759	0.0825	0
sismo x	Modal	9	0.045	0.05	7042.67	5354.08	0	0.0206	11.4565	0
sismo x	Modal	10	0.044	0.05	7042.67	5354.08	0	0.0128	-14.1131	0
sismo x	Modal	11	0.043	0.05	7042.67	5354.08	0	1.524	0.5767	0
sismo x	Modal	12	0.042	0.05	7042.67	5354.08	0	-5.364	0.2216	0
sismo x	Modal	13	0.042	0.05	7042.67	5354.08	0	0.1376	5.604	0
sismo x	Modal	14	0.04	0.05	7042.67	5354.08	0	0.5509	-0.0603	0
sismo x	Modal	15	0.04	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.1117	-0.2728	0
sismo x	Modal	16	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	0.9622	0.2297	0
sismo x	Modal	17	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.2562	1.0749	0
sismo x	Modal	18	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	-4.3534	-0.0176	0
sismo x	Modal	19	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	0.0299	0.4803	0
sismo x	Modal	20	0.038	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.0019	-0.6745	0
sismo y	Modal	1	0.1	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.0078	154.5695	0
sismo y	Modal	2	0.076	0.05	7042.67	5354.08	0	-1.3358	-0.0003	0
sismo y	Modal	3	0.074	0.05	7042.67	5354.08	0	9.2523	0.0065	0
sismo y	Modal	4	0.06	0.05	7042.67	5354.08	0	-13.8766	-0.0617	0
sismo y	Modal	5	0.059	0.05	7042.67	5354.08	0	1.5008	10.3416	0
sismo y	Modal	6	0.058	0.05	7042.67	5354.08	0	22.3212	-0.1488	0
sismo y	Modal	7	0.057	0.05	7042.67	5354.08	0	64.4287	-0.1958	0
sismo y	Modal	8	0.046	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.0759	0.0825	0
sismo y	Modal	9	0.045	0.05	7042.67	5354.08	0	0.0206	11.4565	0
sismo y	Modal	10	0.044	0.05	7042.67	5354.08	0	0.0128	-14.1131	0
sismo y	Modal	11	0.043	0.05	7042.67	5354.08	0	1.524	0.5767	0
sismo y	Modal	12	0.042	0.05	7042.67	5354.08	0	-5.364	0.2216	0
sismo y	Modal	13	0.042	0.05	7042.67	5354.08	0	0.1376	5.604	0
sismo y	Modal	14	0.04	0.05	7042.67	5354.08	0	0.5509	-0.0603	0
sismo y	Modal	15	0.04	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.1117	-0.2728	0
sismo y	Modal	16	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	0.9622	0.2297	0
sismo y	Modal	17	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.2562	1.0749	0
sismo y	Modal	18	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	-4.3534	-0.0176	0
sismo y	Modal	19	0.039	0.05	7042.67	5354.08	0	0.0299	0.4803	0
sismo y	Modal	20	0.038	0.05	7042.67	5354.08	0	-0.0019	-0.6745	0
sismo y	Modal	21	0.038	0.05	7042.67	5354.08	0	0.5712	0.0009	0

### 3.2 Story Results

Table 3.7 - Story Max/Avg Displacements

Story	Load Case/Combo	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
Story4	Dead	X	0.0268	0.0268	1.001409
Story3	Dead	X	0.0084	0.0084	1.001438
Story2	Dead	X	0.0003	0.0003	1.022088
Story1	Dead	X	0.0075	0.0075	1.000546
Base	Dead	Y	0	0	

Story	Load Case/Combo	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
Story4	Live	X	0.0187	0.0187	1.000253
Story3	Live	X	0.0079	0.0079	1.000338
Story2	Live	X	0.003	0.003	1.000348
Story1	Live	X	0.0011	0.0011	1.00014
Base	Live	Y	0	0	
Story4	sismo x Max	Y	2.0658	2.0577	1.003929
Story3	sismo x Max	Y	1.0245	0.9644	1.062374
Story2	sismo x Max	Y	0.6612	0.5846	1.131109
Story1	sismo x Max	Y	0.2569	0.1865	1.37767
Base	sismo x Max	Y	0	0	
Story4	sismo y Max	Y	2.0658	2.0577	1.003929
Story3	sismo y Max	Y	1.0245	0.9644	1.062374
Story2	sismo y Max	Y	0.6612	0.5846	1.131109
Story1	sismo y Max	Y	0.2569	0.1865	1.37767
Base	sismo y Max	Y	0	0	
Story4	turbina Max	X	0.2165	0.2101	1.030655
Story3	turbina Max	X	0.1957	0.1893	1.03381
Story2	turbina Max	X	0.1559	0.149	1.046536
Story1	turbina Max	X	0.0854	0.0783	1.091274
Base	turbina Max	Y	0	0	
Story4	turbina Min	X	0.2167	0.2103	1.030513
Story3	turbina Min	X	0.1957	0.1893	1.033718
Story2	turbina Min	X	0.1559	0.149	1.046521
Story1	turbina Min	X	0.0854	0.0783	1.091295
Base	turbina Min	Y	0	0	
Story4	grua Max	X	0.3397	0.3335	1.018357
Story3	grua Max	X	0.1033	0.0978	1.056108
Story2	grua Max	X	0.0282	0.0274	1.030482
Story1	grua Max	Y	0.0074	0.0049	1.500271
Base	grua Max	Y	0	0	
Story4	grua Min	Y	0.0619	0.0464	1.334926
Story3	grua Min	Y	0.032	0.0181	1.76922
Story2	grua Min	Y	0.013	0.0109	1.193849
Story1	grua Min	X	0.0059	0.0046	1.278598
Base	grua Min	Y	0	0	
Story4	UDWal1	X	0.0375	0.0375	1.001409
Story3	UDWal1	X	0.0118	0.0118	1.001438
Story2	UDWal1	X	0.0004	0.0004	1.022088
Story1	UDWal1	X	0.0105	0.0105	1.000546
Base	UDWal1	Y	0	0	
Story4	UDWal2	X	0.0694	0.0693	1.000645
Story3	UDWal2	X	0.0252	0.0251	1.000494
Story2	UDWal2	X	0.0047	0.0047	1.001676
Story1	UDWal2	X	0.0125	0.0124	1.00044
Base	UDWal2	Y	0	0	
Story4	UDWal3 Max	Y	2.0662	2.0582	1.003888
Story3	UDWal3 Max	Y	1.0248	0.9646	1.062386
Story2	UDWal3 Max	Y	0.6614	0.5847	1.131109
Story1	UDWal3 Max	Y	0.2569	0.1865	1.377671
Base	UDWal3 Max	Y	0	0	
Story4	UDWal3 Min	Y	2.0653	2.0572	1.00397
Story3	UDWal3 Min	Y	1.0242	0.9641	1.062361
Story2	UDWal3 Min	Y	0.661	0.5844	1.131108



Story	Load Case/Combo	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
Story1	UDWal3 Min	Y	0.2568	0.1864	1.377669
Base	UDWal3 Min	Y	0	0	
Story4	UDWal4 Max	Y	2.0662	2.0582	1.003888
Story3	UDWal4 Max	Y	1.0248	0.9646	1.062386
Story2	UDWal4 Max	Y	0.6614	0.5847	1.131109
Story1	UDWal4 Max	Y	0.2569	0.1865	1.377671
Base	UDWal4 Max	Y	0	0	
Story4	UDWal4 Min	Y	2.0653	2.0572	1.00397
Story3	UDWal4 Min	Y	1.0242	0.9641	1.062361
Story2	UDWal4 Min	Y	0.661	0.5844	1.131108
Story1	UDWal4 Min	Y	0.2568	0.1864	1.377669
Base	UDWal4 Min	Y	0	0	
Story4	UDWal5 Max	Y	2.066	2.058	1.003896
Story3	UDWal5 Max	Y	1.0247	0.9645	1.06239
Story2	UDWal5 Max	Y	0.6613	0.5847	1.131115
Story1	UDWal5 Max	Y	0.2569	0.1865	1.377676
Base	UDWal5 Max	Y	0	0	
Story4	UDWal5 Min	Y	2.0655	2.0573	1.003962
Story3	UDWal5 Min	Y	1.0243	0.9642	1.062357
Story2	UDWal5 Min	Y	0.6611	0.5845	1.131102
Story1	UDWal5 Min	Y	0.2569	0.1864	1.377663
Base	UDWal5 Min	Y	0	0	
Story4	UDWal6 Max	Y	2.066	2.058	1.003896
Story3	UDWal6 Max	Y	1.0247	0.9645	1.06239
Story2	UDWal6 Max	Y	0.6613	0.5847	1.131115
Story1	UDWal6 Max	Y	0.2569	0.1865	1.377676
Base	UDWal6 Max	Y	0	0	
Story4	UDWal6 Min	Y	2.0655	2.0573	1.003962
Story3	UDWal6 Min	Y	1.0243	0.9642	1.062357
Story2	UDWal6 Min	Y	0.6611	0.5845	1.131102
Story1	UDWal6 Min	Y	0.2569	0.1864	1.377663
Base	UDWal6 Min	Y	0	0	
Story4	ENVOLVENTE Max	Y	2.0662	2.0582	1.003888
Story3	ENVOLVENTE Max	Y	1.0248	0.9646	1.062386
Story2	ENVOLVENTE Max	Y	0.6614	0.5847	1.131109
Story1	ENVOLVENTE Max	Y	0.2569	0.1865	1.377671
Base	ENVOLVENTE Max	Y	0	0	
Story4	ENVOLVENTE Min	Y	2.0655	2.0573	1.003962
Story3	ENVOLVENTE Min	Y	1.0243	0.9642	1.062357
Story2	ENVOLVENTE Min	Y	0.6611	0.5845	1.131102
Story1	ENVOLVENTE Min	Y	0.2569	0.1864	1.377663

Story	Load Case/Combo	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
Base	ENVOLVENTE Min	Y	0	0	

Table 3.8 - Story Drifts

Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story4	Dead	1520	Max Drift X	2E-06	32555.56	13000	22700
Story4	Dead	992	Max Drift Y	3.214E-08	0	12477.78	22700
Story4	Live	2030	Max Drift X	1E-06	32555.56	0	22700
Story4	Live	2210	Max Drift Y	0	33000	12477.78	22700
Story4	sismo x Max	1520	Max Drift X	6.1E-05	32555.56	13000	22700
Story4	sismo x Max	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	sismo y Max	1520	Max Drift X	6.1E-05	32555.56	13000	22700
Story4	sismo y Max	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	turbina Max	1520	Max Drift X	3E-06	32555.56	13000	22700
Story4	turbina Max	2210	Max Drift Y	4E-06	33000	12477.78	22700
Story4	turbina Min	1520	Max Drift X	3E-06	32555.56	13000	22700
Story4	turbina Min	992	Max Drift Y	4E-06	0	12477.78	22700
Story4	grua Max	1520	Max Drift X	3.1E-05	32555.56	13000	22700
Story4	grua Max	2210	Max Drift Y	0	33000	12477.78	22700
Story4	grua Min	2210	Max Drift X	0	33000	12477.78	22700
Story4	grua Min	2210	Max Drift Y	4E-06	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal1	1520	Max Drift X	3E-06	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal1	992	Max Drift Y	4.5E-08	0	12477.78	22700
Story4	UDWal2	1520	Max Drift X	6E-06	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal2	992	Max Drift Y	4.607E-08	0	12477.78	22700
Story4	UDWal3 Max	1520	Max Drift X	6.6E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal3 Max	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal3 Min	1520	Max Drift X	5.7E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal3 Min	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal4 Max	1520	Max Drift X	6.6E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal4 Max	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal4 Min	1520	Max Drift X	5.7E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal4 Min	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal5 Max	1520	Max Drift X	6.4E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal5 Max	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal5 Min	1520	Max Drift X	5.9E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal5 Min	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal6 Max	1520	Max Drift X	6.4E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal6 Max	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	UDWal6 Min	1520	Max Drift X	5.9E-05	32555.56	13000	22700
Story4	UDWal6 Min	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	ENVOLVENTE Max	1520	Max Drift X	6.6E-05	32555.56	13000	22700
Story4	ENVOLVENTE Max	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story4	ENVOLVENTE Min	1520	Max Drift X	5.9E-05	32555.56	13000	22700
Story4	ENVOLVENTE Min	2210	Max Drift Y	0.000155	33000	12477.78	22700
Story3	Dead	1520	Max Drift X	2E-06	32555.56	13000	15000



Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story3	Dead	992	Max Drift Y	2.604E-08	0	12477.78	15000
Story3	Live	2030	Max Drift X	1E-06	32555.56	0	15000
Story3	Live	2210	Max Drift Y	0	33000	12477.78	15000
Story3	sismo x Max	2030	Max Drift X	2.8E-05	32555.56	0	15000
Story3	sismo x Max	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	sismo y Max	2030	Max Drift X	2.8E-05	32555.56	0	15000
Story3	sismo y Max	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	turbina Max	2030	Max Drift X	9E-06	32555.56	0	15000
Story3	turbina Max	2210	Max Drift Y	8E-06	33000	12477.78	15000
Story3	turbina Min	2030	Max Drift X	9E-06	32555.56	0	15000
Story3	turbina Min	2210	Max Drift Y	8E-06	33000	12477.78	15000
Story3	grua Max	1520	Max Drift X	1.6E-05	32555.56	13000	15000
Story3	grua Max	828	Max Drift Y	1E-06	0	1044.44	15000
Story3	grua Min	2210	Max Drift X	0	33000	12477.78	15000
Story3	grua Min	2090	Max Drift Y	4E-06	33000	4177.78	15000
Story3	UDWal1	1520	Max Drift X	3E-06	32555.56	13000	15000
Story3	UDWal1	992	Max Drift Y	3.645E-08	0	12477.78	15000
Story3	UDWal2	1520	Max Drift X	4E-06	32555.56	13000	15000
Story3	UDWal2	992	Max Drift Y	3.77E-08	0	12477.78	15000
Story3	UDWal3 Max	2030	Max Drift X	3.1E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal3 Max	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal3 Min	2030	Max Drift X	2.4E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal3 Min	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal4 Max	2030	Max Drift X	3.1E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal4 Max	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal4 Min	2030	Max Drift X	2.4E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal4 Min	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal5 Max	2030	Max Drift X	2.9E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal5 Max	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal5 Min	2030	Max Drift X	2.6E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal5 Min	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal6 Max	2030	Max Drift X	2.9E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal6 Max	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	UDWal6 Min	2030	Max Drift X	2.6E-05	32555.56	0	15000
Story3	UDWal6 Min	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	ENVOLVENTE Max	2030	Max Drift X	3.1E-05	32555.56	0	15000
Story3	ENVOLVENTE Max	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story3	ENVOLVENTE Min	2030	Max Drift X	2.6E-05	32555.56	0	15000
Story3	ENVOLVENTE Min	2210	Max Drift Y	8.6E-05	33000	12477.78	15000
Story2	Dead	1512	Max Drift X	3E-06	29888.89	13000	10300
Story2	Dead	2202	Max Drift Y	3E-06	33000	9344.44	10300
Story2	Live	2022	Max Drift X	1E-06	29888.89	0	10300
Story2	Live	2082	Max Drift Y	1E-06	33000	1044.44	10300
Story2	sismo x Max	11	Max Drift X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	sismo x Max	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	sismo y Max	11	Max Drift X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	sismo y Max	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	turbina Max	18	Max Drift X	2.9E-05	33000	13000	10300
Story2	turbina Max	10	Max Drift Y	1.5E-05	29000	0	10300



Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story2	turbina Min	18	Max Drift X	2.9E-05	33000	13000	10300
Story2	turbina Min	10	Max Drift Y	1.5E-05	29000	0	10300
Story2	grua Max	1382	Max Drift X	6E-06	24444.44	13000	10300
Story2	grua Max	1514	Max Drift Y	2E-05	30777.78	13000	10300
Story2	grua Min	534	Max Drift X	2.1E-05	27666.67	13000	10300
Story2	grua Min	2024	Max Drift Y	2.7E-05	30777.78	0	10300
Story2	UDWal1	1512	Max Drift X	4E-06	29888.89	13000	10300
Story2	UDWal1	2202	Max Drift Y	4E-06	33000	9344.44	10300
Story2	UDWal2	1512	Max Drift X	6E-06	29888.89	13000	10300
Story2	UDWal2	2202	Max Drift Y	4E-06	33000	9344.44	10300
Story2	UDWal3 Max	11	Max Drift X	5.4E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal3 Max	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal3 Min	2144	Max Drift X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal3 Min	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal4 Max	11	Max Drift X	5.4E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal4 Max	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal4 Min	2144	Max Drift X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal4 Min	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal5 Max	11	Max Drift X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal5 Max	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal5 Min	2144	Max Drift X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal5 Min	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal6 Max	11	Max Drift X	5.3E-05	33000	0	10300
Story2	UDWal6 Max	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	UDWal6 Min	2144	Max Drift X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	UDWal6 Min	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	ENVOLVENTE Max	11	Max Drift X	5.4E-05	33000	0	10300
Story2	ENVOLVENTE Max	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story2	ENVOLVENTE Min	2144	Max Drift X	5.4E-05	33000	6300	10300
Story2	ENVOLVENTE Min	10	Max Drift Y	9.7E-05	29000	0	10300
Story1	Dead	1892	Max Drift X	2E-06	24444.44	0	4900
Story1	Dead	992	Max Drift Y	5.177E-09	0	12477.78	4900
Story1	Live	1382	Max Drift X	2.312E-07	24444.44	13000	4900
Story1	Live	2318	Max Drift Y	0	25000	12477.78	4900
Story1	sismo x Max	1892	Max Drift X	2.9E-05	24444.44	0	4900
Story1	sismo x Max	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	sismo y Max	1892	Max Drift X	2.9E-05	24444.44	0	4900
Story1	sismo y Max	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	turbina Max	1382	Max Drift X	1.7E-05	24444.44	13000	4900
Story1	turbina Max	992	Max Drift Y	1E-05	0	12477.78	4900
Story1	turbina Min	1382	Max Drift X	1.7E-05	24444.44	13000	4900
Story1	turbina Min	992	Max Drift Y	1E-05	0	12477.78	4900
Story1	grua Max	1892	Max Drift X	0	24444.44	0	4900
Story1	grua Max	2318	Max Drift Y	2E-06	25000	12477.78	4900
Story1	grua Min	1382	Max Drift X	1E-06	24444.44	13000	4900
Story1	grua Min	2318	Max Drift Y	0	25000	12477.78	4900
Story1	UDWal1	1892	Max Drift X	2E-06	24444.44	0	4900
Story1	UDWal1	992	Max Drift Y	7.248E-09	0	12477.78	4900
Story1	UDWal2	1892	Max Drift X	3E-06	24444.44	0	4900



Story	Load Case/Combo	Label	Item	Drift	X mm	Y mm	Z mm
Story1	UDWal2	992	Max Drift Y	7.911E-09	0	12477.78	4900
Story1	UDWal3 Max	1892	Max Drift X	2.7E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal3 Max	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal3 Min	1892	Max Drift X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal3 Min	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal4 Max	1892	Max Drift X	2.7E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal4 Max	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal4 Min	1892	Max Drift X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal4 Min	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal5 Max	1892	Max Drift X	2.8E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal5 Max	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal5 Min	1892	Max Drift X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal5 Min	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal6 Max	1892	Max Drift X	2.8E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal6 Max	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	UDWal6 Min	1892	Max Drift X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	UDWal6 Min	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	ENVOLVENTE Max	1892	Max Drift X	2.8E-05	24444.44	0	4900
Story1	ENVOLVENTE Max	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900
Story1	ENVOLVENTE Min	1892	Max Drift X	3.1E-05	24444.44	0	4900
Story1	ENVOLVENTE Min	992	Max Drift Y	5.2E-05	0	12477.78	4900

Table 3.9 - Story Forces

Story	Load Case/Combo	Location	P tonf	VX tonf	VY tonf	T tonf-mm	MX tonf-mm	MY tonf-mm
Story4	Dead	Top	377.6145	0	0	0	2473870.55	-7943116.38
Story4	Dead	Bottom	1006.6596	0	0	0	6562663.69	-18470371
Story4	Live	Top	78	0	0	0	507000	-2418000
Story4	Live	Bottom	78	0	0	0	507000	-2418000
Story4	sismo x Max	Top	95.1294	617.2798	485.8287	10113125.19	693007.85	3203055.43
Story4	sismo x Max	Bottom	127.3555	842.8184	660.3806	13225418.66	4910826.49	8563223.44
Story4	sismo y Max	Top	95.1294	617.2798	485.8287	10113125.19	693007.85	3203055.43
Story4	sismo y Max	Bottom	127.3555	842.8184	660.3806	13225418.66	4910826.49	8563223.44
Story4	turbina Max	Top	2.0672	17.7259	0.9281	107954.19	10247.65	90830.15
Story4	turbina Max	Bottom	3.0831	37.4771	8.495	135591.92	25992.13	117776.22
Story4	turbina Min	Top	-2.1554	-15.753	-1.2372	-120474.15	-10755.77	-86380.03
Story4	turbina Min	Bottom	-3.2504	-37.1681	-8.6226	-108944.85	-17778.14	-98464.52
Story4	grua Max	Top	2937.2194	0	1.7075	1349127.81	10915058.11	0
Story4	grua Max	Bottom	14632.0116	0	0	154966.71	85719968.88	0
Story4	grua Min	Top	0	-285.7004	0	0	0	-56281839
Story4	grua Min	Bottom	0	-200.9152	-23.856	0	0	-291004655
Story4	UDWal1	Top	528.6604	0	0	0	3463418.77	-11120363
Story4	UDWal1	Bottom	1409.3235	0	0	0	9187729.17	-25858520
Story4	UDWal2	Top	661.2604	0	0	0	4325318.77	-15230963
Story4	UDWal2	Bottom	1541.9235	0	0	0	10049629.17	-29969120
Story4	UDWal3 Max	Top	664.6476	617.2798	485.8287	10113125.19	4419096.04	-9748340.04



Story	Load Case/Combo	Location	P tonf	VX tonf	VY tonf	T tonf-mm	MX tonf-mm	MY tonf-mm
Story4	UDWal3 Max	Bottom	1483.1801	842.8184	660.3806	13225418.66	13747906.11	-17547240
Story4	UDWal3 Min	Top	474.3888	-617.2798	-485.8287	-10113125	3033080.34	-16154451
Story4	UDWal3 Min	Bottom	1228.4691	-842.8184	-660.3806	-13225419	3926253.12	-34673687
Story4	UDWal4 Max	Top	664.6476	617.2798	485.8287	10113125.19	4419096.04	-9748340.04
Story4	UDWal4 Max	Bottom	1483.1801	842.8184	660.3806	13225418.66	13747906.11	-17547240
Story4	UDWal4 Min	Top	474.3888	-617.2798	-485.8287	-10113125	3033080.34	-16154451
Story4	UDWal4 Min	Bottom	1228.4691	-842.8184	-660.3806	-13225419	3926253.12	-34673687
Story4	UDWal5 Max	Top	434.9825	617.2798	485.8287	10113125.19	2919491.35	-3945749.31
Story4	UDWal5 Max	Bottom	1033.3492	842.8184	660.3806	13225418.66	10817223.81	-8060110.55
Story4	UDWal5 Min	Top	244.7237	-617.2798	-485.8287	-10113125	1533475.65	-10351860
Story4	UDWal5 Min	Bottom	778.6382	-842.8184	-660.3806	-13225419	995570.83	-25186557
Story4	UDWal6 Max	Top	434.9825	617.2798	485.8287	10113125.19	2919491.35	-3945749.31
Story4	UDWal6 Max	Bottom	1033.3492	842.8184	660.3806	13225418.66	10817223.81	-8060110.55
Story4	UDWal6 Min	Top	244.7237	-617.2798	-485.8287	-10113125	1533475.65	-10351860
Story4	UDWal6 Min	Bottom	778.6382	-842.8184	-660.3806	-13225419	995570.83	-25186557
Story4	ENVOLVENTE Max	Top	664.6476	617.2798	485.8287	10113125.19	4419096.04	-3945749.31
Story4	ENVOLVENTE Max	Bottom	1541.9235	842.8184	660.3806	13225418.66	13747906.11	-8060110.55
Story4	ENVOLVENTE Min	Top	244.7237	-617.2798	-485.8287	-10113125	1533475.65	-16154451
Story4	ENVOLVENTE Min	Bottom	778.6382	-842.8184	-660.3806	-13225419	995570.83	-34673687
Story3	Dead	Top	1121.1317	0	0	0	7306731.77	-22019003
Story3	Dead	Bottom	2130.7274	0	0	0	13869104.19	-38677333
Story3	Live	Top	156	0	0	0	1014000	-4836000
Story3	Live	Bottom	156	0	0	0	1014000	-4836000
Story3	sismo x Max	Top	175.348	1022.5688	793.728	16364508.61	5102493.03	9959780.41
Story3	sismo x Max	Bottom	244.3298	1355.79	1043.9472	21090739.8	9479822.57	16107391.87
Story3	sismo y Max	Top	175.348	1022.5688	793.728	16364508.61	5102493.03	9959780.41
Story3	sismo y Max	Bottom	244.3298	1355.79	1043.9472	21090739.8	9479822.57	16107391.87
Story3	turbina Max	Top	8.2981	241.6148	53.0283	546676.7	14254.84	265204.55
Story3	turbina Max	Bottom	9.4444	569.8304	136.1834	1357435.58	441154.16	1773630.79
Story3	turbina Min	Top	-8.9753	-241.2289	-53.0223	-546904.94	-21814.39	-237697.52
Story3	turbina Min	Bottom	-10.298	-569.7297	-136.438	-1358233.89	-439238.22	-1769634.71
Story3	grua Max	Top	10637.3648	495.3264	61.4439	0	61734988.97	0
Story3	grua Max	Bottom	12757.3737	660.9537	159.9804	0	82580184.67	0
Story3	grua Min	Top	0	0	0	-2192884.6	0	-211229306
Story3	grua Min	Bottom	0	0	0	-2314859.36	0	-254551794
Story3	UDWal1	Top	1569.5843	0	0	0	10229424.47	-30826605
Story3	UDWal1	Bottom	2983.0184	0	0	0	19416745.87	-54148267
Story3	UDWal2	Top	1834.7843	0	0	0	11953224.47	-39047805
Story3	UDWal2	Bottom	3248.2184	0	0	0	21140545.87	-62369467
Story3	UDWal3 Max	Top	1771.7626	1022.5688	793.728	16364508.61	15503407.73	-23608974
Story3	UDWal3 Max	Bottom	3102.739	1355.79	1043.9472	21090739.8	28083702.81	-38284275
Story3	UDWal3 Min	Top	1421.0665	-1022.5688	-793.728	-16364509	5298421.68	-43528535
Story3	UDWal3 Min	Bottom	2614.0795	-1355.79	-1043.9472	-21090740	9124057.67	-70499059
Story3	UDWal4 Max	Top	1771.7626	1022.5688	793.728	16364508.61	15503407.73	-23608974
Story3	UDWal4 Max	Bottom	3102.739	1355.79	1043.9472	21090739.8	28083702.81	-38284275
Story3	UDWal4 Min	Top	1421.0665	-1022.5688	-793.728	-16364509	5298421.68	-43528535
Story3	UDWal4 Min	Bottom	2614.0795	-1355.79	-1043.9472	-21090740	9124057.67	-70499059



Story	Load Case/Combo	Location	P tonf	VX tonf	VY tonf	T tonf-mm	MX tonf-mm	MY tonf-mm
Story3	UDWal5 Max	Top	1184.3665	1022.5688	793.728	16364508.61	11678551.61	-9857322.71
Story3	UDWal5 Max	Bottom	2161.9844	1355.79	1043.9472	21090739.8	21962016.34	-18702208
Story3	UDWal5 Min	Top	833.6705	-1022.5688	-793.728	-16364509	1473565.56	-29776884
Story3	UDWal5 Min	Bottom	1673.3249	-1355.79	-1043.9472	-21090740	3002371.21	-50916992
Story3	UDWal6 Max	Top	1184.3665	1022.5688	793.728	16364508.61	11678551.61	-9857322.71
Story3	UDWal6 Max	Bottom	2161.9844	1355.79	1043.9472	21090739.8	21962016.34	-18702208
Story3	UDWal6 Min	Top	833.6705	-1022.5688	-793.728	-16364509	1473565.56	-29776884
Story3	UDWal6 Min	Bottom	1673.3249	-1355.79	-1043.9472	-21090740	3002371.21	-50916992
Story3	ENVOLVENTE Max	Top	1834.7843	1022.5688	793.728	16364508.61	15503407.73	-9857322.71
Story3	ENVOLVENTE Max	Bottom	3248.2184	1355.79	1043.9472	21090739.8	28083702.81	-18702208
Story3	ENVOLVENTE Min	Top	833.6705	-1022.5688	-793.728	-16364509	1473565.56	-43528535
Story3	ENVOLVENTE Min	Bottom	1673.3249	-1355.79	-1043.9472	-21090740	3002371.21	-70499059
Story2	Dead	Top	2245.1994	0	0	0	14613172.26	-42225966
Story2	Dead	Bottom	3405.1605	0	0	0	22152919.31	-61365324
Story2	Live	Top	234	0	0	0	1521000	-7254000
Story2	Live	Bottom	234	0	0	0	1521000	-7254000
Story2	sismo x Max	Top	276.4513	1505.2971	1144.1795	23393692.55	9607890.15	17012428.96
Story2	sismo x Max	Bottom	331.9749	1773.9684	1310.2159	26513818.18	16025399.95	25051648.65
Story2	sismo y Max	Top	276.4513	1505.2971	1144.1795	23393692.55	9607890.15	17012428.96
Story2	sismo y Max	Bottom	331.9749	1773.9684	1310.2159	26513818.18	16025399.95	25051648.65
Story2	turbina Max	Top	8.4969	717.3075	171.9314	1627246.54	454609.62	1980159.28
Story2	turbina Max	Bottom	8.302	967.4863	239.2165	2299962.66	1687865.5	6971934.9
Story2	turbina Min	Top	-9.5985	-717.3267	-172.3007	-1628272.67	-452363.18	-1976846.73
Story2	turbina Min	Bottom	-6.4968	-967.5081	-239.7751	-2301453.49	-1682824.63	-6965184.31
Story2	grua Max	Top	10287.9851	1232.6134	157.8216	0	69393871.67	0
Story2	grua Max	Bottom	6875.133	440.4577	133.5043	0	54724938.95	0
Story2	grua Min	Top	0	0	0	-6289350.12	0	-205448715
Story2	grua Min	Bottom	0	0	0	-1642264.28	0	-219838477
Story2	UDWal1	Top	3143.2792	0	0	0	20458441.17	-59116352
Story2	UDWal1	Bottom	4767.2247	0	0	0	31014087.03	-85911453
Story2	UDWal2	Top	3541.0792	0	0	0	23044141.17	-71448152
Story2	UDWal2	Bottom	5165.0247	0	0	0	33599787.03	-98243253
Story2	UDWal3 Max	Top	3375.4506	1505.2971	1144.1795	23393692.55	29775605.48	-44837528
Story2	UDWal3 Max	Bottom	4880.9255	1773.9684	1310.2159	26513818.18	45617799.09	-60722506
Story2	UDWal3 Min	Top	2822.548	-1505.2971	-1144.1795	-23393693	10559825.18	-78862386
Story2	UDWal3 Min	Bottom	4216.9758	-1773.9684	-1310.2159	-26513818	13566999.18	-110825803
Story2	UDWal4 Max	Top	3375.4506	1505.2971	1144.1795	23393692.55	29775605.48	-44837528
Story2	UDWal4 Max	Bottom	4880.9255	1773.9684	1310.2159	26513818.18	45617799.09	-60722506
Story2	UDWal4 Min	Top	2822.548	-1505.2971	-1144.1795	-23393693	10559825.18	-78862386
Story2	UDWal4 Min	Bottom	4216.9758	-1773.9684	-1310.2159	-26513818	13566999.18	-110825803
Story2	UDWal5 Max	Top	2297.1308	1505.2971	1144.1795	23393692.55	22759745.19	-20990940
Story2	UDWal5 Max	Bottom	3396.6193	1773.9684	1310.2159	26513818.18	35963027.33	-30177143
Story2	UDWal5 Min	Top	1744.2282	-1505.2971	-1144.1795	-23393693	3543964.89	-55015798
Story2	UDWal5 Min	Bottom	2732.6696	-1773.9684	-1310.2159	-26513818	3912227.42	-80280440
Story2	UDWal6 Max	Top	2297.1308	1505.2971	1144.1795	23393692.55	22759745.19	-20990940
Story2	UDWal6 Max	Bottom	3396.6193	1773.9684	1310.2159	26513818.18	35963027.33	-30177143



Story	Load Case/Combo	Location	P tonf	VX tonf	VY tonf	T tonf-mm	MX tonf-mm	MY tonf-mm
Story2	UDWal6 Min	Top	1744.2282	-1505.2971	-1144.1795	-23393693	3543964.89	-55015798
Story2	UDWal6 Min	Bottom	2732.6696	-1773.9684	-1310.2159	-26513818	3912227.42	-80280440
Story2	ENVOLVENTE Max	Top	3541.0792	1505.2971	1144.1795	23393692.55	29775605.48	-20990940
Story2	ENVOLVENTE Max	Bottom	5165.0247	1773.9684	1310.2159	26513818.18	45617799.09	-30177143
Story2	ENVOLVENTE Min	Top	1744.2282	-1505.2971	-1144.1795	-23393693	3543964.89	-78862386
Story2	ENVOLVENTE Min	Bottom	2732.6696	-1773.9684	-1310.2159	-26513818	3912227.42	-110825803
Story1	Dead	Top	2421.8813	53.1194	0.0405	-344251.5	15759953.14	-28923878
Story1	Dead	Bottom	3286.0614	53.1194	0.0405	-344251.5	21376925.48	-39465844
Story1	Live	Top	139.1259	3.761	0.0025	-24325.22	904359.28	-3305108.99
Story1	Live	Bottom	139.1259	3.761	0.0025	-24325.22	904347.12	-3286680.16
Story1	sismo x Max	Top	783.4148	1267.5752	665.9611	8897645.88	11086883.39	3345137.47
Story1	sismo x Max	Bottom	793.319	1357.2143	720.5979	10088633.5	13928024.11	5661507.7
Story1	sismo y Max	Top	783.4148	1267.5752	665.9611	8897645.88	11086883.39	3345137.47
Story1	sismo y Max	Bottom	793.319	1357.2143	720.5979	10088633.5	13928024.11	5661507.7
Story1	turbina Max	Top	240.0185	725.3959	138.9978	4290716.65	634455.65	987392.61
Story1	turbina Max	Bottom	248.9089	801.8377	155.0412	4605561.19	65508.71	2694614.54
Story1	turbina Min	Top	-240.0289	-725.4115	-139.2509	-4290995.81	-633247.19	-978270.52
Story1	turbina Min	Bottom	-248.9195	-801.8539	-155.3302	-4606060.06	-44140.03	-2693179.05
Story1	grua Max	Top	4449.7645	1257.6703	104.8689	0	40560442.26	0
Story1	grua Max	Bottom	13866.0106	23.8959	19.0195	581490.31	104241596	0
Story1	grua Min	Top	0	0	0	-7847927.13	0	-106811529
Story1	grua Min	Bottom	0	-0.3478	0	0	0	-220324335
Story1	UDWal1	Top	3390.6338	74.3672	0.0567	-481952.1	22063934.4	-40493429
Story1	UDWal1	Bottom	4600.486	74.3672	0.0567	-481952.1	29927695.68	-55252182
Story1	UDWal2	Top	3627.1479	80.7608	0.061	-523304.97	23601345.18	-46112114
Story1	UDWal2	Bottom	4837	80.7608	0.061	-523304.97	31465085.78	-60839539
Story1	UDWal3 Max	Top	3984.6738	1338.6757	666.0148	8436924.98	31917273.92	-36941096
Story1	UDWal3 Max	Bottom	5074.8032	1428.3148	720.6517	9627912.6	41779614.86	-47779148
Story1	UDWal3 Min	Top	2417.8442	-1196.4747	-665.9073	-9358366.78	9743507.15	-43631371
Story1	UDWal3 Min	Bottom	3488.1651	-1286.1138	-720.5442	-10549354	13923566.65	-59102163
Story1	UDWal4 Max	Top	3984.6738	1338.6757	666.0148	8436924.98	31917273.92	-36941096
Story1	UDWal4 Max	Bottom	5074.8032	1428.3148	720.6517	9627912.6	41779614.86	-47779148
Story1	UDWal4 Min	Top	2417.8442	-1196.4747	-665.9073	-9358366.78	9743507.15	-43631371
Story1	UDWal4 Min	Bottom	3488.1651	-1286.1138	-720.5442	-10549354	13923566.65	-59102163
Story1	UDWal5 Max	Top	2963.108	1315.3827	665.9975	8587819.53	25270841.22	-22686353
Story1	UDWal5 Max	Bottom	3750.7743	1405.0217	720.6344	9778807.15	33167257.04	-29857752
Story1	UDWal5 Min	Top	1396.2783	-1219.7678	-665.9246	-9207472.23	3097074.44	-29376628
Story1	UDWal5 Min	Bottom	2164.1362	-1309.4068	-720.5615	-10398460	5311208.83	-41180768
Story1	UDWal6 Max	Top	2963.108	1315.3827	665.9975	8587819.53	25270841.22	-22686353
Story1	UDWal6 Max	Bottom	3750.7743	1405.0217	720.6344	9778807.15	33167257.04	-29857752
Story1	UDWal6 Min	Top	1396.2783	-1219.7678	-665.9246	-9207472.23	3097074.44	-29376628
Story1	UDWal6 Min	Bottom	2164.1362	-1309.4068	-720.5615	-10398460	5311208.83	-41180768
Story1	ENVOLVENTE Max	Top	3984.6738	1338.6757	666.0148	8587819.53	31917273.92	-22686353
Story1	ENVOLVENTE Max	Bottom	5074.8032	1428.3148	720.6517	9778807.15	41779614.86	-29857752
Story1	ENVOLVENTE Min	Top	1396.2783	-1219.7678	-665.9246	-9358366.78	3097074.44	-46112114
Story1	ENVOLVENTE Min	Bottom	2164.1362	-1309.4068	-720.5615	-10549354	5311208.83	-60839539

Table 3.10 - Story Stiffness

Story	Load Case	Shear X tonf	Drift X mm	Stiffness X tonf/mm	Shear Y tonf	Drift Y mm	Stiffness Y tonf/mm
Story4	sismo x	842.8184	0.5	1786.29168	660.3806	1.1	580.99932
Story3	sismo x	1355.79	0.1	10406.49358	1043.9472	0.4	2697.04676
Story2	sismo x	1773.9684	0.2	8086.92332	1310.2159	0.5	2808.16714
Story1	sismo x	1357.2143	0.1	9701.1861	720.5979	0.2	3864.648
Story4	sismo y	842.8184	0.5	1786.29168	660.3806	1.1	580.99932
Story3	sismo y	1355.79	0.1	10406.49358	1043.9472	0.4	2697.04676
Story2	sismo y	1773.9684	0.2	8086.92332	1310.2159	0.5	2808.16714
Story1	sismo y	1357.2143	0.1	9701.1861	720.5979	0.2	3864.648

3.3 Modal Results

Table 3.11 - Modal Periods and Frequencies

Case	Mode	Period sec	Frequenc y cyc/sec	Circular Frequenc y rad/sec	Eigenvalu e rad <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
Modal	1	0.1	10.046	63.1194	3984.0611
Modal	2	0.076	13.14	82.5586	6815.9283
Modal	3	0.074	13.545	85.1088	7243.5071
Modal	4	0.06	16.6	104.3027	10879.059
Modal	5	0.059	16.899	106.1778	11273.7305
Modal	6	0.058	17.158	107.8089	11622.7575
Modal	7	0.057	17.51	110.0183	12104.018
Modal	8	0.046	21.837	137.2068	18825.6993
Modal	9	0.045	22.441	140.9979	19880.4105
Modal	10	0.044	22.791	143.1999	20506.2105
Modal	11	0.043	23.434	147.2414	21680.0176
Modal	12	0.042	23.759	149.2853	22286.0979
Modal	13	0.042	23.984	150.6971	22709.6169
Modal	14	0.04	24.804	155.8472	24288.3428
Modal	15	0.04	24.879	156.322	24436.5588
Modal	16	0.039	25.731	161.6699	26137.1515
Modal	17	0.039	25.773	161.9363	26223.3603
Modal	18	0.039	25.894	162.6994	26471.1065
Modal	19	0.039	25.964	163.1364	26613.4779
Modal	20	0.038	26.271	165.0644	27246.2725
Modal	21	0.038	26.484	166.4037	27690.18

Table 3.12 - Modal Participating Mass Ratios (Part 1 of 2)

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ
Modal	1	0.1	0	0.5458	0	0	0.5458	0
Modal	2	0.076	0.0001	0	0.0149	0.0001	0.5458	0.0149
Modal	3	0.074	0.0037	0	0.0193	0.0038	0.5458	0.0342
Modal	4	0.06	0.019	6.494E-07	0.0111	0.0228	0.5458	0.0453
Modal	5	0.059	0.0002	0.0196	0	0.023	0.5653	0.0453
Modal	6	0.058	0.056	4.307E-06	0.0191	0.079	0.5653	0.0644
Modal	7	0.057	0.5059	8.082E-06	0.0047	0.5848	0.5654	0.0691
Modal	8	0.046	1.698E-06	3.473E-06	3.851E-06	0.5848	0.5654	0.0691
Modal	9	0.045	0	0.0747	0	0.5848	0.64	0.0691
Modal	10	0.044	0	0.1205	0	0.5848	0.7606	0.0691
Modal	11	0.043	0.0009	0.0002	3.191E-06	0.5858	0.7608	0.0691

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ
Modal	12	0.042	0.0119	3.51E-05	0	0.5976	0.7608	0.0691
Modal	13	0.042	8.123E-06	0.0233	0	0.5976	0.7841	0.0691
Modal	14	0.04	0.0001	3.088E-06	6.393E-07	0.5978	0.7841	0.0691
Modal	15	0.04	6.193E-06	0.0001	0	0.5978	0.7842	0.0691
Modal	16	0.039	0.0005	0.0001	2.564E-05	0.5983	0.7842	0.0692
Modal	17	0.039	3.755E-05	0.0011	2.399E-06	0.5984	0.7854	0.0692
Modal	18	0.039	0.011	0	0.0006	0.6094	0.7854	0.0698
Modal	19	0.039	5.284E-07	0.0002	0	0.6094	0.7856	0.0698
Modal	20	0.038	0	0.0005	0	0.6094	0.7861	0.0698

Table 3.12 - Modal Participating Mass Ratios (Part 2 of 2)

Case	Mode	RX	RY	RZ	Sum RX	Sum RY	Sum RZ
Modal	1	0.3291	0	0.0008	0.3291	0	0.0008
Modal	2	0	0.0012	0	0.3291	0.0012	0.0008
Modal	3	0	0.0305	0	0.3291	0.0317	0.0008
Modal	4	7.026E-07	0.0324	2.346E-05	0.3291	0.0641	0.0009
Modal	5	0.016	0.0001	0.597	0.3451	0.0642	0.5978
Modal	6	3.047E-06	0.0762	0.0001	0.3451	0.1404	0.598
Modal	7	6.81E-06	0.1189	0.0002	0.3451	0.2592	0.5982
Modal	8	0	7.751E-06	6.415E-07	0.3451	0.2592	0.5982
Modal	9	0.0158	0	0	0.3609	0.2592	0.5982
Modal	10	0.0527	0	0.0126	0.4136	0.2592	0.6108
Modal	11	0.0001	0.0002	0.0001	0.4137	0.2594	0.6109
Modal	12	1.413E-05	0.0031	3.078E-05	0.4137	0.2626	0.611
Modal	13	0.009	1.903E-06	0.0288	0.4227	0.2626	0.6398
Modal	14	1.187E-05	2.323E-05	0.0001	0.4227	0.2626	0.6399
Modal	15	0.0002	9.431E-07	0.0029	0.4229	0.2626	0.6428
Modal	16	3.696E-05	0.0003	0.0003	0.4229	0.2629	0.6431
Modal	17	0.0008	2.066E-05	0.0063	0.4238	0.2629	0.6494
Modal	18	0	0.0055	2.135E-06	0.4238	0.2684	0.6494
Modal	19	0.0001	0	0.0029	0.4239	0.2684	0.6522
Modal	20	0.0021	0	1.57E-05	0.426	0.2684	0.6523
Modal	21	0	0.0001	0	0.426	0.2685	0.6523

Table 3.13 - Modal Load Participation Ratios

Case	Item Type	Item	Static %	Dynamic %
Modal	Acceleration	UX	99.87	94.93
Modal	Acceleration	UY	99.81	92.16
Modal	Acceleration	UZ	99.96	97.21
Modal	Load Pattern	Dead	100	94.32
Modal	Load Pattern	Live	100	98.91
Modal	Load Pattern	superdead	0	0
Modal	Load Pattern	sismo x	0	0
Modal	Load Pattern	sismo y	0	0

Table 3.14 - Modal Direction Factors

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	RZ
Modal	1	0.1	0	0.998	0	0.002



Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	RZ
Modal	2	0.076	0.003	0	0.997	0
Modal	3	0.074	0.089	0	0.911	0
Modal	4	0.06	0.377	0	0.622	0
Modal	5	0.059	0.001	0.083	0	0.917
Modal	6	0.058	0.68	0	0.319	0.001
Modal	7	0.057	0.992	0	0.008	0
Modal	8	0.046	0.06	0.463	0.373	0.104
Modal	9	0.045	0	0.918	0	0.082
Modal	10	0.044	0	0.986	0	0.014
Modal	11	0.043	0.402	0.258	0.005	0.334
Modal	12	0.042	0.971	0.008	0.001	0.021
Modal	13	0.042	0	0.209	0	0.791
Modal	14	0.04	0.152	0.01	0.002	0.836
Modal	15	0.04	0	0.01	0	0.989
Modal	16	0.039	0.171	0.032	0.015	0.782
Modal	17	0.039	0.001	0.04	0	0.959
Modal	18	0.039	0.912	0	0.087	0.001
Modal	19	0.039	0	0.024	0	0.976
Modal	20	0.038	0	0.838	0	0.162
Modal	21	0.038	0.955	0	0.027	0.018