



**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE**  
**CONSTRUCCIONES**

**Análisis dinámico no lineal del “Hospital Básico Paute”,**  
**medidas de mitigación y refuerzo para disminuir su**  
**vulnerabilidad estructural**

**Trabajo de grado previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE**  
**CONSTRUCCIONES**

**Autor:**

**PATRICIO RAFAEL ORELLANA REGALADO**

**Director:**

**JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ CALERO**

**CUENCA, ECUADOR**

**2017**

## **DEDICATORIA**

La presente tesis la dedico a mi familia y amigos,  
principalmente a mis padres, Rafael y Patricia,  
y a mi hermana Verónica; quienes me han apoyado  
a lo largo de mi formación profesional.

I dedicate this to my American parents Todd and Liz,  
to my brothers and sister Glenn, Mark and Sara; who inspired  
and motivate me to become a good professional and a better person.

Patricio Rafael Orellana Regalado

## **AGRADECIMIENTO**

De manera muy especial, quiero agradecer al Ing. Francisco Flores, Ph.D., por su invaluable colaboración para la realización de este trabajo investigativo; gracias también al Ing. José Vázquez Calero por su apoyo y enseñanzas durante este período de mi carrera profesional.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	1
AGRADECIMIENTO .....	2
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	9
INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES .....	2
OBJETIVOS .....	2
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos .....	2
METODOLOGÍA .....	3
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO .....	4
Definiciones .....	4
Amenaza .....	4
Riesgo .....	4
Análisis dinámico .....	5
Análisis no lineal .....	5
Rótula plástica .....	5
Vulnerabilidad estructural .....	6
Período fundamental de una estructura .....	6
Espectro de respuesta para diseño .....	6
Histéresis .....	7
Efectos P-Delta .....	7
Elementos tipo fibra .....	7
Rehabilitación .....	8
Funcionalidad continua .....	8
Aislamiento sísmico .....	8
CAPÍTULO I .....	11
SISTEMATIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DISPONIBLE DEL “HOSPITAL BÁSICO PAUTE” .....	11
1.1 Identificación de amenazas .....	11
1.2 Suelo de cimentación .....	13

1.3	Fallas estructurales.....	13
1.4	Modelo matemático idealizado de la estructura.....	14
CAPÍTULO II.....		16
ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE PÓRTICOS REPRESENTATIVOS DE LA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA .....		16
2.1	Selección de ejes representativos de la estructura .....	16
2.2	Análisis modal .....	17
2.3	Análisis dinámico lineal espectral .....	18
2.3.1	Consideraciones previas al diseño.....	18
2.3.2	Espectro de diseño para la zona de localización del Hospital Básico Paute. Período de retorno de 475 años .....	21
2.3.3	Escalamiento de los sismos .....	26
2.3.4	Derivas máximas de piso.....	31
2.4	Análisis estático no-lineal (pushover).....	36
2.4.1	Cortante basal de diseño V .....	36
2.4.2	Cortante basal de la estructura para un período de 475 años.....	37
2.5	Análisis dinámico no-lineal (response-history) .....	39
2.5.1	Consideraciones previas al diseño.....	39
2.5.2	Espectro de diseño para la zona de localización del Hospital Básico Paute. Período de retorno de 2500 años .....	39
2.5.3	Escalamiento de los sismos .....	40
2.5.4	Derivas máximas inelástica de piso.....	43
2.5.5	Cortante basal de la estructura para un período de 2500 años.....	49
2.5.6	Vibración libre.....	51
CAPÍTULO III .....		53
MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA LOS PÓRTICOS REPRESENTATIVOS DE LA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA .....		53
3.1	Generalidades.....	53
3.2	Pre diseño de aisladores sísmicos .....	54
3.3	Análisis modal con aisladores sísmicos.....	54
CAPÍTULO IV .....		56
ANÁLISIS PRESUPUESTARIO DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....		56
CONCLUSIONES.....		57
RECOMENDACIONES .....		59
BIBLIOGRAFÍA .....		60
ANEXOS.....		62

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Hospital Básico Paute.....	11
<b>Figura 1-2:</b> Mapa de percepción de riesgo sísmico.....	12
<b>Figura 1-3:</b> Resultado de columnas y vigas que cumplen con uno o más criterios de diseño.....	15
<b>Figura 2-1:</b> Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño y valor del factor de zona Z.....	22
<b>Figura 2-2:</b> Espectro elástico horizontal de diseño de aceleraciones.....	24
<b>Figura 2-3:</b> Espectro elástico horizontal de diseño de aceleraciones en zona de Paute ( $T = 475$ años).....	25
<b>Figura 2-4:</b> Espectro elástico horizontal de aceleraciones del sismo AOTA.....	26
<b>Figura 2-5:</b> Espectro elástico horizontal de aceleraciones del sismo AMNT.....	27
<b>Figura 2-6:</b> Espectro elástico horizontal de aceleraciones del sismo AES2.....	27
<b>Figura 2-7:</b> Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 1.....	28
<b>Figura 2-8:</b> Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 2.....	29
<b>Figura 2-9:</b> Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 3.....	30
<b>Figura 2-10:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AOTA-N.....	31
<b>Figura 2-11:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AMNT-N.....	32
<b>Figura 2-12:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AES2-E.....	32
<b>Figura 2-13:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AOTA-N.....	33
<b>Figura 2-14:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AMNT-N.....	33
<b>Figura 2-15:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AES2-E.....	34
<b>Figura 2-16:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AOTA-N.....	34
<b>Figura 2-17:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AMNT-N.....	35
<b>Figura 2-18:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AES2-E.....	35
<b>Figura 2-19:</b> Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 1.....	37
<b>Figura 2-20:</b> Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 2.....	38
<b>Figura 2-21:</b> Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 3.....	38
<b>Figura 2-22:</b> Curvas de peligro sísmico para Cuenca a diferentes períodos estructurales.....	39
<b>Figura 2-23:</b> Espectro máximo considerado de aceleraciones en zona de Paute ( $T = 2500$ años).....	40
<b>Figura 2-24:</b> Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 1. $T = 2500$ años.....	41
<b>Figura 2-25:</b> Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 2. $T = 2500$ años.....	42
<b>Figura 2-26:</b> Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 3. $T = 2500$ años.....	43
<b>Figura 2-27:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AOTA-N.....	44
<b>Figura 2-28:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AMNT-N.....	45
<b>Figura 2-29:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AES2-E.....	45
<b>Figura 2-30:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AOTA-N.....	46
<b>Figura 2-31:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AMNT-N.....	46
<b>Figura 2-32:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AES2-E.....	47
<b>Figura 2-33:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AOTA-N.....	47
<b>Figura 2-34:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AMNT-N.....	48

<b>Figura 2-35:</b> Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AES2-E. ....	48
<b>Figura 2-36:</b> Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 1. ....	49
<b>Figura 2-37:</b> Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 2. ....	50
<b>Figura 2-38:</b> Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 3. ....	50
<b>Figura 2-39:</b> Comparación de rigidez inicial. Eje aporticado No. 1. ....	51
<b>Figura 2-40:</b> Comparación de rigidez inicial. Eje aporticado No. 2. ....	52
<b>Figura 2-41:</b> Comparación de rigidez inicial. Eje aporticado No. 3. ....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Resultados del estudio del suelo de cimentación.....	13
<b>Tabla 2-1:</b> Resultados del análisis modal elástico.....	17
<b>Tabla 2-2:</b> Resultados del análisis modal inelástico.....	17
<b>Tabla 2-3:</b> Tipo de uso, destino e importancia de la estructura.....	18
<b>Tabla 2-4:</b> Coeficientes de irregularidad en planta.....	19
<b>Tabla 2-5:</b> Coeficientes de irregularidad en elevación.....	19
<b>Tabla 2-6:</b> Coeficiente R para sistemas estructurales dúctiles.....	21
<b>Tabla 2-7:</b> Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.....	22
<b>Tabla 2-8:</b> Clasificación de los perfiles del suelo.....	22
<b>Tabla 2-9:</b> Tipos de suelo y factores de sitio Fa.....	23
<b>Tabla 2-10:</b> Tipos de suelo y factores de sitio Fd.....	23
<b>Tabla 2-11:</b> Tipos de suelo y factores del comportamiento inelástico del subsuelo Fs.....	24
<b>Tabla 2-12:</b> Datos y factores de escala para eje aporticado No. 1.....	28
<b>Tabla 2-13:</b> Datos y factores de escala para eje aporticado No. 2.....	29
<b>Tabla 2-14:</b> Datos y factores de escala para eje aporticado No. 3.....	30
<b>Tabla 2-15:</b> Valores de $\Delta_M$ máximos, expresados como fracción de la altura de entrepiso.....	31
<b>Tabla 2-16:</b> Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 1.....	32
<b>Tabla 2-17:</b> Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 2.....	34
<b>Tabla 2-18:</b> Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 3.....	35
<b>Tabla 2-19:</b> Cortante basal calculado con la metodología de la NEC-14.....	37
<b>Tabla 2-20:</b> Datos y factores de escala para eje aporticado No. 1. T = 2500 años.....	41
<b>Tabla 2-21:</b> Datos y factores de escala para eje aporticado No. 2. T = 2500 años.....	42
<b>Tabla 2-22:</b> Datos y factores de escala para eje aporticado No. 3. T = 2500 años.....	43
<b>Tabla 2-23:</b> Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 1.....	45
<b>Tabla 2-24:</b> Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 2.....	47
<b>Tabla 2-25:</b> Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 3.....	48
<b>Tabla 2-26:</b> Cortante basal calculado con la metodología de la NEC-14 para un período de retorno de 2500 años.....	49
<b>Tabla 3-1:</b> Dimensiones del dispositivo.....	54
<b>Tabla 3-2:</b> Resultados del análisis modal elástico con aisladores sísmicos.....	55
<b>Tabla 3-3:</b> Resultados del análisis modal inelástico con aisladores sísmicos.....	55

**RESUMEN**

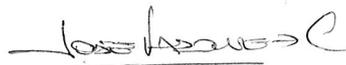
El “Hospital Básico Paute” está ubicado en el cantón Paute, perteneciente a la Coordinación Zonal de Salud 6 del Ecuador. Debido a la antigüedad de la edificación, ésta no cumple con lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014) para el diseño de estructuras esenciales. Se realizó el análisis dinámico de la estructura dentro del rango no lineal ante acciones sísmicas, con el propósito de evaluar su vulnerabilidad. Además la edificación debe cumplir con el concepto de funcionalidad continua durante y luego de un evento sísmico para proteger la vida de sus ocupantes y estar operativa. El propósito de usar aisladores sísmicos en la base como medida de mitigación es minimizar el riesgo de daños tanto en elementos estructurales como no estructurales.

**Palabras claves:** amenaza sísmica, vulnerabilidad, mitigación, análisis dinámico no lineal, aisladores.



José Fernando Vázquez Calero

**Director de Trabajo de Titulación**



José Fernando Vázquez Calero

**Director de Escuela**



Patricio Rafael Orellana Regalado

**Autor**

**ABSTRACT**

The “*Paute* Basic Hospital” located in the canton of *Paute*, is part of the 6<sup>th</sup> zone coordination of the Ministry of Public Health of Ecuador. Due to the age of the building, the construction does not comply with the Ecuadorian Construction Standard (NEC, 2014) for the design of essential structures. The dynamic analysis of the structure within the nonlinear range was carried out as a response to seismic actions, in order to evaluate its vulnerability. In addition, the building must comply with the concept of continuous functionality to protect the lives of its occupants and remain operational during and after a seismic event. The purpose of using seismic isolators at the base as a mitigation measure, was aimed at minimizing the risk of damage to both structural and non-structural elements.

**Keywords:** seismic hazard, vulnerability, mitigation, nonlinear dynamic analysis, isolators.



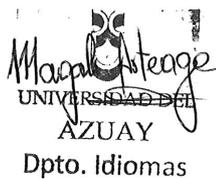
José Fernando Vázquez Calero  
**Thesis Director**



José Fernando Vázquez Calero  
**School Director**

Patricio Orellana R.

Patricio Rafael Orellana Regalado  
**Author**



Maple Stage  
UNIVERSIDAD DEL  
AZUAY  
Dpto. Idiomas



Translated by,  
**Lic. Lourdes Crespo**

Orellana Regalado Patricio Rafael

Trabajo de Titulación

Ing. José Vázquez Calero, M. Sc.

Septiembre, 2017

**ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DEL “HOSPITAL BÁSICO PAUTE”,  
MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y REFUERZO PARA DISMINUIR SU  
VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL**

**INTRODUCCIÓN**

El derecho universal a la salud demanda de los gobiernos la atención a la población, lamentablemente en nuestro país no se destina los recursos suficientes para contar con establecimientos que salvaguarden la integridad de sus ocupantes. La falta de fiscalización de las obra produce la evasión de la normativa de construcción que rige el diseño de estas estructuras poniendo en riesgo la vida de los pacientes en caso de desastres.

El diseño y construcción de estructuras hospitalarias debe cumplir con lo expresado en la norma vigente, correspondiente a un análisis dinámico no lineal para un período de retorno del sismo de 2500 años, puesto que en el Ecuador estas entidades son consideradas como esenciales y/o peligrosas.

Para el caso de hospitales que no cumplan con los parámetros de diseño, se deberán aplicar las medidas de mitigación correspondientes para garantizar la funcionalidad continua de la estructura luego de desastres. Estas medidas buscan el reforzamiento, aislamiento o rigidización de la estructura de acuerdo a su requerimiento con el objetivo de disminuir su vulnerabilidad frente a desastres.

Es importante que las medidas de mitigación, a aplicarse en estructuras en funcionamiento, se evalúen de acuerdo al costo que tendría construir un nuevo hospital para comprender cuál es la mejor opción.

## **ANTECEDENTES**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) junto con la Organización Panamericana de la Salud (OPS) han puesto énfasis en lo indispensables que son los establecimientos de salud en situaciones de emergencia, debiendo estos resistir a las amenazas que se presenten y además que la prestación de servicios no se vea afectada.

Hace un año se inició con la evaluación estructural en el rango lineal del Hospital Paute por parte del Ingeniero Josué Pesantez. Tuvo como objetivo principal el determinar la vulnerabilidad de la entidad hospitalaria ante amenazas identificadas de acuerdo al entorno en que se localiza y mediante el análisis dinámico lineal de sus elementos estructurales y no estructurales.

Para la determinación de las amenazas que pueden afectar al establecimiento se utilizó el Índice de Seguridad Hospitalaria (ISH) de acuerdo al entorno en donde se encuentra localizado el hospital y sobre la base de mapas de riesgo de la Dirección Nacional de Riesgo (DNR). Se realizó un estudio geotécnico del suelo estableciendo su capacidad portante, identificar su tipo y clasificación para realizar su columna estratigráfica.

Con la ayuda de ensayos no destructivos y procedimientos visuales se determinaron las características arquitectónicas y de ingeniería de la estructura, además el estado en que se encuentran los elementos estructurales y no estructurales. Estas características junto con los parámetros establecidos en el Capítulo de Cargas Sísmicas y Diseño Sismo Resistente perteneciente a la normativa ecuatoriana permitieron realizar una maqueta virtual y su posterior modelación en el rango dinámico lineal.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Realizar el análisis dinámico no lineal del “Hospital Básico Paute”, del cantón Paute, provincia del Azuay, para determinar medidas pertinentes de mitigación y reforzamiento.

### **Objetivos específicos**

- Sistematizar la evaluación estructural disponible del “Hospital Básico Paute”.

- Realizar el análisis dinámico no lineal de pórticos representativos de la edificación hospitalaria.
- Diseñar aisladores sísmicos para los pórticos representativos como reforzamiento de la edificación hospitalaria, utilizando software especializado y según el criterio de funcionalidad continua y las normativas: NEC-14, FEMA P695, FEMA 356, ACI 318S-14, ACI 440.2R-08 y ASCE 7-05.
- Realizar un análisis costo beneficio de las medidas de mitigación evaluadas.

## **METODOLOGÍA**

Se recopilará la información arquitectónica y estructural del Hospital Básico Paute de la maqueta virtual elaborada como parte de la evaluación estructural realizada por el Ingeniero Josué Pesantez. De ésta se obtendrán características como: materiales utilizados para la construcción de la estructura tanto de elementos estructurales como no estructurales, características acerca de la cubierta, armados de losas, vigas y columnas, luces máximas de pórticos; que serán utilizados para identificar los pórticos más representativos de la edificación.

Realizar el análisis dinámico no lineal de los pórticos representativos en software especializado OpenSees, que permita determinar el comportamiento de la edificación ante sismo en el rango no lineal con y sin un sistema de aislación. Para la modelación se utilizarán parámetros establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014), del Instituto Americano del Concreto (ACI 318, 2011) y de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE 7-05, 2006).

Se obtendrán resultados como el período fundamental y los modos de vibración libre de la estructura, las curvas histeréticas de los elementos estructurales correspondientes a los pórticos analizados, localización de las zonas de rótulas plásticas y a partir del análisis dinámico se dimensionarán los aisladores sísmicos que cumplan con las sollicitaciones de la estructura.

Finalmente se realizará un presupuesto conceptual para determinar la rentabilidad de las medidas de mitigación frente al costo del hospital y su posterior implementación en la estructura.

## **ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO**

Luego de los eventos sísmicos ocurridos en abril del año 2016, y en relación con las consecuencias que el país sufrió, es necesario que se destinen los recursos necesarios para reducir los riesgos de las entidades hospitalarias frente a desastres.

Según lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2014), los establecimientos de salud son catalogados como edificaciones esenciales y/o peligrosas. Por ende, estos establecimientos deben ser diseñados y reforzados garantizando su operatividad durante eventos sísmicos, mediante el análisis no lineal de sus elementos estructurales y no estructurales (ACI 318, 2011).

“Los hospitales requieren consideraciones especiales en relación con la mitigación de riesgos debido a la función que desempeñan en el medio en donde se encuentran, a sus características de ocupación y a su papel durante situaciones de desastre.” (Organización Panamericana de la Salud, 2000)

### **Definiciones**

#### **Amenaza**

Es el factor de riesgo externo de un sujeto o sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural o tecnológico que puede presentarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes y/o el medio ambiente, expresado matemáticamente como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en cierto período de tiempo (Organización Panamericana de la Salud, 2000).

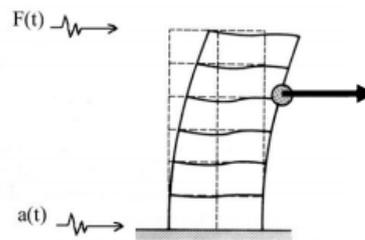
#### **Riesgo**

Es el nivel de destrucción o pérdida esperada obtenida de la combinación de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas, matemáticamente expresado como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en un cierto sitio y en un cierto período de tiempo. (Organización Panamericana de la Salud, 2000).

## Análisis dinámico

Una acción tiene carácter dinámico cuando su variación con el tiempo es rápida y da origen a fuerzas de inercia comparables en magnitud con las fuerzas estáticas entre las que se encuentran los sismos. Se considera un punto en la estructura en donde se desea calcular: deformaciones, aceleraciones y tensiones. Estas cargas externas pueden ser:

- deterministas: cuando su variación temporal es perfectamente conocida.
- no deterministas: cuando sus parámetros son definidos estadísticamente.



Definición de la respuesta dinámica.

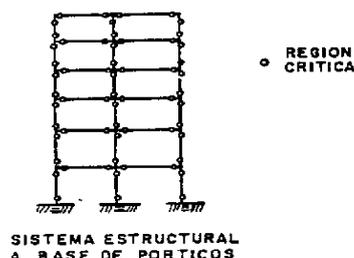
Fuente: (Cassano, 2009)

## Análisis no lineal

Se fundamenta en una mejor modelación del comportamiento estructural para obtener una respuesta más realista que al suponer un comportamiento elástico. Se puede emplear para el diseño de estructuras donde las no linealidades están bien definidas, como en estructuras con disipadores de energía y aisladores sísmicos. (Amateco & Escobar, 2006)

## Rótula plástica

Se denomina rótula plástica a la sección de un elemento que tiene impedido el giro y que al superar el límite elástico va adquiriendo un mayor grado de libertad variando el comportamiento de la estructura. La estructura colapsa cuando se produce el número de rótulas suficientes para crear un mecanismo. (Guasch, 2014)



Regiones críticas en sistemas estructurales de concreto armado.

Fuente: (Grases, 1989)

## Vulnerabilidad estructural

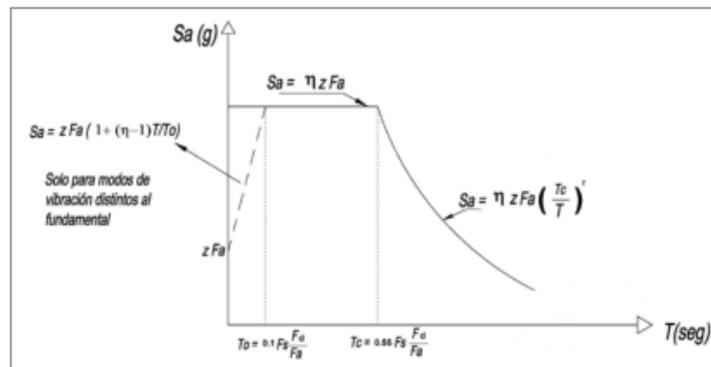
La vulnerabilidad estructural se refiere a la susceptibilidad que la estructura presenta frente a posibles daños en aquellas partes del establecimiento hospitalario que lo mantienen en pie ante un sismo intenso. Esto incluye cimientos, columnas, muros, vigas y losas. (Organización Panamericana de la Salud, 2000)

## Período fundamental de una estructura

Se define como el tiempo en el cual una estructura da un ciclo completo cuando experimenta vibración no forzada. El período es una función de la masa y rigidez de la estructura, y de él depende la magnitud de la fuerza sísmica que deberá soportar la edificación. (NEC, 2014)

## Espectro de respuesta para diseño

Representa la respuesta de la estructura al sismo, basado en las condiciones geológicas, tectónicas, sismológicas y del tipo de suelo asociados con el sitio de emplazamiento de la estructura o según requerimientos específicos de una norma. Con fines de diseño se utiliza una fracción de amortiguamiento respecto al crítico del 5% con el propósito de representar los efectos dinámicos del sismo de diseño. El espectro máximo considerado se refiere a un período de retorno de un sismo de 2500 años. (NEC, 2014)

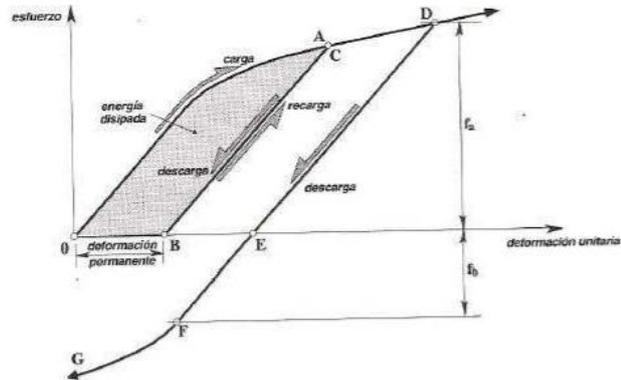


Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones.

Fuente: (NEC, 2014)

## Histéresis

La histéresis se refiere al comportamiento de los materiales estructurales ante una sollicitación, ya sea de fuerza o deformación impuesta. La energía capaz de disipar el material estructural en el rango no lineal se asocia con el área comprendida dentro de las curvas histeréticas. (Mayorga, 2011)



Efecto de carga y descarga, con inversión del sentido de carga.

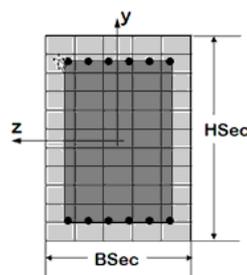
Fuente: (Mayorga, 2011)

## Efectos P-Delta

Los efectos P-Delta corresponden a efectos adicionales de segundo orden que producen un incremento en las fuerzas internas, momentos y derivas de la estructura, por lo que deben ser considerados para la evaluación de la estabilidad estructural. (NEC, 2014)

## Elementos tipo fibra

Las secciones estructurales se dividen en elementos viga y columna, estos se discretizan en fibras de formas geométricas simples y regulares; la respuesta esfuerzo deformación de los materiales es integrada para obtener la respuesta de la sección completa. (OpenSees, 2010)



Sección Fibra: Sección de Concreto Reforzado – Sección Simétrica Rectangular, Núcleo de Hormigón Confinado.

Fuente: (OpenSees, 2010)

## Rehabilitación

- Método de rehabilitación sistemático: implica la comprobación minuciosa de cada elemento o componente estructural existente, el diseño de nuevos elementos y la verificación de la interacción global aceptable para desplazamientos esperados y fuerzas internas. Se concentra en el comportamiento no lineal de la respuesta estructural. (FEMA 273, 1997)
- Método de rehabilitación simplificado: su intención es reducir el riesgo sísmico cuando sea posible y adecuado. Este método emplea procedimientos de análisis de fuerza estáticos equivalentes. (FEMA 273, 1997)

## Funcionalidad continua

El criterio de funcionalidad continua de una edificación comprende diseños y estándares que cumplan con las normativas; y limiten los daños causados por sismos a componentes arquitectónicos, contenido y la estructura a un promedio menor del 2% de costo de reemplazo. Para su cumplimiento se requiere de aisladores sísmicos sobredimensionados que se equilibran con la reducción en el costo de estructuras de gran ductilidad. (Zayas, 2017)

## Aislamiento sísmico

Se fundamenta en separar la superestructura de los movimientos del suelo o de la subestructura mediante el uso de elementos flexibles ubicados a nivel de fundación o por encima de la subestructura. Los aisladores sísmicos logran que el período de vibración de la estructura aumente con respecto a una sin aislamiento reduciendo así la rigidez del sistema estructural. Esta técnica de reforzamiento se puede aplicar tanto a nuevas edificaciones, como en aquellas que necesiten ser rehabilitadas. (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012)

**Aisladores elastoméricos:** conformados por láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero, de sección circular o rectangular que permite el desplazamiento horizontal entre la estructura y el suelo.

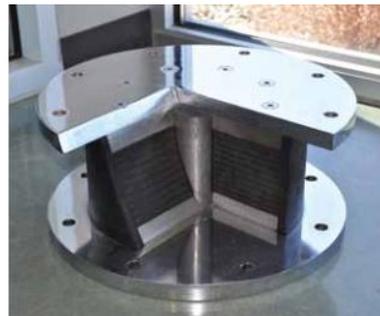
- De bajo amortiguamiento (LDRB): presentan un amortiguamiento de 2% hasta 5% por lo que trabajan conjuntamente en la estructura con disipadores de energía.



Aislador tipo LDRB.

Fuente: (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012)

- Con núcleo de plomo (LRB): el núcleo se encuentra en el centro del aislador, su nivel de amortiguación alcanza un 30%. Durante la acción sísmica el núcleo de plomo presenta deformaciones plásticas y disipa la energía en forma de calor; pasado el evento la estructura vuelve a su posición original y el núcleo de plomo se recristaliza.



Aislador tipo LRB.

Fuente: (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012)

- De alto amortiguamiento (HDRB): las láminas de elastómeros se fabrican con elementos adicionales como: carbón, aceites y resinas; que aumentan su nivel de amortiguación hasta 15%. Durante la acción sísmica combinan la flexibilidad y disipación de energía en los primeros ciclos de carga sobre la edificación.

**Aisladores deslizantes:** utilizan una superficie deslizante generalmente de acero inoxidable sobre la que se desliza una placa de acero revestida de Politetra Fluoro Etileno que soporta la estructura. Disipa energía por medio de fuerzas de rozamiento y deben ser acompañados por aisladores elastoméricos para regresar la estructura a su posición original.

- Apoyos deslizantes planos: consisten en dos superficies con bajo coeficiente de rozamiento, adheridas a la estructura y a la fundación. Requieren de materiales elastoméricos entre ellas en caso de presentarse sismos; esta combinación, junto con el uso de disipadores de energía, permite ahorros en el costo del sistema de aislación.



Apoyo deslizante plano.

Fuente: (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012)

- Péndulos friccionales: conformados por un deslizador articulado, tienen la ventaja de ser autocentrantes luego de un sismo por estar sobre una superficie cóncava.



Péndulo friccional.

Fuente: (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012)

## CAPÍTULO I

### SISTEMATIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DISPONIBLE DEL “HOSPITAL BÁSICO PAUTE”

#### 1.1 Identificación de amenazas

En la Cartera de Servicios Hospitalarios del Ministerio de Salud del Ecuador, el Hospital Básico Paute forma parte de la Coordinación Zonal de Salud 6. Denominado como una entidad de salud de tipo “básico”, para la atención de sus pacientes cuenta con:

- 15 camas.
- Servicios: consulta externa, hospitalización, emergencia las 24 horas, centro quirúrgico y obstétrico, laboratorio clínico e imagenología.
- Equipamiento y unidades: ecosonógrafo y rayos X.



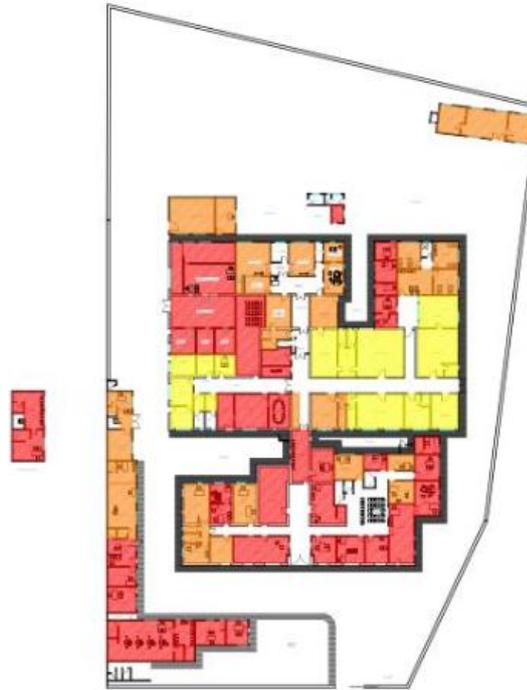
**Figura 1-1:** Hospital Básico Paute.

Fuente: (Diario El Tiempo, 2015)

Las amenazas identificadas tanto internas como externas a la edificación permiten reconocer las falencias tanto en la etapa de planificación como en la construcción del hospital. No se tomaron en cuenta aspectos como: el lugar de emplazamiento del hospital es una zona de deslizamientos de masas, las construcciones aledañas y las vías de acceso.

- Riesgo sísmico: es la principal amenaza entorno al hospital debido a localizarse en una zona considerada de alto peligro sísmico según la aceleración esperada de 0,25g indicada en la zonificación sísmica dentro de la norma ecuatoriana de

la construcción (NEC, 2014). Para su análisis, el hospital fue discretizado en 84 áreas y en 4 niveles de riesgo percibido.



**Figura 1-2:** Mapa de percepción de riesgo sísmico.

Fuente: (Pesantez, 2016)

- Cementerio municipal: la contaminación que produce la descomposición de materia orgánica, proliferación de plagas, concentración de personas durante funerales que bloquean las vías de acceso a todos quienes deseen ingresar al hospital, especialmente a la ambulancia.
- Deslizamientos: la zona en donde se asienta el hospital es susceptible a deslizamientos de masas, a pesar de contar con un muro de contención de hormigón ciclópeo, este se encuentra muy cercano al transformador de energía que alimenta al hospital; es decir, en caso de presentarse un deslizamiento existe una alta probabilidad de que el hospital quede sin suministro de luz eléctrica.
- Terrenos vecinos: destinados principalmente para la agricultura por inundación, lo que ha ocasionado el ingreso de agua dentro del terreno del hospital. (Pesantez, 2016)

## 1.2 Suelo de cimentación

De acuerdo con el ensayo de penetración estándar, el hospital se encuentra sobre un suelo limoso, catalogado según la SUCS como ML de mediana compresibilidad y plasticidad. En presencia de lluvias pierde resistencia al cortante debido a la presión producida por el agua en los vacíos.

Para una cimentación corrida de 2,5 m de profundidad empleada en el hospital se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 1-1:** Resultados del estudio del suelo de cimentación.

Profundidad de Cimentación (m)	Q adm (Ton/m <sup>2</sup> )	Asentamiento al borde del cimientto (mm)	Asentamiento al centro del cimientto (mm)
1,00	7,57	0,78	2,92
1,50	10,93	1,03	3,86
2,00	14,61	1,27	4,75
2,50	24,36	1,63	6,12

Fuente: (Pesantez, 2016)

Existe dos taludes alrededor, el primero localizado a 2,76 m sobre el nivel del hospital, en donde se encuentra el área de audiología y que no representa un peligro. El segundo localizado detrás del área de laboratorios, vacunación y junto a los transformadores de energía eléctrica que proveen al hospital; este sí representa un peligro debido a su altura que supera los 3 m, pendiente de 34% y a las zonas que podría afectar en caso de deslizamientos. (Pesantez, 2016)

## 1.3 Fallas estructurales

La construcción de esta estructura se rigió al Código Ecuatoriano de la Construcción de 1977 que no contaba con pautas para el diseño sismo resistente de estructuras. Mediante el análisis realizado por el Ing. Josué Pesantez de la estructura con la norma vigente (NEC, 2014) se comprueba que las secciones de vigas y columnas son mínimas y cuyo acero de refuerzo no está construido para soportar el esfuerzo de cortante debido al espaciamiento uniforme en toda su longitud.

El Hospital Básico Paute es un establecimiento sometido a varias ampliaciones en su estructura debido a la demanda de pacientes y a la necesidad de prestar nuevos

servicios. Estas ampliaciones fueron realizadas en varias áreas de la estructura en donde las fallas encontradas corresponden principalmente a la variación de la capacidad resistente de los elementos estructurales entre  $280 \text{ kg/cm}^2$  y  $130 \text{ kg/cm}^2$  por ser construidos en diferentes etapas. Mampostería sin confinamiento en las áreas de Farmacia y Limpieza y la eliminación de una columna principal produciendo deflexión de las vigas que convergían en ese punto dentro del área de Emergencia.

En la cubierta se aprecia el desgaste pronunciado de las planchas debido a la exposición al medio ambiente.

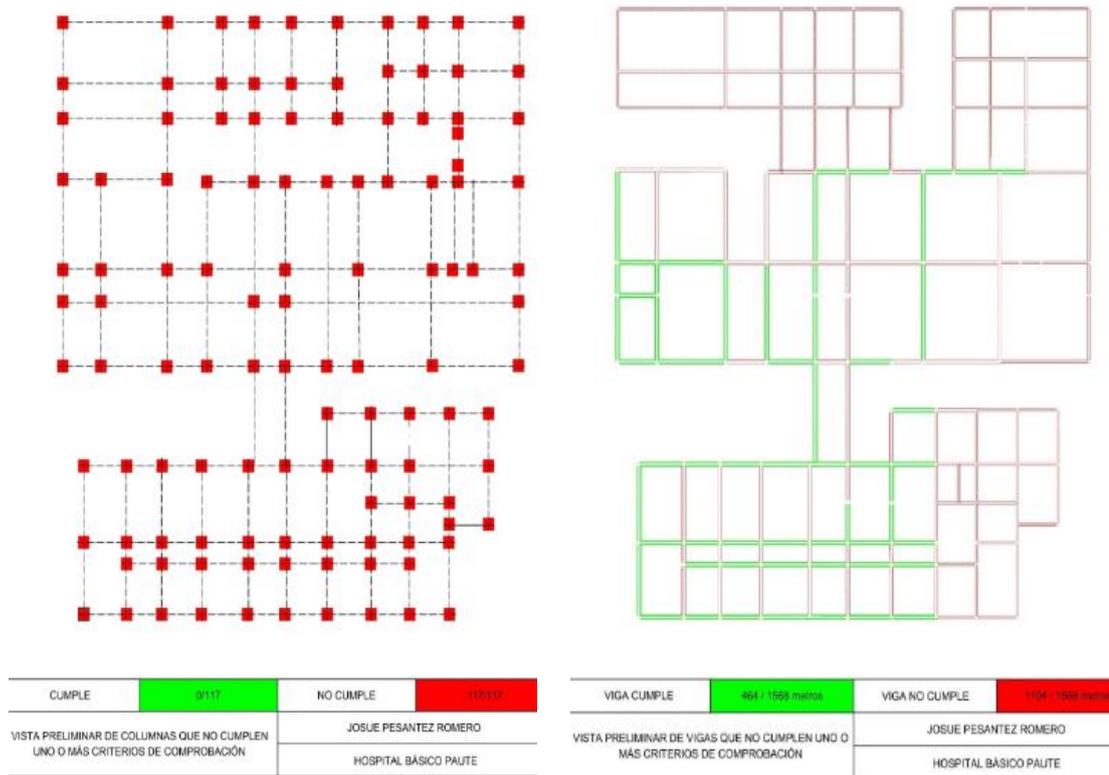
Mediante la aplicación del Índice de Seguridad Hospitalaria en elementos estructurales, no estructurales y funcionalidad del hospital, se concluyó que la calificación de la edificación es de tipo B con un nivel de inseguridad del 55%. (Pesantez, 2016)

#### **1.4 Modelo matemático idealizado de la estructura**

Se realizó un modelo virtual generado en un entorno BIM (*Building Information Modeling*) en Archicad. Este cuenta con detalles arquitectónicos y estructurales en base a un levantamiento físico de la estructura y planos existentes. Para la modelación dinámica se exportó el modelo al software Cypecad para comprobar si el armado real de la estructura cumple con lo establecido en las normas ecuatoriana y americana para el diseño sismo resistente.

Se realizaron comprobaciones en elementos de hormigón armado bajo combinaciones no sísmicas y sísmicas de carga, y para esfuerzos a cortante, compresión, flexocompresión, además disposiciones para armado longitudinal y transversal.

Como resultado de las comprobaciones se elaboraron mapas con los resultados de vigas y columnas señalando aquellos elementos que cumplen o no con uno o varios criterios de comprobación. Ninguna de las 117 columnas de la estructura cumple con al menos un criterio de diseño, mientras que 1104 de un total de 1568 vigas (70,41%) no cumplen con al menos un criterio de diseño. (Pesantez, 2016)



**Figura 1-3:** Resultado de columnas y vigas que cumplen con uno o más criterios de diseño.

Fuente: (Pesantez, 2016)

Como medidas de mitigación, el Ing. Josué Pesantez recomienda el uso de fibras reforzadas con polímeros (FRP) para añadir resistencia a los elementos estructurales que no cumplen con los criterios de diseño. Colocar diagonales rigidizadoras de acero en los vanos de los pasillos que no poseen ventanas. Reconfigurar la residencia de empleados y agregar una salida para casos de emergencia.

## CAPÍTULO II

### ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE PÓRTICOS REPRESENTATIVOS DE LA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA

#### 2.1 Selección de ejes representativos de la estructura

Los materiales que componen a la estructura de una planta del Hospital Básico Paute son hormigón armado para vigas y columnas de dos secciones tipo para cada uno de los elementos estructurales, perfilaría de acero y planchas de fibrocemento para la cubierta, y mampostería confinada de bloques de cemento.

Para la selección de los ejes representativos se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Geometría: en el bloque frontal de la estructura existen ejes verticales de pórticos semejantes, por lo que es necesario el análisis de uno de ellos.
- Cargas actuantes: cumpliendo con el criterio de seguridad se debe analizar los ejes de pórticos con el caso más desfavorable de cargas, evitando los ejes localizados en los bordes.
- Concentración de personas: es esencial el estudio de aquellos ejes localizados en zonas como emergencia, cuidados intensivos, pasillos hacia las habitaciones, área de quirófanos.
- Accesos y salidas de emergencia: en caso de eventos sísmicos, las vías de evacuación son fundamentales para guiar a los ocupantes del hospital hasta los puntos de encuentro indicados. En el caso del Hospital Básico Paute los pasillos que conducen hacia las salidas del área de emergencia y la entrada principal del hospital.

Se escogieron tres ejes de pórticos que de acuerdo con sus características cumplen con los aspectos indicados anteriormente. Para el estudio de dichos ejes aportados se utilizó el software libre OpenSees desarrollado por la Universidad de Berkeley, California. Los resultados que se obtienen de la modelación en software especializado serán referidos a cada uno de los ejes aportados acuerdo a su nomenclatura indicada en los Anexos No. 1 y No. 2.

## 2.2 Análisis modal

El objetivo del análisis modal es determinar características dinámicas de sistemas aporticados tales como las frecuencias naturales, los modos de vibración y el amortiguamiento. En el análisis elástico, los materiales y elementos conformantes de los pórticos trabajan en el rango lineal obedeciendo la Ley de Hooke; mientras que en el análisis modal inelástico se obtiene el comportamiento de los materiales en el rango no lineal. (Rodríguez, 2005)

**Tabla 2-1:** Resultados del análisis modal elástico.

	Modos de vibración	Frecuencias naturales (rad/s)	Período de vibración estructural (s)
Eje aporticado 1	1	18,7648	<b>0,2880</b>
	2	553,5518	0,0098
	3	586,2023	0,0092
	4	613,0291	0,0088
Eje aporticado 2	1	27,0389	<b>0,2000</b>
	2	728,8047	0,0074
	3	792,9409	0,0068
	4	820,3856	0,0066
Eje aporticado 3	1	16,4023	<b>0,3310</b>
	2	566,1651	0,0096
	3	573,6479	0,0095
	4	630,5597	0,0086

**Tabla 2-2:** Resultados del análisis modal inelástico.

	Modos de vibración	Frecuencias naturales (rad/s)	Período de vibración estructural (s)
Eje aporticado 1	1	21,9377	<b>0,2860</b>
	2	563,9589	0,0111
	3	574,8013	0,0109
	4	615,3255	0,0102
Eje aporticado 2	1	30,4634	<b>0,2063</b>
	2	635,5399	0,0099
	3	686,5671	0,0092
	4	721,1683	0,0087
Eje aporticado 3	1	18,5974	<b>0,3379</b>
	2	490,3829	0,0128
	3	496,9596	0,0126
	4	546,8231	0,0115

El mayor valor del período de vibración estructural para cada eje apoticado se utilizará en el proceso de escalamiento de los sismos dentro de los análisis: dinámico lineal espectral, estático no lineal (pushover) y dinámico no lineal (response-history).

### 2.3 Análisis dinámico lineal espectral

El análisis se realizará tomando en cuenta los parámetros de acuerdo a la normativa vigente para diseño sismo resistente NEC-SE-DS 14 que rige en el país.

#### 2.3.1 Consideraciones previas al diseño

##### 2.3.1.1 Coeficiente de importancia I

El diseño de la estructura debe ser afectada de acuerdo a su importancia, con el objetivo de permanecer operativas durante y luego de un evento sísmico. Para el caso de hospitales el coeficiente de importancia será 1,5

**Tabla 2-3:** Tipo de uso, destino e importancia de la estructura.

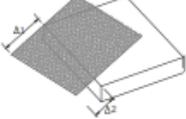
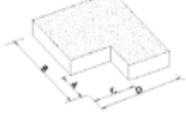
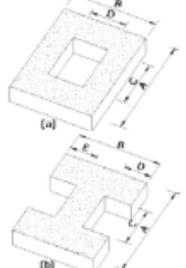
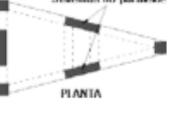
Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Coeficiente I
<b>Edificaciones esenciales</b>	Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
<b>Estructuras de ocupación especial</b>	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3
<b>Otras estructuras</b>	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0

Fuente: (NEC, 2014)

##### 2.3.1.2 Coeficientes de regularidad en planta $\phi_P$ y en elevación $\phi_E$

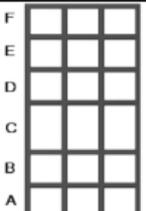
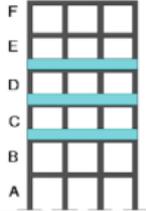
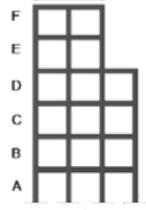
Al ser la estructura de una planta con irregularidad en el sistema de piso se tomará el valor de 0,9 para el coeficiente de regularidad en planta. Para el coeficiente de regularidad en elevación se debe tener en cuenta que si una estructura no cumple con alguna de las irregularidades, como es el caso de este hospital, se considerará un valor de 1.

**Tabla 2-4:** Coeficientes de irregularidad en planta.

<p><b>Tipo 1 - Irregularidad torsional</b>  <math>\phi_t=0.9</math>  <math>\Delta &gt; 1.2 \frac{(\Delta 1 + \Delta 2)}{2}</math></p> <p>Existe irregularidad por torsión, cuando la máxima deriva de piso de un extremo de la estructura calculada incluyendo la torsión accidental y medida perpendicularmente a un eje determinado, es mayor que 1,2 veces la deriva promedio de los extremos de la estructura con respecto al mismo eje de referencia. La torsión accidental se define en el numeral 6.4.2 del presente código.</p>	
<p><b>Tipo 2 - Retrocesos excesivos en las esquinas</b> <math>\phi_t=0.9</math>  <math>A &gt; 0.15B</math> y <math>C &gt; 0.15D</math></p> <p>La configuración de una estructura se considera irregular cuando presenta entrantes excesivos en sus esquinas. Un entrante en una esquina se considera excesivo cuando las proyecciones de la estructura, a ambos lados del entrante, son mayores que el 15% de la dimensión de la planta de la estructura en la dirección del entrante.</p>	
<p><b>Tipo 3 - Discontinuidades en el sistema de piso</b>  <math>\phi_t=0.9</math>  a) <math>CxD &gt; 0.5AxB</math>  b) <math>[Cx D + CxE] &gt; 0.5Ax B</math></p> <p>La configuración de la estructura se considera irregular cuando el sistema de piso tiene discontinuidades apreciables o variaciones significativas en su rigidez, incluyendo las causadas por aberturas, entrantes o huecos, con áreas mayores al 50% del área total del piso o con cambios en la rigidez en el plano del sistema de piso de más del 50% entre niveles consecutivos.</p>	
<p><b>Tipo 4 - Ejes estructurales no paralelos</b>  <math>\phi_t=0.9</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando los ejes estructurales no son paralelos o simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales de la estructura.</p>	
<p>Nota: La descripción de estas irregularidades no faculta al calculista o diseñador a considerarlas como normales, por lo tanto la presencia de estas irregularidades requiere revisiones estructurales adicionales que garanticen el buen comportamiento local y global de la edificación.</p>	

Fuente: (NEC, 2014)

**Tabla 2-5:** Coeficientes de irregularidad en elevación.

<p><b>Tipo 1 - Piso flexible</b>  <math>\phi_e=0.9</math>  Rigidez <math>K_i &lt; 0.70</math> Rigidez <math>K_o</math>  <math>Rigidez &lt; 0.80 \frac{(K_{i-1} + K_i + K_{i+1})}{3}</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando la rigidez lateral de un piso es menor que el 70% de la rigidez lateral del piso superior o menor que el 80 % del promedio de la rigidez lateral de los tres pisos superiores.</p>	
<p><b>Tipo 2 - Distribución de masa</b>  <math>\phi_e=0.9</math>  <math>m_o &gt; 1.50 m_e</math> ó  <math>m_o &gt; 1.50 m_c</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando la masa de cualquier piso es mayor que 1,5 veces la masa de uno de los pisos adyacentes, con excepción del piso de cubierta que sea más liviano que el piso inferior.</p>	
<p><b>Tipo 3 - Irregularidad geométrica</b>  <math>\phi_e=0.9</math>  <math>a &gt; 1.3 b</math></p> <p>La estructura se considera irregular cuando la dimensión en planta del sistema resistente en cualquier piso es mayor que 1,3 veces la misma dimensión en un piso adyacente, exceptuando el caso de los altillos de un solo piso.</p>	
<p>Nota: La descripción de estas irregularidades no faculta al calculista o diseñador a considerarlas como normales, por lo tanto la presencia de estas irregularidades requiere revisiones estructurales adicionales que garanticen el buen comportamiento local y global de la edificación.</p>	

Fuente: (NEC, 2014)

### **2.3.1.3 Inercia de las secciones agrietadas**

Para estructuras de hormigón armado y dentro del cálculo de la rigidez y derivas máximas, se debe afectar la inercia de los elementos estructurales:

- 0,5  $I_g$  para vigas (considerando la contribución de las losas, cuando fuera aplicable)
- 0,8  $I_g$  para columnas
- 0,6  $I_g$  para muros estructurales

### **2.3.1.4 Carga sísmica reactiva W**

Para el caso general será igual a la carga muerta total de la estructura.

### **2.3.1.5 Factor de reducción de resistencia sísmica R**

Permite la reducción de las fuerzas sísmicas de diseño en estructuras donde sus conexiones se diseñen para desarrollar un mecanismo de falla o rótula plástica y con adecuada ductilidad. Para edificaciones dúctiles, este factor depende del tipo de estructura, tipo de suelo, período de vibración y del factor de ductilidad, sobre resistencia, redundancia y amortiguamiento de una estructura en condiciones límite. (NEC, 2014)

El sistema que compone la estructura del hospital es de pórticos resistentes a momento, de hormigón armado con vigas descolgadas, cumpliendo con los requisitos para tomar un valor de R igual a 8.

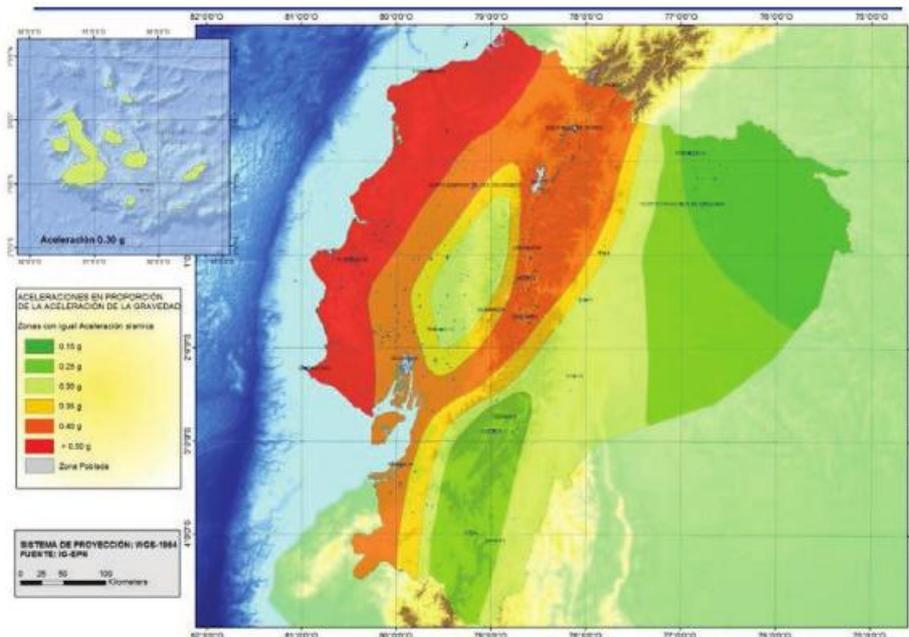
**Tabla 2-6:** Coeficiente R para sistemas estructurales dúctiles.

<b>Sistemas Estructurales Dúctiles</b>	<b>R</b>
<b>Sistemas Duales</b>	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas y con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras (sistemas duales).	8
Pórticos especiales sismo resistentes de acero laminado en caliente, sea con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas) o con muros estructurales de hormigón armado.	8
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras (excéntricas o concéntricas).	8
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas banda, con muros estructurales de hormigón armado o con diagonales rigidizadoras.	7
<b>Pórticos resistentes a momentos</b>	
Pórticos especiales sismo resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas.	8
Pórticos especiales sismo resistentes, de acero laminado en caliente o con elementos armados de placas.	8
Pórticos con columnas de hormigón armado y vigas de acero laminado en caliente.	8
<b>Otros sistemas estructurales para edificaciones</b>	
Sistemas de muros estructurales dúctiles de hormigón armado.	5
Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas banda.	5

Fuente: (NEC, 2014)

### 2.3.2 Espectro de diseño para la zona de localización del Hospital Básico Paute. Período de retorno de 475 años

El capítulo II referente a Peligro Sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2014, propone un método para determinar el espectro de diseño. Está en función del período de vibración y de acuerdo a la zona del país en donde se ubica la estructura. El mapa de zonificación sísmica del Ecuador considera un 10% de excedencia en 50 años, o un período de retorno de 475 años. Paute se encuentra en la zona sísmica II, de éste se determina el factor de zona Z, para el caso de Paute tendrá un valor de 0,25g.



**Figura 2-1:** Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño y valor del factor de zona Z.

Fuente: (NEC, 2014)

**Tabla 2-7:** Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: (NEC, 2014)

El tipo de perfil del suelo fue determinado en la primera etapa de este análisis estructural por el Ing. Josué Pesantez de acuerdo al estudio del suelo realizado. Se concluyó que el suelo en donde se asienta el hospital es de tipo D, según la clasificación de la normativa ecuatoriana.

**Tabla 2-8:** Clasificación de los perfiles del suelo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$

Fuente: (NEC, 2014)

A continuación se determinan los coeficientes del perfil del suelo, de acuerdo al tipo de perfil y al valor de Z correspondiente a Paute.

- Fa: 1,4
- Fd: 1,7
- Fs: 1,25

**Tabla 2-9:** Tipos de suelo y factores de sitio Fa.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección <a href="#">10.5.4</a>					

Fuente: (NEC, 2014)

**Tabla 2-10:** Tipos de suelo y factores de sitio Fd.

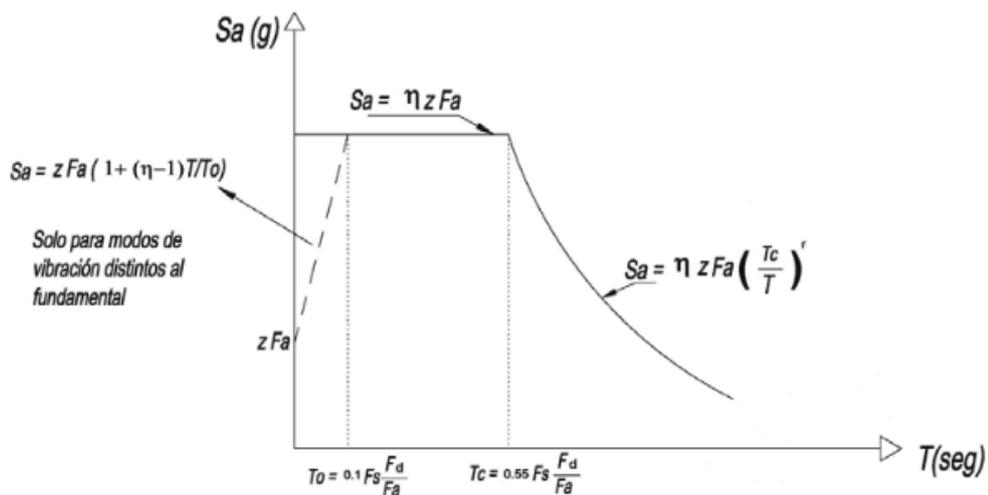
Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Fuente: (NEC, 2014)

**Tabla 2-11:** Tipos de suelo y factores del comportamiento inelástico del subsuelo  $F_s$ .

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Fuente: (NEC, 2014)



**Figura 2-2:** Espectro elástico horizontal de diseño de aceleraciones.

Fuente: (NEC, 2014)

Dónde:

$n$ : razón entre la aceleración espectral  $S_a$  ( $T=0,1$  s) y el PGA para el período de retorno seleccionado. Para las provincias de la sierra el valor asignado es de 2,48.

$F_a$ : coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para el diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

$F_d$ : coeficiente de amplificación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

$F_s$ : coeficiente de amplificación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

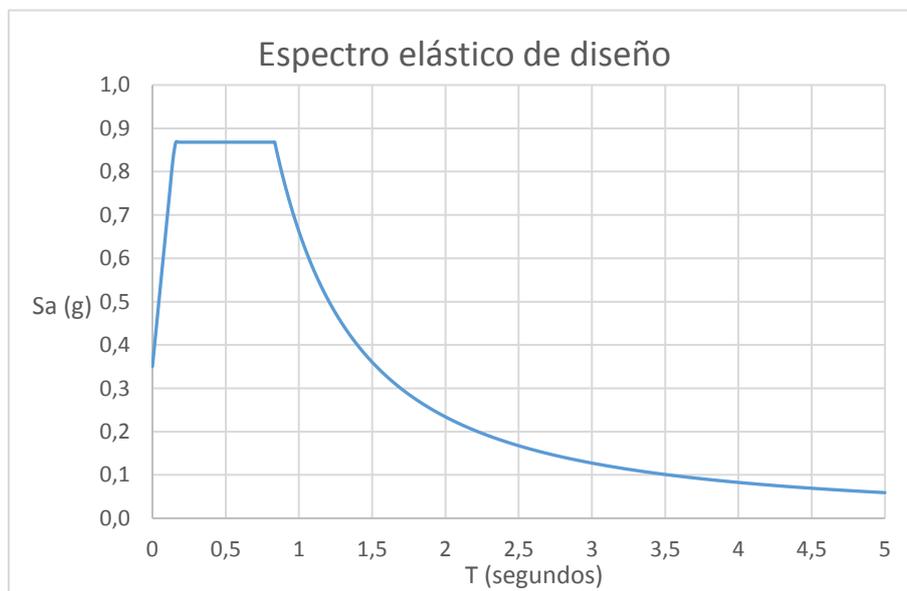
$S_a$ : espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad  $g$ ). Depende del período o modo de vibración de la estructura.

$T$ : período fundamental de vibración de la estructura.

$T_0$ : período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

$T_C$ : período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

$Z$ : aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño.



**Figura 2-3:** Espectro elástico horizontal de diseño de aceleraciones en zona de Paute ( $T = 475$  años).

### 2.3.3 Escalamiento de los sismos

El método utilizado en el ASCE 7-05 requiere de tres sismos con sus respectivos espectros y acelerogramas. Para encontrar los factores de escalamiento, se debe lograr que las aceleraciones espectrales de cada uno coincidan con las del espectro elástico horizontal de diseño en el período fundamental de la estructura.

Se utilizarán sismos registrados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Cada sismo está compuesto por tres componentes, de las cuales se utilizará una para el análisis.

#### 2.3.3.1 Sismo AOTA

Se utilizará para el análisis la componente AOTA-N

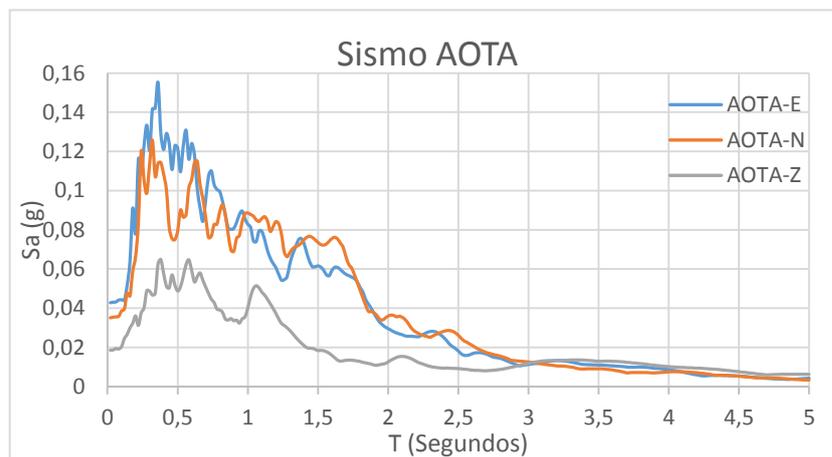


Figura 2-4: Espectro elástico horizontal de aceleraciones del sismo AOTA.

### 2.3.3.2 Sismo AMNT

Se utilizará para el análisis la componente AMNT-N

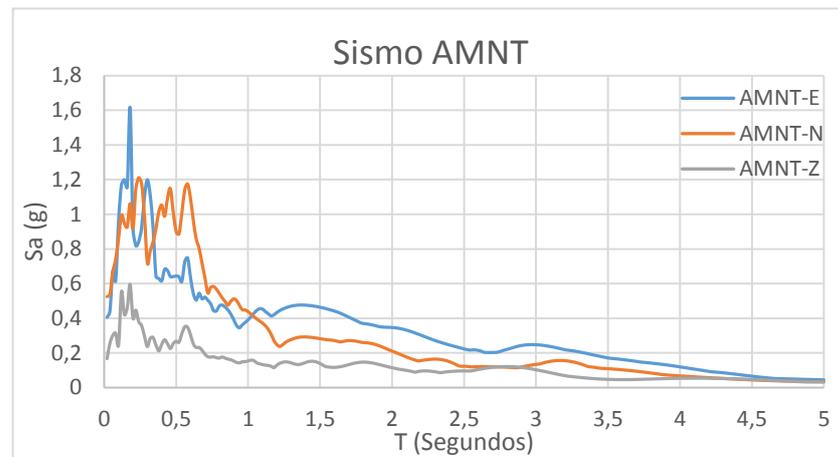


Figura 2-5: Espectro elástico horizontal de aceleraciones del sismo AMNT.

### 2.3.3.3 Sismo AES2

Se utilizará para el análisis la componente AES2-E

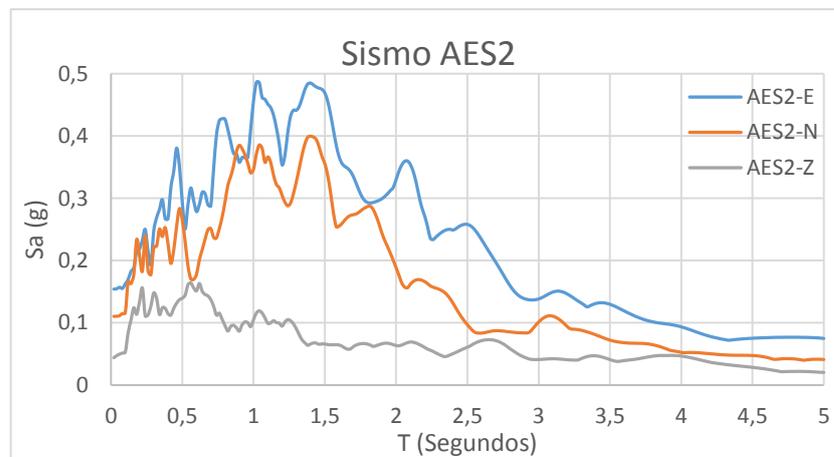


Figura 2-6: Espectro elástico horizontal de aceleraciones del sismo AES2.

### 2.3.3.4 Factores de escala. Eje aporticado No. 1

Se inicia encontrando la aceleración tanto del espectro horizontal de diseño, como para cada uno de los sismos (PGA), en el valor del período fundamental correspondiente al eje aporticado. El siguiente paso es encontrar la relación entre la aceleración del espectro horizontal de diseño para cada uno de los sismos (FPS). A continuación se

determina el máximo valor entre  $0,2T$  y  $1,5T$  y se halla el valor del factor SS de acuerdo con la expresión:

$$\text{Factor SS} = \frac{1}{1 - (\text{Máx. valor entre } 0,2T \text{ y } 1,5T)}$$

Finalmente, los factores de escala se encuentran multiplicando el factor SS por los valores de FPS y se repite este proceso para los ejes aporticados restantes.

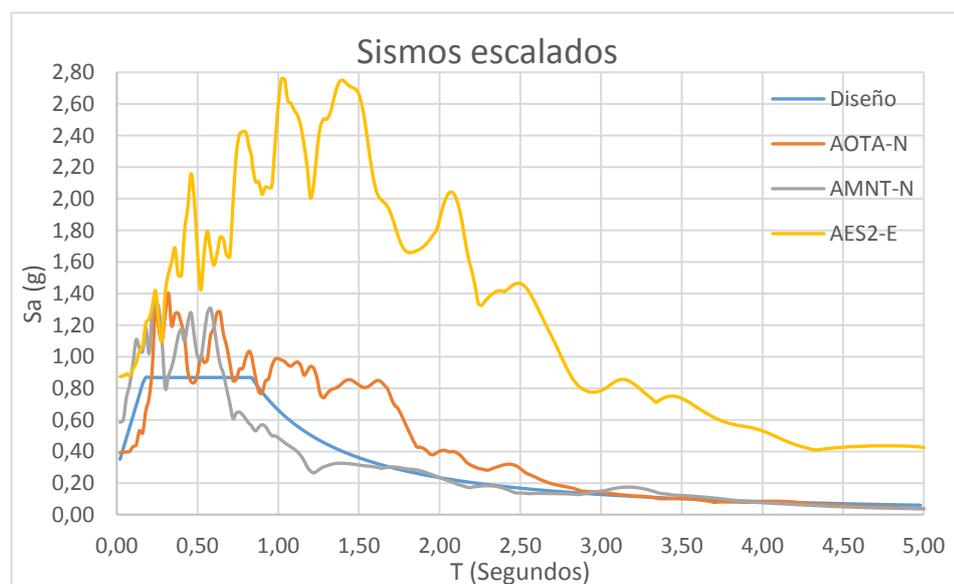
**Tabla 2-12:** Datos y factores de escala para eje aporticado No. 1.

T (s)	0,28
Sa de diseño (g)	0,8680
0,2T	0,056
1,5T	0,42
Máx. valor (0,2T – 1,5T)	0,334
Factor SS	1,502

PGA		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
0,0987	0,989	0,194

FPS		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
8,7943	0,8777	4,4742

Factores de Escala		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
13,207	1,318	6,719



**Figura 2-7:** Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 1.

### 2.3.3.5 Factores de escala. Eje aporticado No. 2

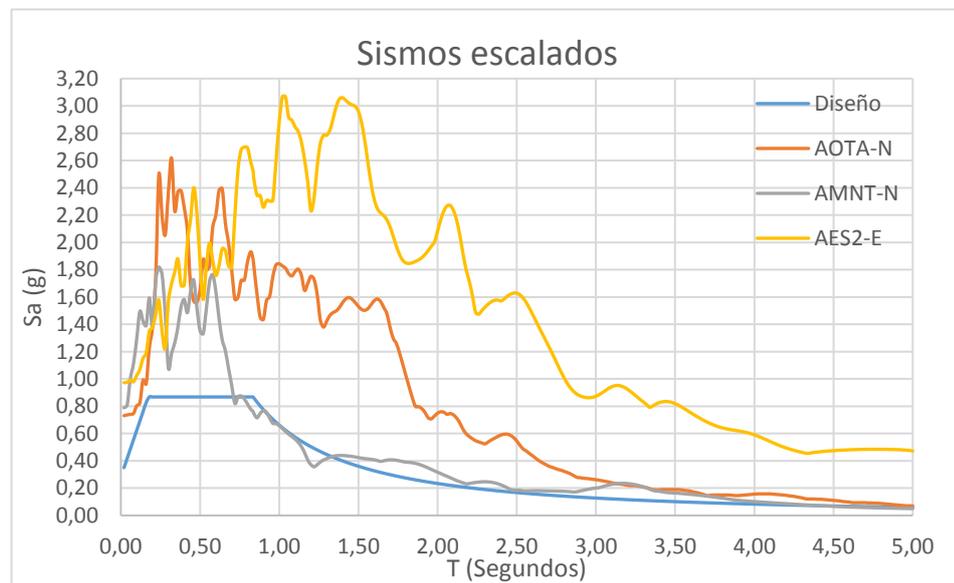
**Tabla 2-13:** Datos y factores de escala para eje aporticado No. 2.

T (s)	0,20
Sa de diseño (g)	0,8680
0,2T	0,04
1,5T	0,30
Máx. valor (0,2T – 1,5T)	0,369
Factor SS	1,587

PGA		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
0,0662	0,917	0,218

FPS		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
13,1118	0,9464	3,9762

Factores de Escala		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
20,810	1,502	6,311



**Figura 2-8:** Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 2.

### 2.3.3.6 Factores de escala. Eje aporticado No. 3

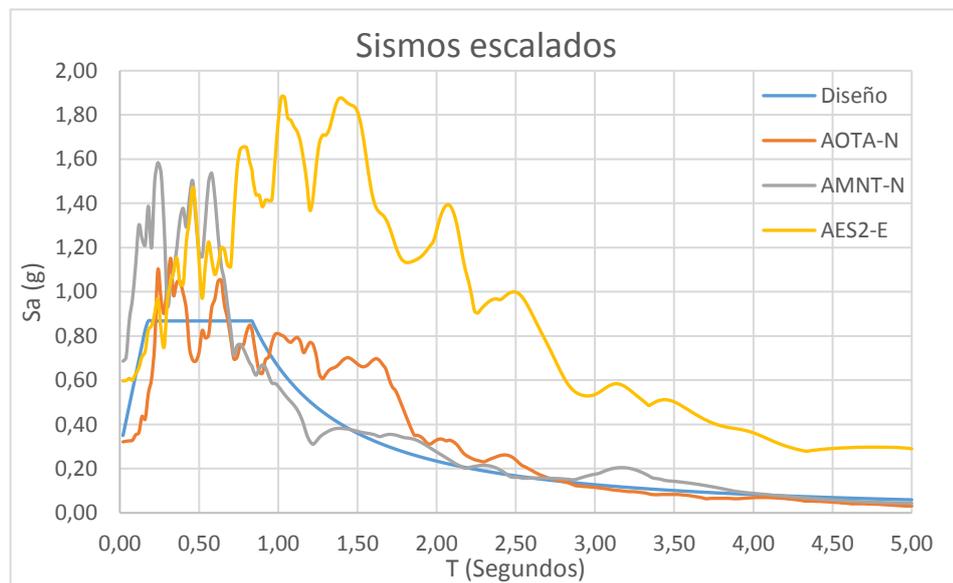
**Tabla 2-14:** Datos y factores de escala para eje aporticado No. 3.

T (s)	0,33
Sa de diseño (g)	0,8680
0,2T	0,066
1,5T	0,495
Máx. valor (0,2T – 1,5T)	0,353
Factor SS	1,546

PGA		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
0,1165	0,8156	0,2755

FPS		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
7,4506	1,0643	3,1506

Factores de Escala		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
11,516	1,645	4,870



**Figura 2-9:** Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 3.

### 2.3.4 Derivas máximas de piso

Los resultados de derivas máximas de piso deberán ser menores al 2% de la altura de entrepiso de los ejes aporticados, como lo indica la normativa.

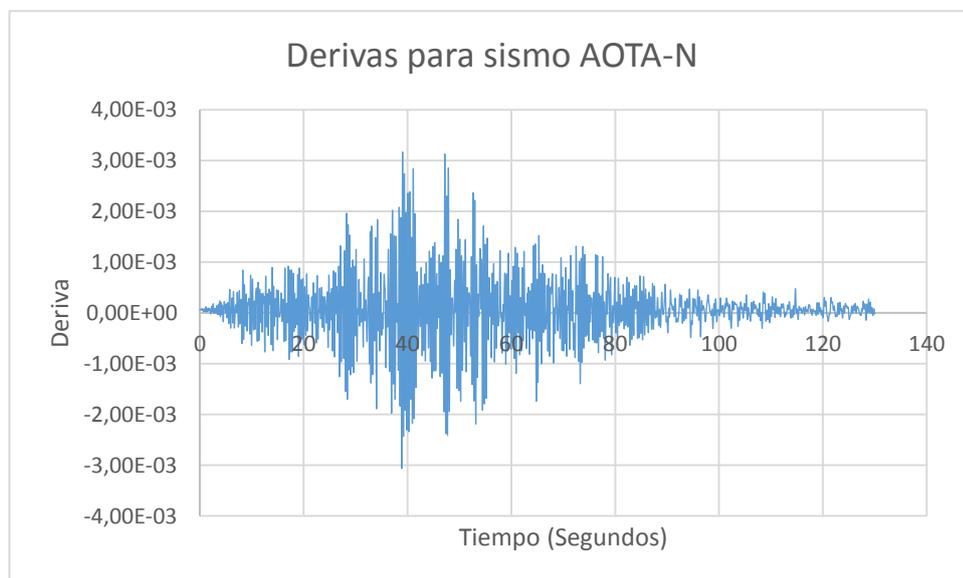
**Tabla 2-15:** Valores de  $\Delta_M$  máximos, expresados como fracción de la altura de entrepiso.

Estructuras de:	$\Delta_M$ máxima (sin unidad)
Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera	0.02
De mampostería	0.01

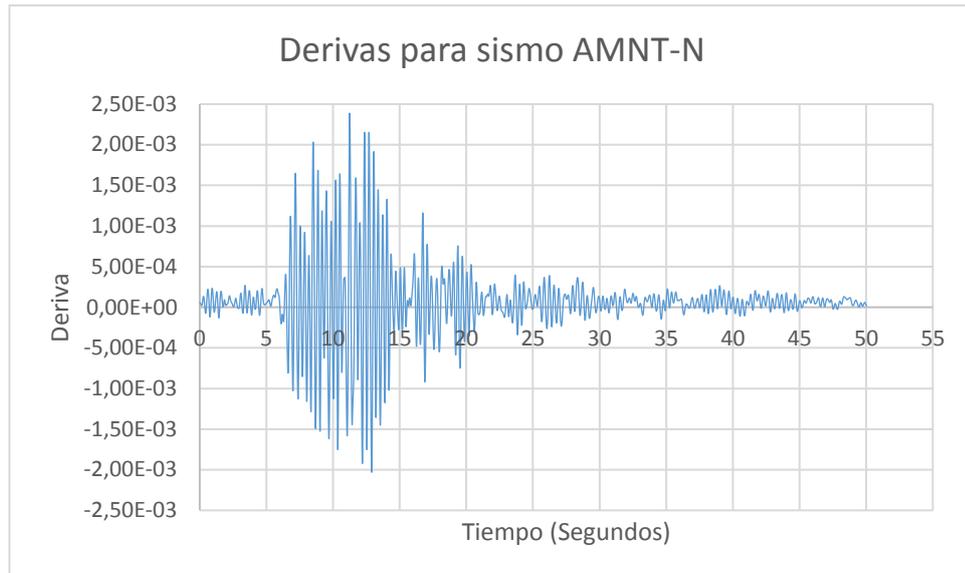
Fuente: (NEC, 2014)

#### 2.3.4.1 Derivas de piso. Eje aporticado No. 1.

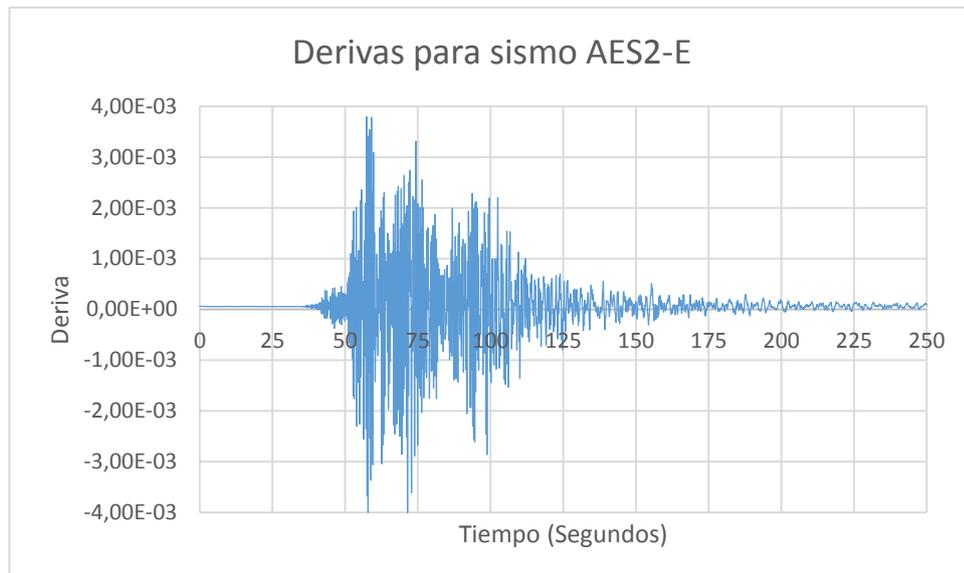
Usando el acelerograma de cada uno de los sismos y sus correspondientes factores de escala, se programó en OpenSees el control de deformaciones. A través del cálculo de las derivas y su posterior comprobación con los parámetros de la normativa se concluyó si los ejes aporticados cumplen o no luego de cada acción sísmica. Este proceso de repite para los ejes aporticados restantes.



**Figura 2-10:** Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AOTA-N.



**Figura 2-11:** Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AMNT-N.



**Figura 2-12:** Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AES2-E.

**Tabla 2-16:** Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 1.

Sismo	Deriva máxima elástica	Deriva máxima inelástica	Comprobación
AOTA-N	0,0032	1,90%	Cumple
AMNT-N	0,0024	1,43%	Cumple
AES2-E	0,0040	2,40%	No cumple

### 2.3.4.2 Derivas de piso. Eje aporticado No. 2.

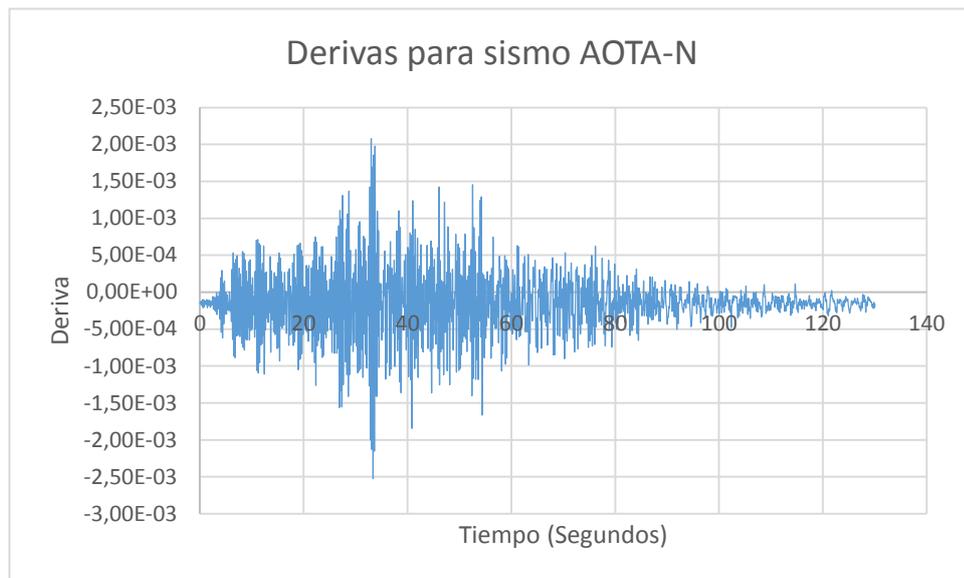


Figura 2-13: Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AOTA-N

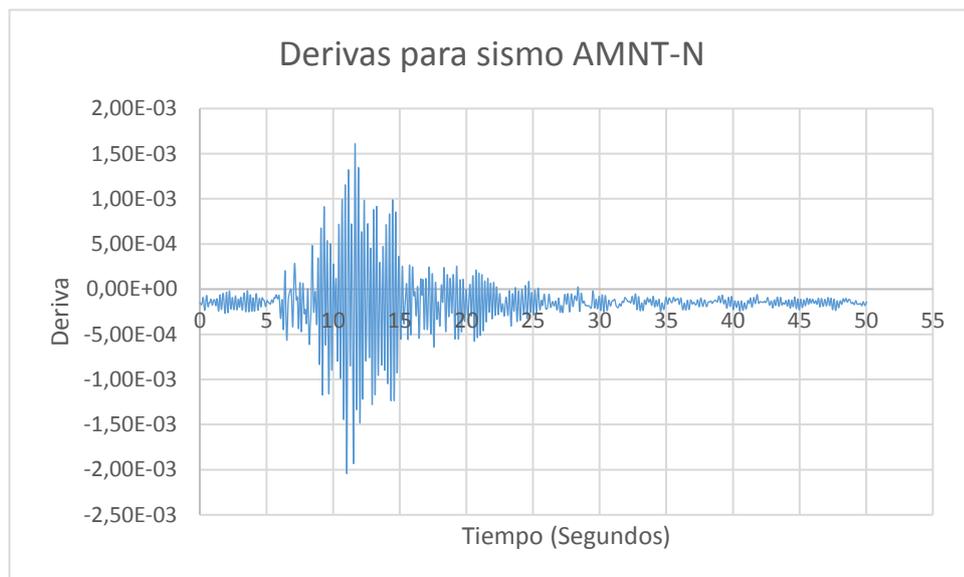
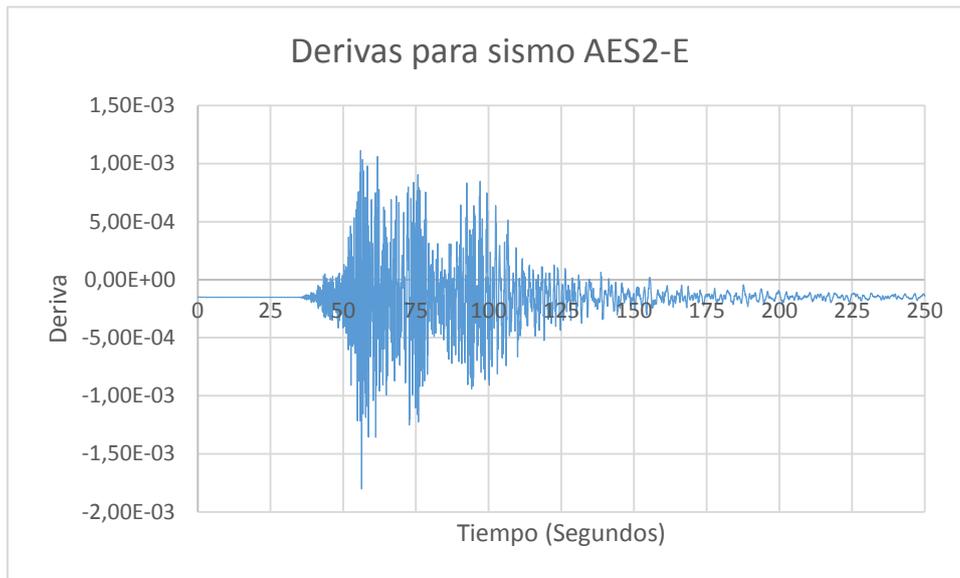


Figura 2-14: Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AMNT-N.

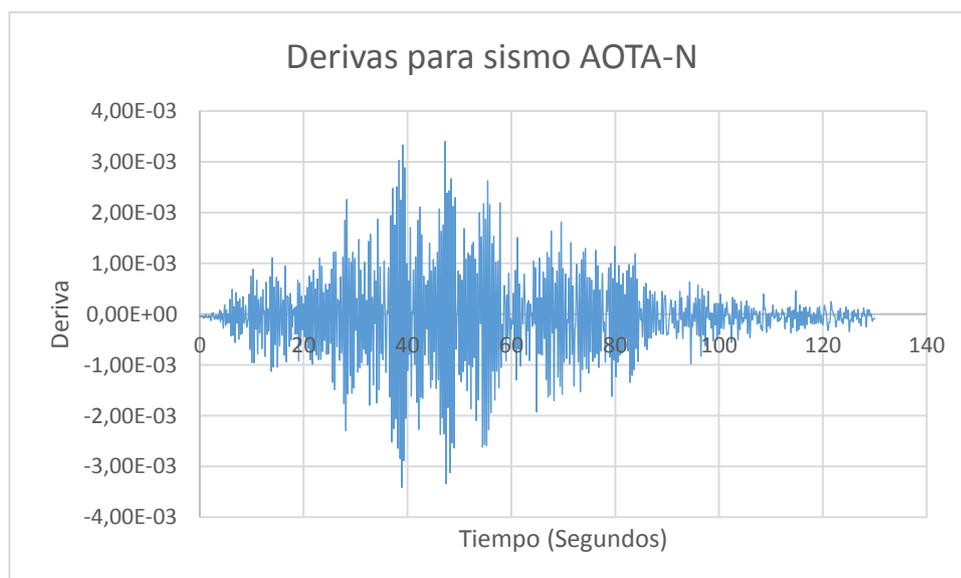


**Figura 2-15:** Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AES2-E.

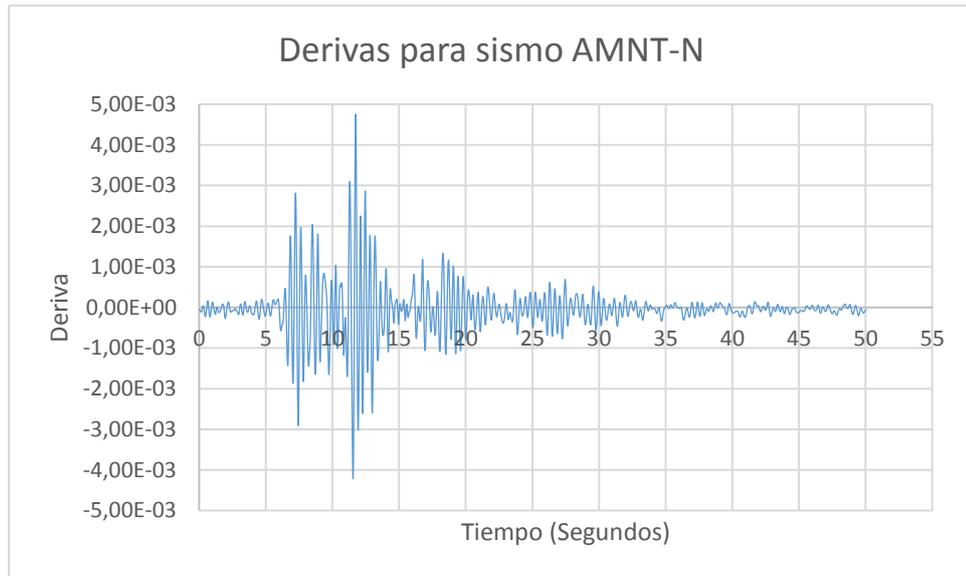
**Tabla 2-17:** Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 2.

Sismo	Deriva máxima elástica	Deriva máxima inelástica	Comprobación
AOTA-N	0,0025	1,51%	Cumple
AMNT-N	0,0020	1,23%	Cumple
AES2-E	0,0018	1,08%	Cumple

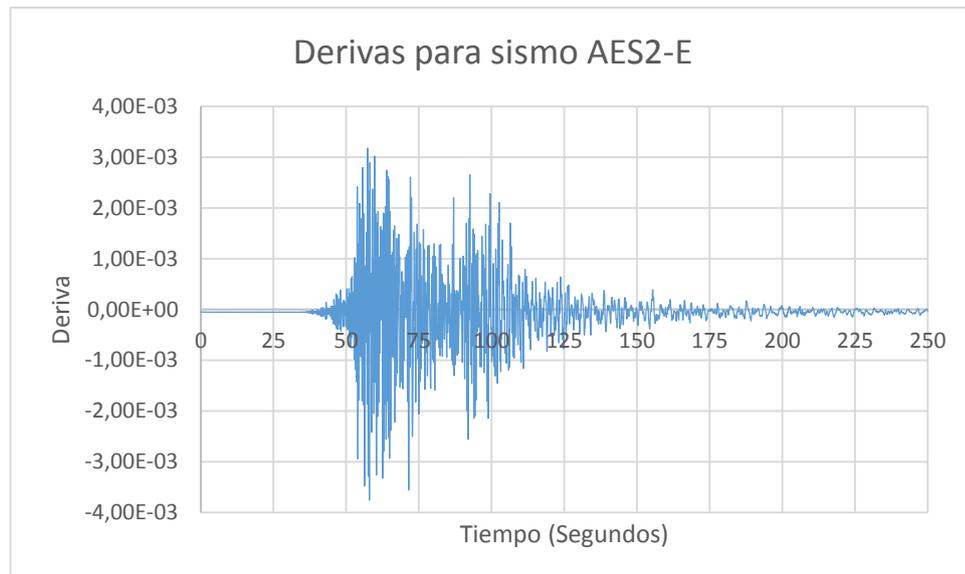
### 2.3.4.3 Derivas de piso. Eje aporticado No. 3.



**Figura 2-16:** Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AOTA-N.



**Figura 2-17:** Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AMNT-N.



**Figura 2-18:** Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AES2-E.

**Tabla 2-18:** Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 3.

Sismo	Deriva máxima elástica	Deriva máxima inelástica	Comprobación
AOTA-N	0,0034	2,05%	No cumple
AMNT-N	0,0048	2,85%	No cumple
AES2-E	0,0038	2,25%	No cumple

## 2.4 Análisis estático no-lineal (pushover)

El análisis pushover consiste en un empuje lateral incremental hasta llegar al colapso de la estructura. Está representada por la curva de capacidad que se define por la relación entre las fuerzas laterales producidas y los desplazamientos a lo largo de la altura del edificio. (Peralta, 2012)

### 2.4.1 Cortante basal de diseño V

“El cortante basal total de diseño **V**, a nivel de cargas últimas, aplicado a una estructura en una dirección especificada, se determinará mediante las expresiones:” (NEC, 2014)

$$V = \frac{I * Sa(Ta)}{R * \phi_P * \phi_E} * W$$

Dónde:

Sa(Ta): espectro de diseño en aceleración. Para la zona del Hospital Básico Paute tiene un valor de 0,868

$\phi_P$  y  $\phi_E$ : coeficientes de configuración en planta y elevación. Tomarán los valores de 0,9 y 1 respectivamente como se determinó en la sección 2.3.1.2

I: coeficiente de importancia. Para edificaciones esenciales tiene un valor de 1,5 como se indica en la sección 2.3.1.1

R: factor de reducción de resistencia sísmica. Se tomará un valor de 8 de acuerdo a la sección 2.3.1.5

V: cortante basal total de diseño.

W: carga sísmica reactiva. Se tomará el peso total de la estructura.

Ta: período de vibración. Cada eje de pórticos posee su período de vibración de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis modal.

Para estructuras irregulares la NEC-14 en su capítulo de Peligro Sísmico indica un ajuste a los resultados obtenidos del 85%, es decir, el valor del cortante basal obtenido en OpenSees deberá ser mayor al 85% del cortante basal **V**.

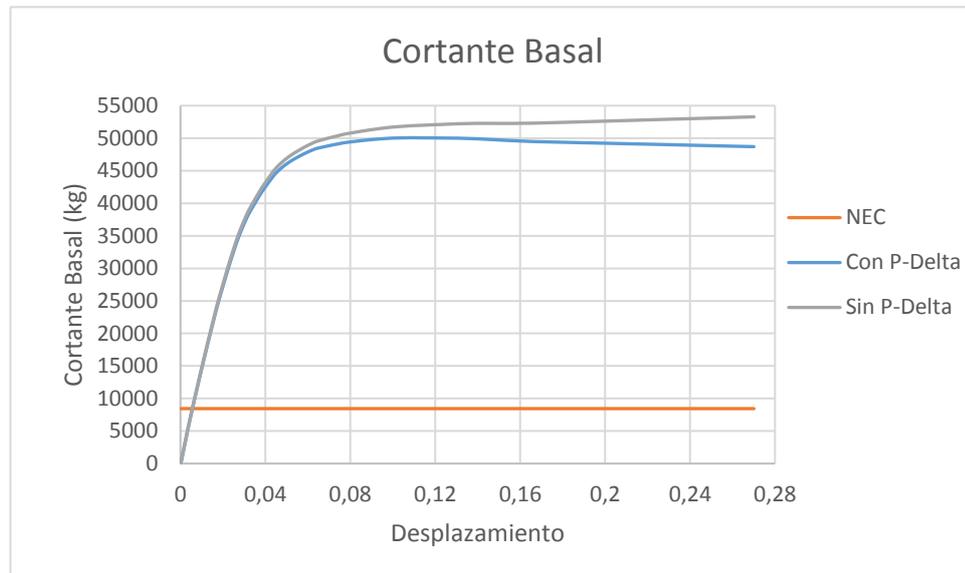
**Tabla 2-19:** Cortante basal calculado con la metodología de la NEC-14.

Cortante Basal (Ton)	
Eje aporticado No. 1	8,45
Eje aporticado No. 2	4,73
Eje aporticado No. 3	27,47

## 2.4.2 Cortante basal de la estructura para un período de 475 años

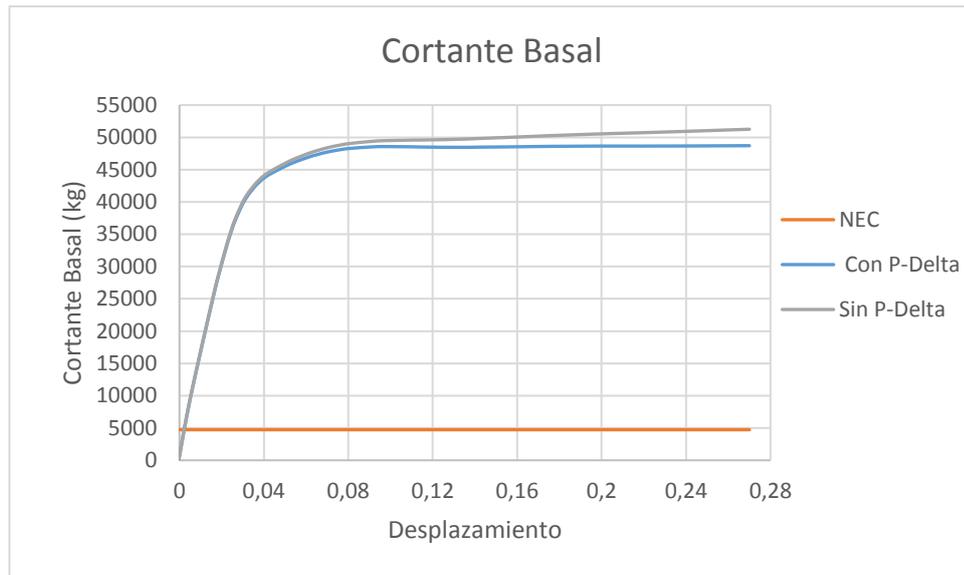
A continuación se compararán el cortante basal de diseño con los resultados obtenidos en OpenSees para cada eje de pórticos, que fueron analizados con y sin el efecto P-delta actuando en su estructura.

### 2.4.2.1 Cortante basal. Eje aporticado No. 1

**Figura 2-19:** Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 1.

El máximo valor del cortante basal es de 50,08 Ton, esto quiere decir que el eje aporticado No. 1 resistirá 83,13% más con respecto al cortante basal de diseño.

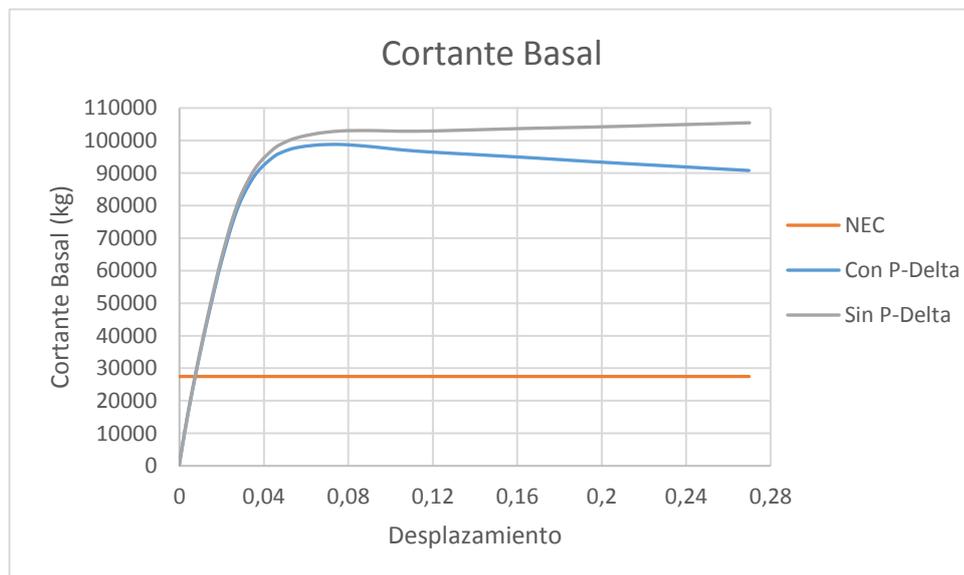
### 2.4.2.2 Cortante basal. Eje aporticado No. 2



**Figura 2-20:** Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 2.

Para el eje aporticado No. 2 el máximo valor del cortante basal es de 48,71 Ton. Comparando con el cortante basal de diseño comprobamos que la estructura resistirá 90,28% más de lo recomendado en la NEC-14.

### 2.4.2.3 Cortante basal. Eje aporticado No. 3



**Figura 2-21:** Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 3.

Comparando el máximo valor del cortante basal de la estructura de 98,82 Ton, con el valor de diseño concluimos que la resistencia del eje aporticado soporta 72,20% más de lo requerido por la normativa.

## 2.5 Análisis dinámico no-lineal (response-history)

Según la NEC-14 consiste en: “un análisis de la respuesta dinámica de la estructura en cada incremento de tiempo, cuando la base de la misma está sujeta a un acelerograma específico”. Además se deberá aplicar a estructuras con sistemas disipadores de energía.

### 2.5.1 Consideraciones previas al diseño

En este análisis se utilizará solamente el coeficiente de importancia de acuerdo a la ocupación de la estructura. Para el caso de hospitales el valor del coeficiente es de 1,5 como se estableció en la sección 2.3.1.1 del análisis dinámico lineal espectral. Esta condición se utiliza para determinar una respuesta más cercana a la real de la estructura frente a eventos sísmicos.

### 2.5.2 Espectro de diseño para la zona de localización del Hospital Básico

#### Paute. Período de retorno de 2500 años

Para estructuras esenciales o de ocupación especial, la NEC-14 indica que se debe determinar la aceleración mediante curvas definidas para los distintos modos de vibración y localización de la estructura. Al no existir una definida para el cantón Paute, se utilizará la correspondiente a Cuenca al ser la ciudad más cercana al hospital, que posee una curva de peligro sísmico. Para determinar la probabilidad anual de excedencia se utiliza el valor inverso al del período de retorno, en este caso esta probabilidad será de 0,0004. Con este dato se encontrará el valor de la aceleración en la curva de peligro sísmico.

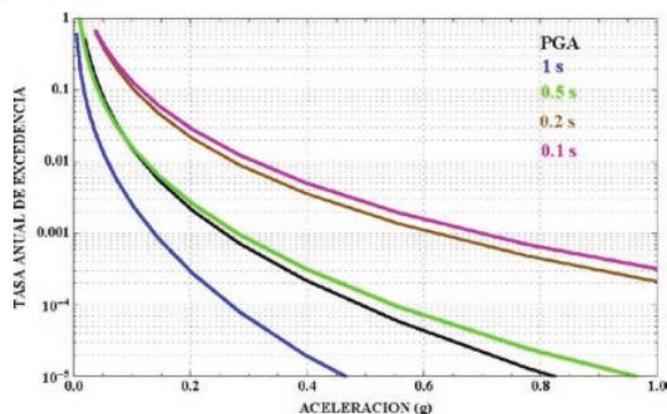


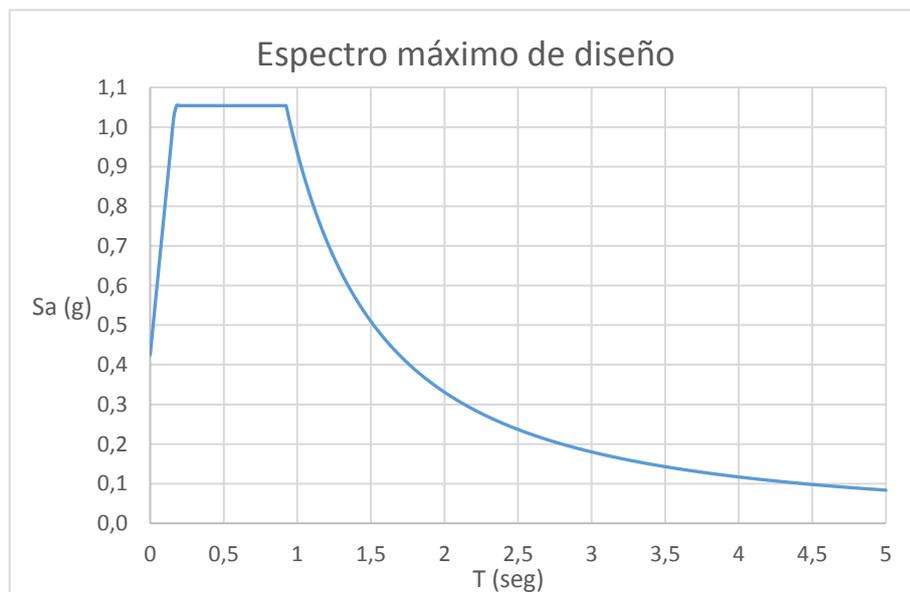
Figura 2-22: Curvas de peligro sísmico para Cuenca a diferentes períodos estructurales.

El valor de la aceleración encontrado es de 0,34 que sustituirá al de Z en el diseño del espectro para un período de retorno de 2500 años. Este valor corresponde a una zona sísmica 4 de alta amenaza.

A continuación se determinan nuevos coeficientes del perfil del suelo, de acuerdo al tipo de perfil y la aceleración de 0,34g correspondiente a Paute.

- Fa: 1,25
- Fd: 1,5
- Fs: 1,4

La razón entre la aceleración espectral  $S_a$  ( $T=0,1$  s) y el PGA para el período de retorno seleccionado seguirá siendo el correspondiente para las provincias de la sierra. El valor asignado es de 2,48.



**Figura 2-23:** Espectro máximo considerado de aceleraciones en zona de Paute ( $T = 2500$  años).

### 2.5.3 Escalamiento de los sismos

Para este proceso se utilizará la metodología del ASCE 7-05 para escalamiento de sismos y las mismas componentes de los sismos que se emplearon en la sección 2.3.3 del análisis dinámico lineal espectral.

### 2.5.3.1 Factores de escala. Eje aporticado No. 1

Tabla 2-20: Datos y factores de escala para eje aporticado No. 1.  $T = 2500$  años.

T (s)	0,28
Sa de diseño (g)	1,054
0,2T	0,056
1,5T	0,42
Máx. Valor (0,2T – 1,5T)	0,406
Factor SS	1,683

PGA		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
0,0987	0,989	0,194

FPS		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
10,6788	1,0657	5,4330

Factores de Escala		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
17,9682	1,7932	9,1416

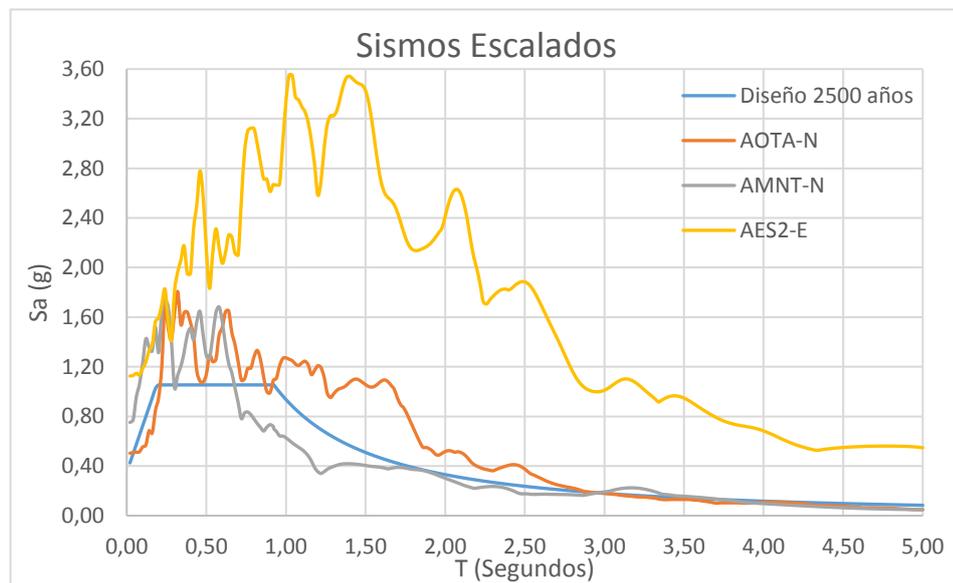


Figura 2-24: Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 1.  $T = 2500$  años.

### 2.5.3.2 Factores de escala. Eje aporticado No. 2

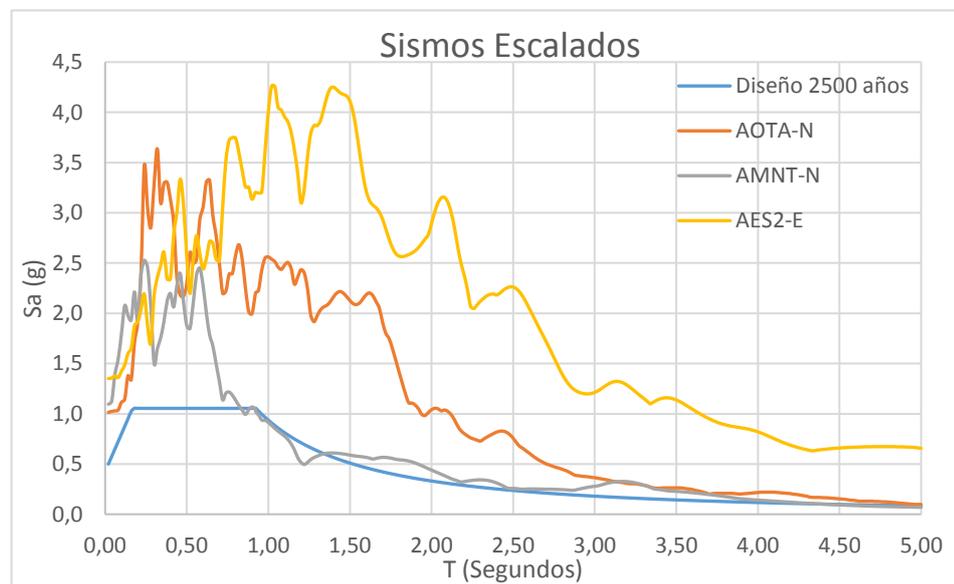
**Tabla 2-21:** Datos y factores de escala para eje aporticado No. 2.  $T = 2500$  años.

T (s)	0,20
Sa de diseño (g)	1,054
0,2T	0,04
1,5T	0,3
Máx. Valor (0,2T – 1,5T)	0,449
Factor SS	1,816

PGA		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
0,0662	0,9172	0,2183

FPS		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
15,9215	1,1491	4,8282

Factores de Escala		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
28,906	2,086	8,766



**Figura 2-25:** Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 2.  $T = 2500$  años.

### 2.5.3.3 Factores de escala. Eje aporticado No. 3

Tabla 2-22: Datos y factores de escala para eje aporticado No. 3. T = 2500 años.

T (s)	0,33
Sa de diseño (g)	1,054
0,2T	0,066
1,5T	0,495
Máx. Valor (0,2T – 1,5T)	0,429
Factor SS	1,75

PGA		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
0,1165	0,8156	0,2755

FPS		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
9,0472	1,2924	3,8258

Factores de Escala		
AOTA-N	AMNT-N	AES2-E
15,835	2,262	6,696

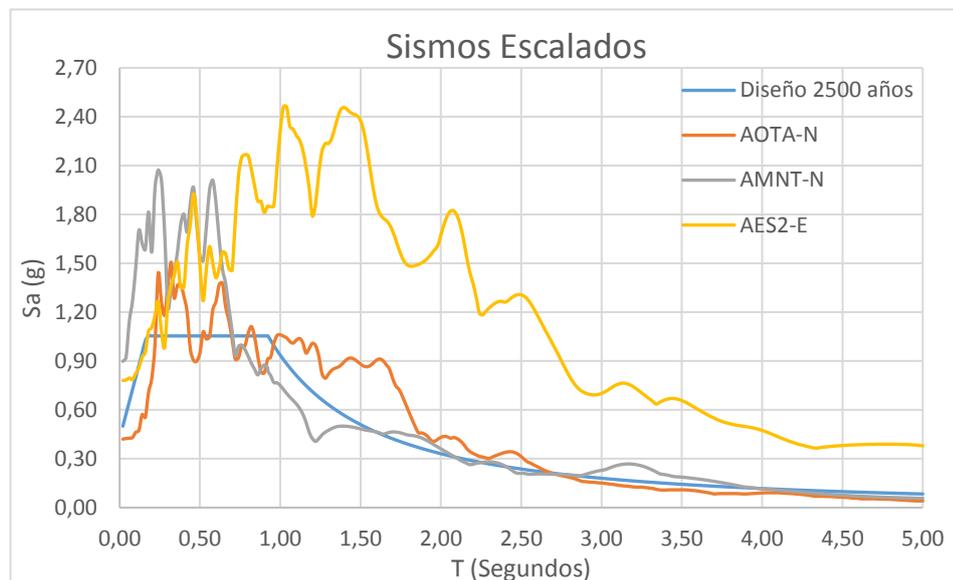


Figura 2-26: Sismos escalados al espectro de diseño para eje aporticado No. 3. T = 2500 años.

### 2.5.4 Derivas máximas inelástica de piso

Dentro del control de deformaciones establecido en el capítulo de Peligro Sísmico de la NEC-14 se requiere el cálculo de la deriva máxima inelástica utilizando el valor de

respuesta máxima inelástica en desplazamientos  $\Delta_M$  mediante la siguiente formulación:

$$\Delta_M = 0,75 * R * \Delta_E$$

Dónde:

$\Delta_M$ : deriva máxima inelástica

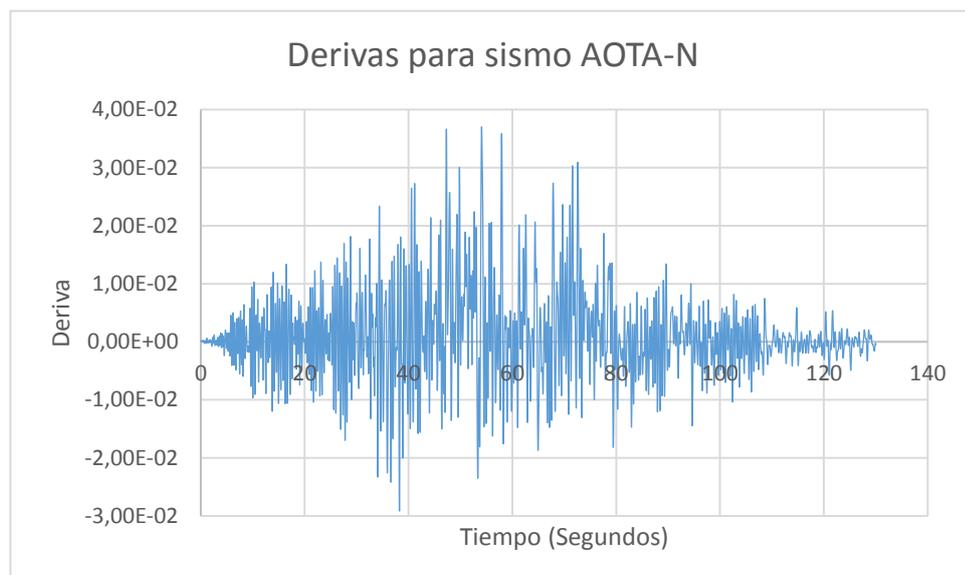
$\Delta_E$ : desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas

R: factor de reducción de resistencia. Para la estructura del “Hospital Básico Paute” toma el valor de 8 de acuerdo a lo determinado en la sección 2.3.1.5

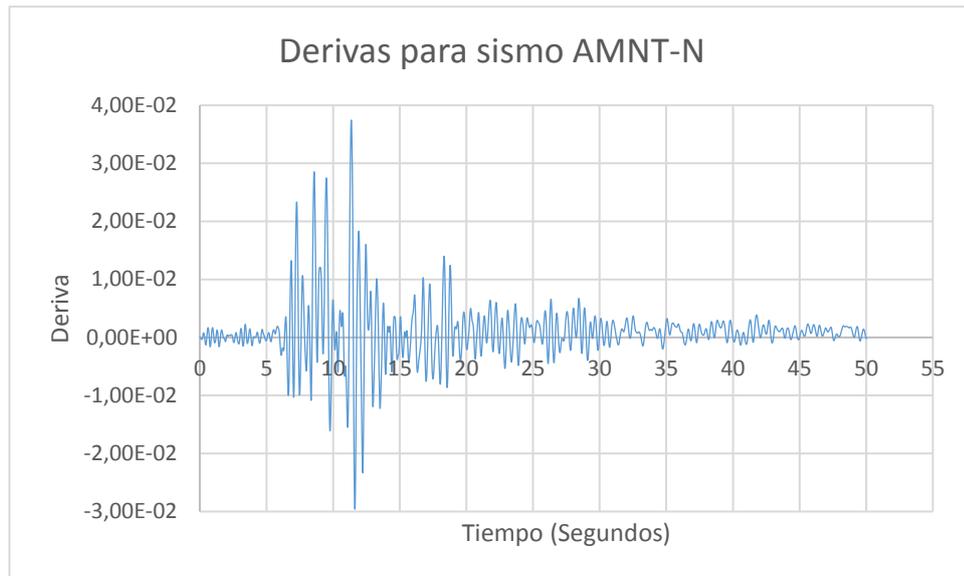
Al igual que en el análisis dinámico lineal espectral, el límite de las derivas inelásticas no deberá superar el 2% en relación con la altura de entrepiso de los ejes aporticados.

#### 2.5.4.1 Derivas de piso. Eje aporticado No. 1. Período de retorno de 2500 años

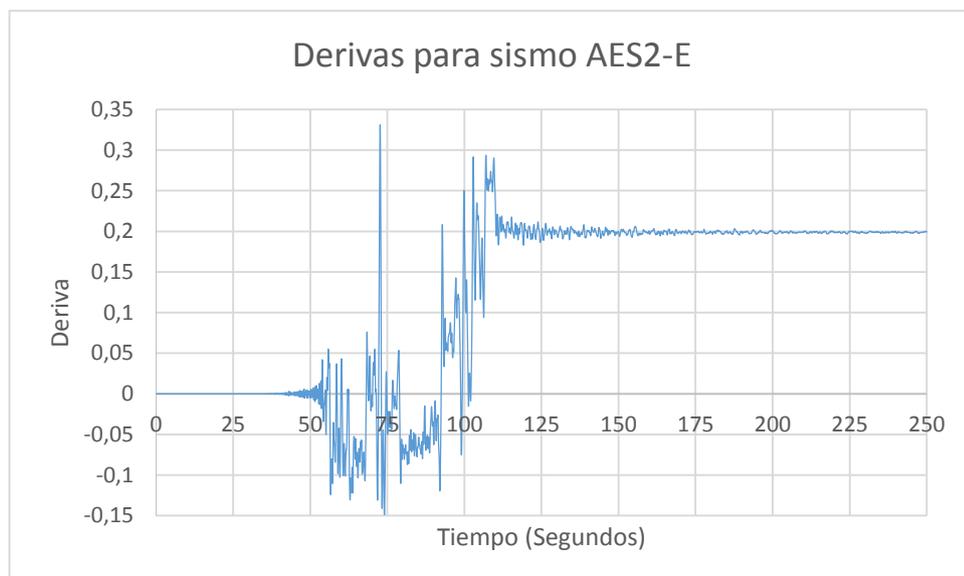
Para la programación en OpenSees se seguirá el mismo procedimiento para los tres ejes aporticados que se realizó dentro del análisis dinámico lineal espectral. En este caso se utilizarán los factores de escalamiento para un período de retorno de 2500 años determinados en la sección 2.5.3



**Figura 2-27:** Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AOTA-N.



**Figura 2-28:** Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AMNT-N.

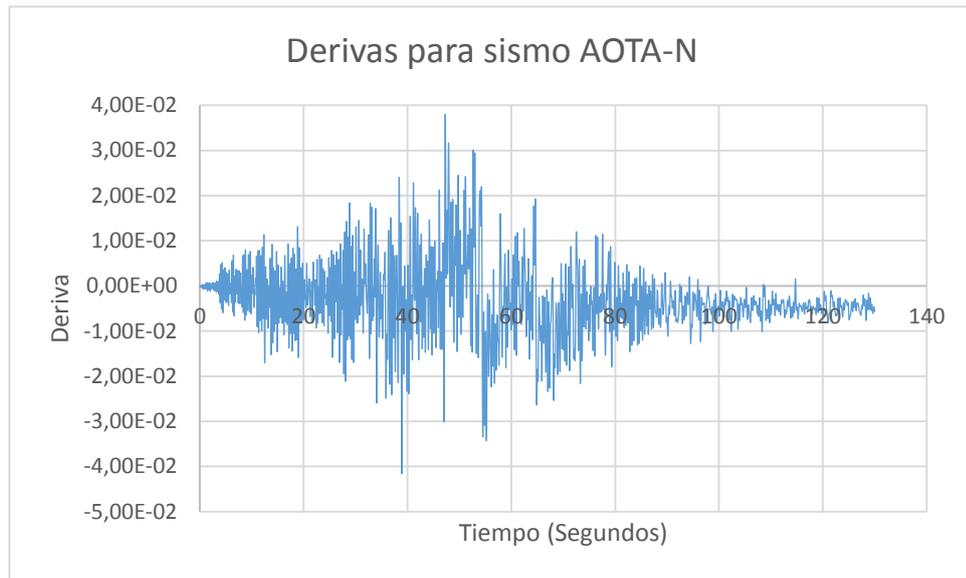


**Figura 2-29:** Derivas de piso de eje aporticado No. 1 para sismo AES2-E.

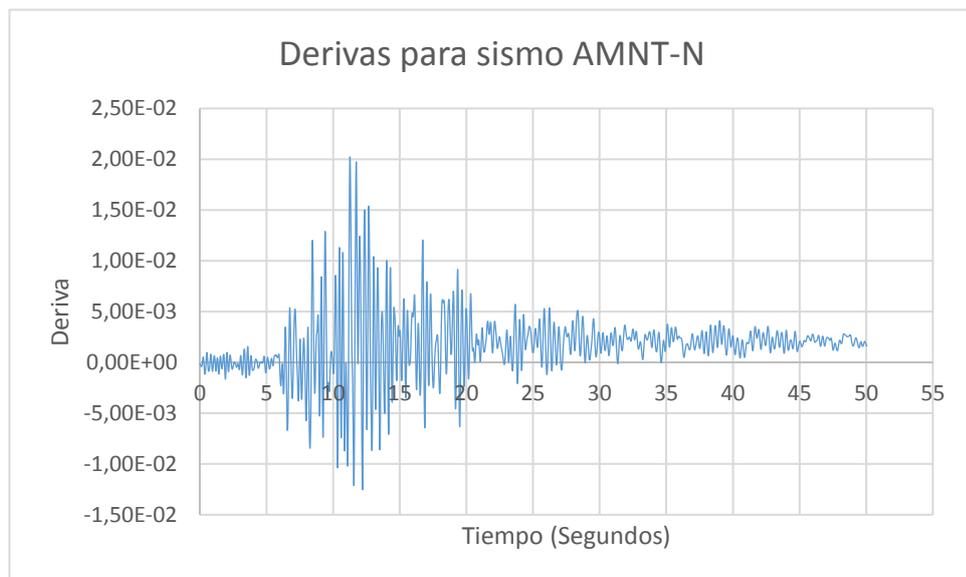
**Tabla 2-23:** Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 1.

Sismo	Deriva máxima inelástica		Comprobación	Observaciones
AOTA-N	0,0370	22,23%	No cumple	La cubierta tiene una deformación residual
AMNT-N	0,0374	22,46%	No cumple	La cubierta tiene una deformación residual
AES2-E	0,3312	198,74%	No cumple	Fracaso inminente de la estructura

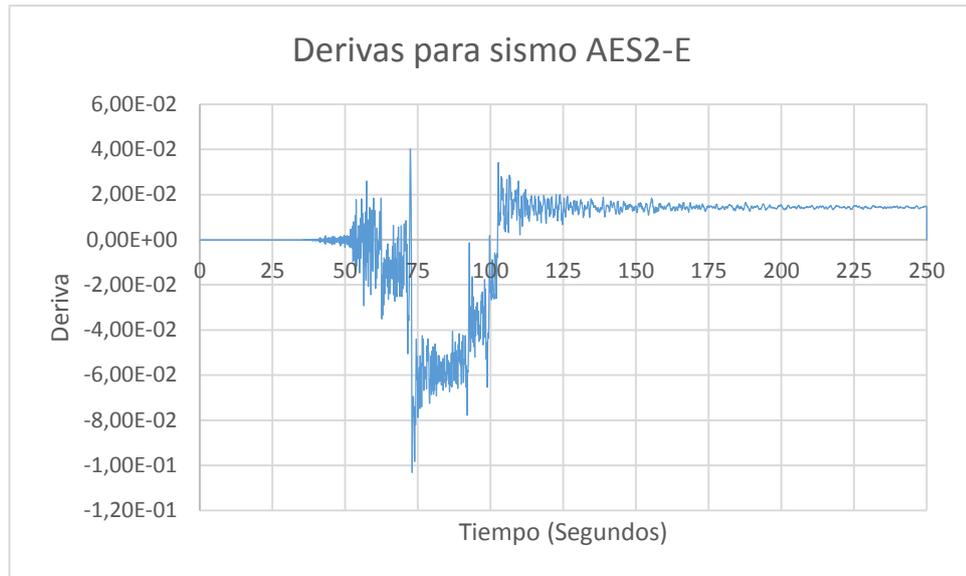
**2.5.4.2 Derivas de piso. Eje aporticado No. 2. Período de retorno de 2500 años**



**Figura 2-30:** Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AOTA-N.



**Figura 2-31:** Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AMNT-N.

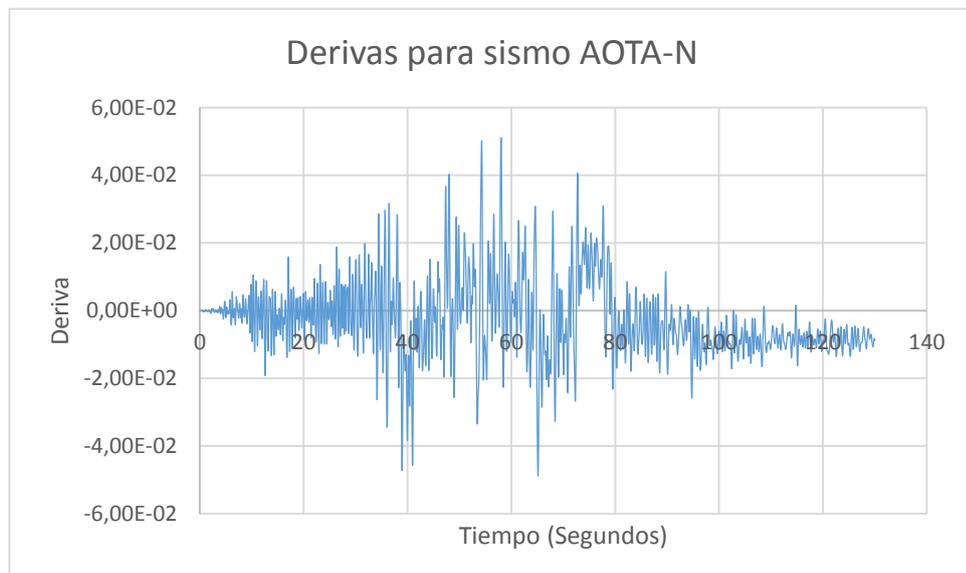


**Figura 2-32:** Derivas de piso de eje aporticado No. 2 para sismo AES2-E.

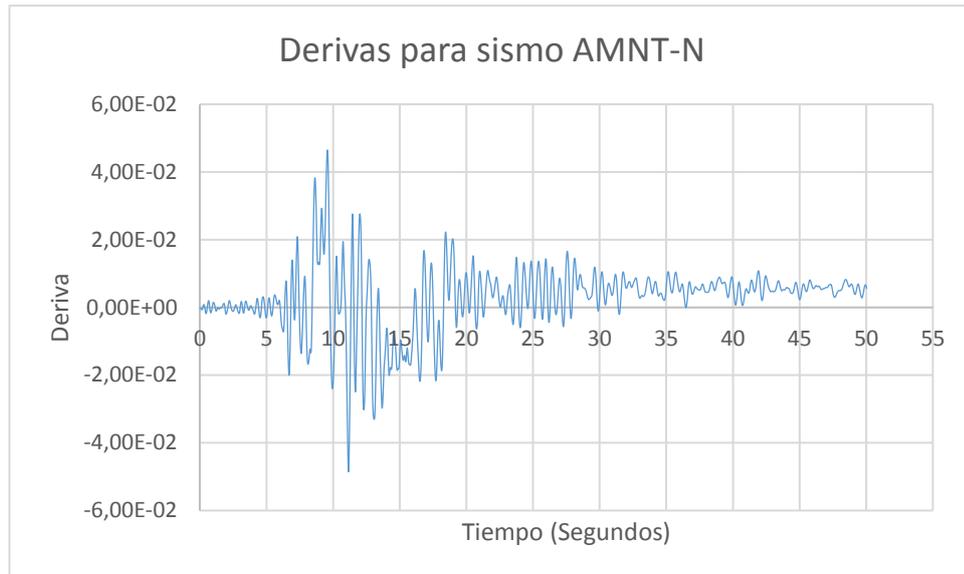
**Tabla 2-24:** Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 2.

Sismo	Deriva máxima inelástica		Comprobación	Observaciones
AOTA-N	0,0416	24,96%	No cumple	La cubierta tiene una deformación residual
AMNT-N	0,0202	12,14%	No cumple	La cubierta tiene una deformación residual
AES2-E	0,1032	61,91%	No cumple	Fracaso inminente de la estructura

**2.5.4.3 Deriva de piso. Eje aporticado No. 3. Período de retorno de 2500 años**



**Figura 2-33:** Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AOTA-N.



**Figura 2-34:** Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AMNT-N.



**Figura 2-35:** Derivas de piso de eje aporticado No. 3 para sismo AES2-E.

**Tabla 2-25:** Comprobación de derivas de piso para eje aporticado No. 3.

Sismo	Deriva máxima inelástica		Comprobación	Observaciones
AOTA-N	0,0511	30,66%	No cumple	La cubierta tiene una deformación residual
AMNT-N	0,0486	29,13%	No cumple	La cubierta tiene una deformación residual
AES2-E	7,4671	4480,28%	No cumple	Fracaso inminente de la estructura

### 2.5.5 Cortante basal de la estructura para un período de 2500 años

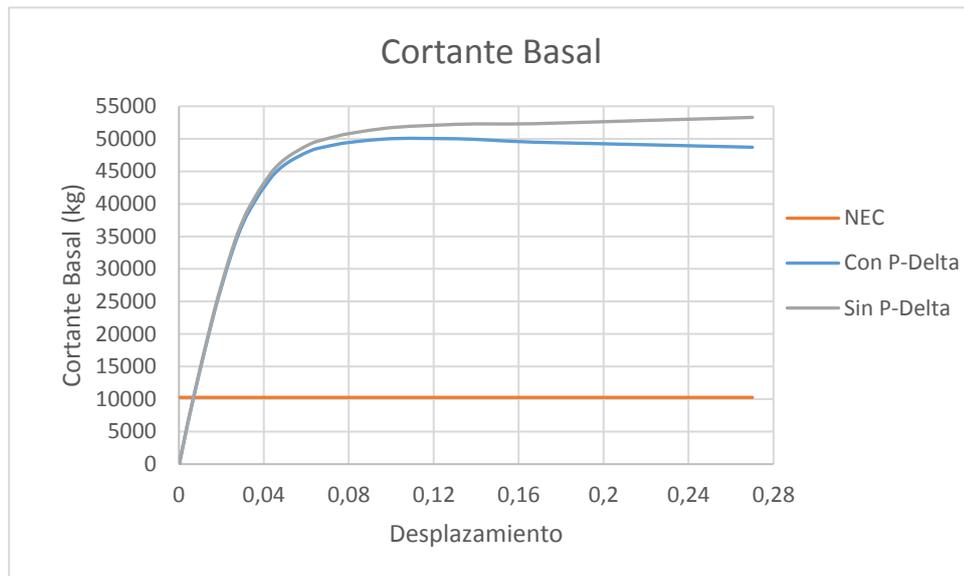
A continuación se compararán el cortante basal de diseño con los resultados obtenidos en OpenSees para cada eje de pórticos, que fueron analizados con y sin el efecto P-delta actuando en su estructura.

El valor de aceleración  $S_a(T_a)$  de 1,054 se obtiene del espectro de diseño para un período de retorno de 2500 años determinado en la sección 2.5.2

**Tabla 2-26:** Cortante basal calculado con la metodología de la NEC-14 para un período de retorno de 2500 años.

Cortante Basal según NEC-14 (Ton)	
Eje aporticado No. 1	10,26
Eje aporticado No. 2	5,75
Eje aporticado No. 3	33,36

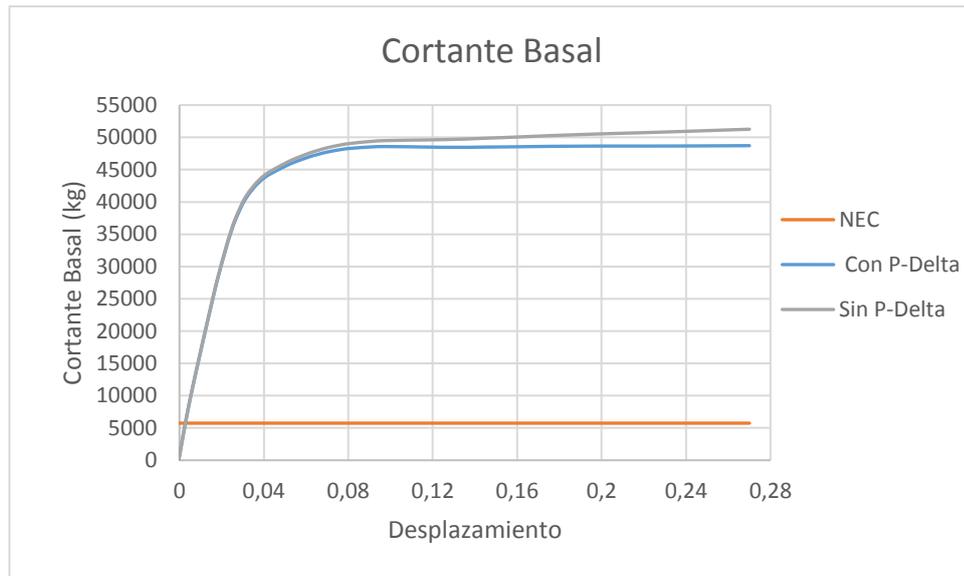
#### 2.5.5.1 Cortante basal. Eje aporticado No. 1. Período de retorno de 2500 años



**Figura 2-36:** Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 1.

El máximo valor del cortante basal es de 50,08 Ton, esto quiere decir que el eje aporticado No. 1 resistirá 79,52% más con respecto al cortante basal de diseño.

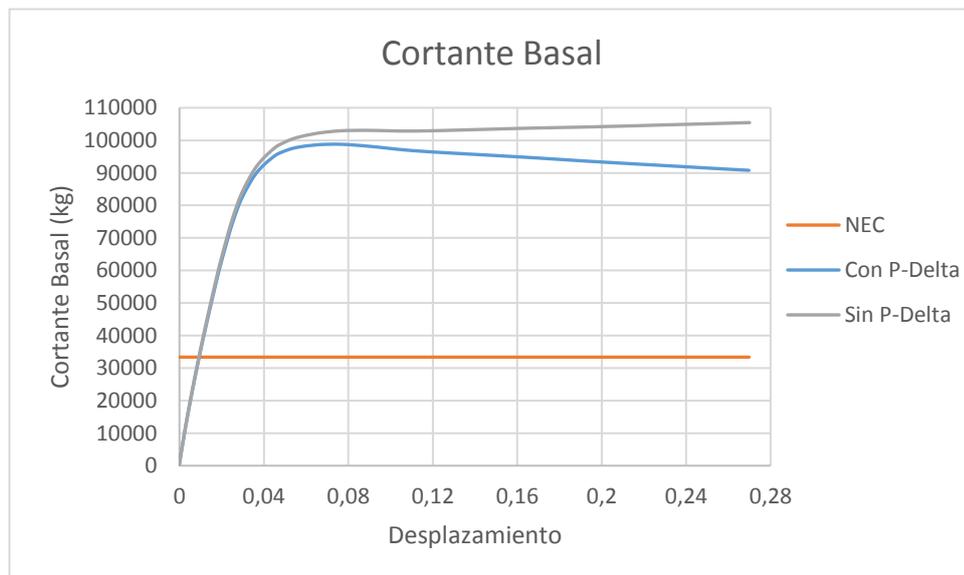
### 2.5.5.2 Cortante basal. Eje aporticado No. 2. Período de retorno de 2500 años



**Figura 2-37:** Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 2.

Para el eje aporticado No. 2 el máximo valor del cortante basal es de 48,71 Ton. Comparando con el cortante basal de diseño comprobamos que la estructura resistirá 88,20% más de lo recomendado en la NEC-14.

### 2.5.5.3 Cortante basal. Eje aporticado No. 3. Período de retorno de 2500 años



**Figura 2-38:** Comparación de cortante basal de eje aporticado No. 3.

Comparando el máximo valor del cortante basal de la estructura de 98,82 Ton, con el valor de diseño concluimos que la resistencia del eje aporticado soporta 66,24% más de lo requerido por la normativa.

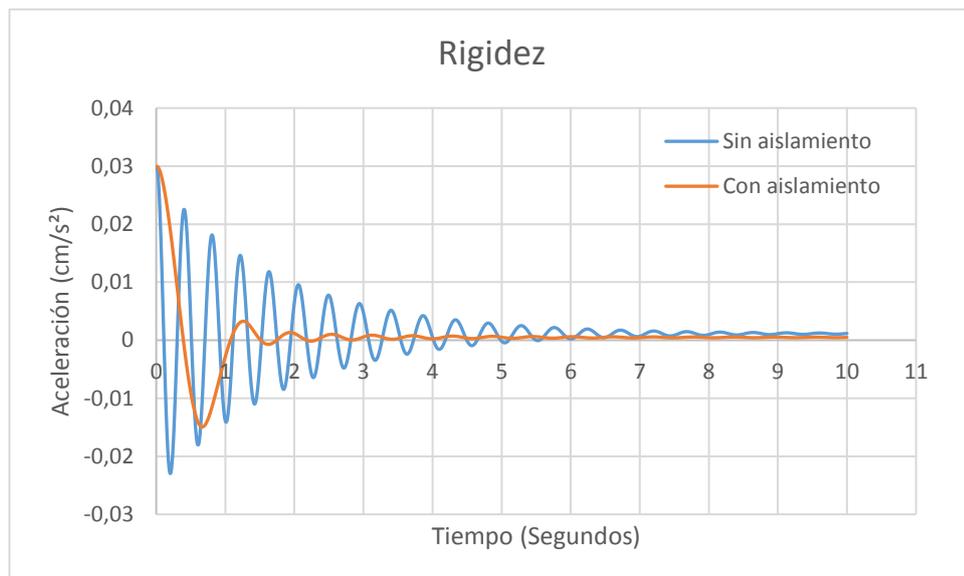
## 2.5.6 Vibración libre

“Una estructura experimenta vibración libre cuando es perturbada de su posición de equilibrio estático y después se deja vibrar sin ninguna excitación dinámica externa.”

El principal objetivo de la aplicación de sistemas de amortiguamiento o sistemas de disipación de energía buscan reducir las vibraciones durante sismos, es decir alargar el período fundamental de la estructura. (Chopra, 2014)

### 2.5.6.1 Vibración libre. Eje aporticado No. 1

En la programación de OpenSees se introdujo el modelo estructural con y sin amortiguamiento para realizar una comparación de la efectividad que tuvo esta medida de mitigación en la estructura. Este proceso se realizó para los tres ejes aporticados.



**Figura 2-39:** Comparación de rigidez inicial. Eje aporticado No. 1.

### 2.5.6.2 Vibración libre. Eje aporticado No. 2



Figura 2-40: Comparación de rigidez inicial. Eje aporticado No. 2.

### 2.5.6.3 Vibración libre. Eje aporticado No. 3

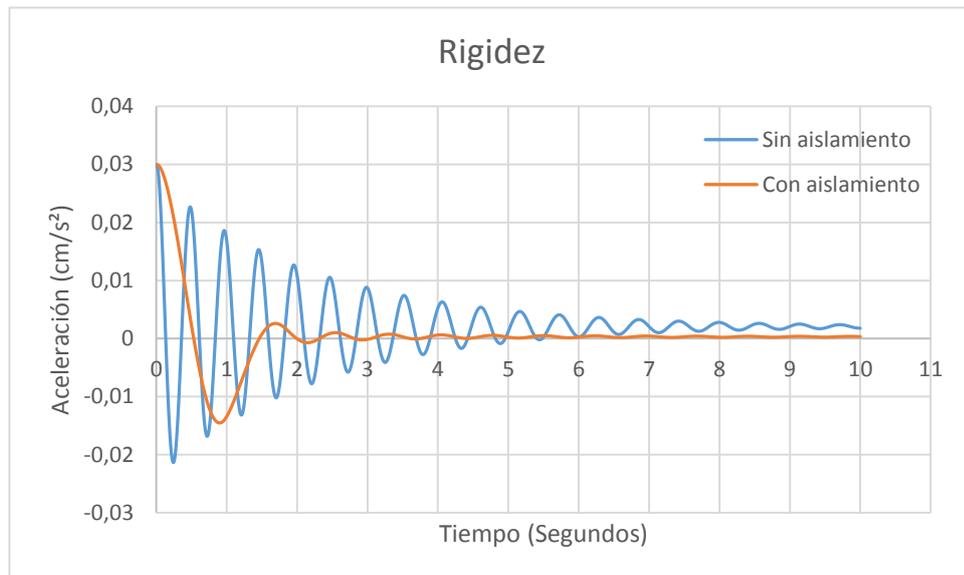


Figura 2-41: Comparación de rigidez inicial. Eje aporticado No. 3.

## CAPÍTULO III

### MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA LOS PÓRTICOS REPRESENTATIVOS DE LA EDIFICACIÓN HOSPITALARIA

#### 3.1 Generalidades

El principal objetivo de las medidas de mitigación es lograr que la estructura se comporte bajo el criterio de funcionalidad continua luego de desastres, para lograrlo se debe disminuir la vulnerabilidad estructural del Hospital Básico Paute. Existen varias medidas de mitigación que pueden ser implementadas, pero solamente un análisis dinámico no lineal nos permite identificar las deficiencias estructurales para decidir cuál medida será la más efectiva.

Para el caso de pórticos resistentes a momentos de hormigón armado encontrados en el Hospital Básico Paute, la Federal Emergency Management Agency (FEMA 356, 2000) recomienda la adición de elementos rigidizadores como muros de corte, que complementen un sistema de resistencia de fuerzas laterales. Además el revestimiento de columnas y vigas que presenten fallas a cortante para disminuir los desplazamientos a niveles aceptados por la normativa.

Mientras que el uso de dispositivos de aislamiento cuyas propiedades, características mecánicas adecuadas y una gran capacidad de disipación de energía, son claves para el diseño de una estructura que cumpla con el criterio de funcionalidad continua. Se busca el desempeño de la estructura en el rango elástico y garantizar el control de daños tanto de elementos estructurales como de elementos no estructurales. (Zayas & Nahin, 2010)

Conforme a los resultados encontrados en el Capítulo II que nos muestran valores de derivas de piso y cortante basal muy por encima de lo permitido, se ha determinado el uso de aisladores sísmicos en la base como medida de mitigación. En los tres ejes aporticados se implementarán aisladores sísmicos con núcleo de plomo para controlar los desplazamientos y esfuerzos que sufre la estructura durante un sismo. Debido a que los elementos estructurales cumplen con los criterios de armado y dimensionamiento, no se tomará en cuenta la rigidización de la edificación como una opción factible.

### 3.2 Pre diseño de aisladores sísmicos

Para la programación de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en OpenSees, se utilizará la siguiente tabla cuyas propiedades mecánicas y geométricas están reguladas por los fabricantes. Se obtendrán las dimensiones de los aisladores una vez que el período de vibración fundamental aumente significativamente a un valor que permita a la estructura responder en el rango elástico ante eventos sísmicos.

**Tabla 3-1:** Dimensiones del dispositivo.

Dimensiones del dispositivo				Dimensiones de la placa de anclaje					
Do	H	# capas de goma	Di	L	t	# de orificios	φ orificio	A	B
mm	mm		mm	mm	mm		mm	mm	mm
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75

Fuente: (Aguiar, Vergara, Guaygua, & Monge, 2014)

- Diámetro elastomérico (Do): 30,5 cm
- Diámetro de plomo (Di): 1,5 cm
- Altura del aislador (H): 28 cm

### 3.3 Análisis modal con aisladores sísmicos

Mediante el análisis modal de los ejes aporricados se busca comprobar que el período de vibración estructural aumente a un valor en donde la estructura se desempeñe dentro del rango elástico, gracias a la implementación de aisladores sísmicos con núcleo de plomo.

Cada valor del período de vibración estructural corresponde a la iteración realizada para las dimensiones de los aisladores encontradas en el pre diseño de los mismos.

**Tabla 3-2:** Resultados del análisis modal elástico con aisladores sísmicos.

	Modos de vibración	Frecuencias naturales (rad/s)	Período de vibración estructural (s)
Eje aporticado 1	1	5,6171	<b>1,1185</b>
	2	104,1833	0,0603
	3	109,4551	0,0574
	4	112,1296	0,0560
Eje aporticado 2	1	6,3440	<b>0,9904</b>
	2	118,9314	0,0528
	3	125,6325	0,0500
	4	140,1476	0,0448
Eje aporticado 3	1	4,2967	<b>1,4623</b>
	2	105,5669	0,0595
	3	111,3708	0,0564
	4	113,0695	0,0556

**Tabla 3-3:** Resultados del análisis modal inelástico con aisladores sísmicos.

	Modos de vibración	Frecuencias naturales (rad/s)	Período de vibración estructural (s)
Eje aporticado 1	1	5,8256	<b>1,0785</b>
	2	119,2701	0,0527
	3	125,1004	0,0502
	4	127,9796	0,0491
Eje aporticado 2	1	6,3827	<b>0,9844</b>
	2	135,4360	0,0464
	3	142,5378	0,0441
	4	157,4120	0,0399
Eje aporticado 3	1	4,3481	<b>1,4450</b>
	2	120,7349	0,0520
	3	127,1501	0,0494
	4	128,9091	0,0487

Comparando los máximos períodos de vibración con y sin aislamiento: para el eje aporticado No. 1 el período aumentó en un 74,25%; para el eje aporticado No. 2 aumentó en un 79,81% y para el eje aporticado No. 3 aumentó en un 77,09%.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS PRESUPUESTARIO DE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN

“La mitigación no tiene costo ya que, a largo plazo, se paga en dinero real y en vidas salvadas” (Organización Panamericana de la Salud, 2000)

Debido a la antigüedad del “Hospital Básico Paute” es necesario realizar el análisis comparativo con un hospital nuevo de similares características, prestaciones de servicios, equipamiento y área de construcción. Se tomó como referencia la construcción del nuevo hospital básico de Yantzaza en la provincia de Zamora Chinchipe que, de acuerdo al Ministerio de Salud Pública consta con 70 camas para beneficiar a 22800 habitantes. La inversión de esta obra es de \$36 millones de dólares y su área de construcción de 11006,61 m<sup>2</sup> concluyendo que el costo por m<sup>2</sup> es de \$3270,76.

El área de construcción del “Hospital Básico Paute” es de 1417,38 m<sup>2</sup> lo que representa un costo referencial aproximado de \$4'635.909,81.

Según Anrango el costo promedio de un aislador sísmico es de \$2500 al cual se le debe añadir un 50% de costos por la instalación en la estructura del hospital. Los aisladores serán colocados en cada columna de los tres ejes aporricados estudiados en esta investigación, que en total son 20, lo que daría un costo aproximado para el aislamiento de la edificación de \$75000.

La factibilidad de la implementación de esta medida de mitigación es muy alta, debido a que el costo del aislamiento representa el 1,62% del costo referencial del “Hospital Básico Paute”.

## CONCLUSIONES

- El “Hospital Básico Paute” fue analizado en una primera etapa por el Ing. Josué Pesantez, realizando el levantamiento de información estructural, arquitectónica y además un análisis en el rango lineal de la estructura para comprobar su diseño.
- La conformación de la estructura se dio en tres etapas, inicialmente siendo un centro de salud hasta convertirse en hospital catalogado como “básico” por el Ministerio de Salud. Por esta razón se encontraron diferentes secciones de columnas y vigas en zonas estratégicas y vulnerables.
- Al realizar el análisis dinámico lineal se comprobó que las derivas de piso, para el caso del espectro de diseño, cumplen en su mayoría con lo establecido con la normativa ecuatoriana. Pero siendo esta una estructura contemplada como “esencial” se deberán controlar las derivas de piso tomando como referencia el espectro máximo para la zona de Paute para un período de retorno de 2500 años.
- En el caso del cortante basal, la estructura aparenta resistir un valor muy por encima de lo estipulado por la normativa. Ante un evento sísmico, la estructura de cubierta será la primera en colapsar, dejando fuera de servicio al hospital y fallando en el cumplimiento del criterio de funcionalidad continua.
- Dentro del análisis dinámico no lineal se determinó que el principal problema es la rigidez excesiva de sus elementos estructurales. Las secciones de 30 cm en columnas cuadradas y 40 cm x 30 cm en vigas descolgadas producen que la edificación colapse a medida que la aceleración del sismo avanza.

- El uso de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo contribuyó al aumento significativo del período fundamental. Como se comprueba en el análisis de vibración libre, estos ayudaron a disminuir las aceleraciones pero no garantizan que la estructura seguirá en pie luego de ocurrido un evento sísmico.
- El salvaguardar la integridad de los pacientes y sus tratantes debe ser prioridad al momento de planificar la construcción de una entidad hospitalaria, con el objetivo de que la estructura responda bajo el criterio de funcionalidad continua ante eventos sísmicos. Para lograrlo en futuras edificaciones, se debe contemplar en su fase de diseño la implementación de sistemas de amortiguamiento o aislamiento sísmico, tomando en cuenta que el costo de éstos representó un porcentaje muy pequeño frente al costo total de la edificación.

## RECOMENDACIONES

- Para edificaciones consideradas como esenciales, las autoridades del Ministerio de Salud deben exigir que en la fase de planificación y diseño se contemplen sistemas que reduzcan la vulnerabilidad estructural. Estos deberán estar fundamentados en una normativa rigurosa que garantice la operatividad del hospital durante y luego de la ocurrencia de un sismo.
- Se recomienda realizar el análisis dinámico no lineal del resto del “Hospital Básico Paute” para establecer las zonas más vulnerables de su estructura y entender su comportamiento de manera íntegra.
- Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, son una de varias medidas que pueden ser aplicadas a esta estructura. Por esta razón se recomienda realizar el análisis dinámico no lineal implementando distintas medidas de mitigación, ya sea una sola o varias trabajando en conjunto, con el fin de determinar cuál de las opciones garantiza la funcionalidad del hospital.
- De no aplicarse medidas de mitigación a la estructura, el hospital deberá detener su funcionamiento en dicho inmueble. Las autoridades encargadas deberán buscar un lugar más accesible y que brinde seguridad a las personas que trabajan en su interior.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACI 318. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute, United States of America.
- Aguiar, R., Vergara, F., Guaygua, B., & Monge, J. (2014). Análisis Sísmico de una Estructura con Aisladores FPS de Primera y Segunda Generación y Elastoméricos con Núcleo de Plomo. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 59.
- Amateco, T., & Escobar, J. (2006). *Análisis de Sistemas Estructurales con Disipadores de Energía con Deterioro de Rigidez, Resistencia y Endurecimiento por Deformación del Material*. Jalisco. Recuperado el 8 de Mayo de 2017, de [http://www.academia.edu/2339216/MODELO\\_HISTER%20C3%89TICO\\_DE\\_MATERIALES\\_CON\\_DETERIORO\\_DE\\_RIGIDEZ\\_Y\\_RESISTENCIA](http://www.academia.edu/2339216/MODELO_HISTER%20C3%89TICO_DE_MATERIALES_CON_DETERIORO_DE_RIGIDEZ_Y_RESISTENCIA)
- Anrango, M. (2015). *Análisis y Rediseño de la Cimentación de un Edificio en Acero con Aisladores Sísmicos "Bloque E del Hospital Regional de Ambato" Modelamiento en el Programa ETABS*. Quito.
- ASCE 7-05. (2006). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers. Recuperado el 11 de Mayo de 2017, de <http://www.dres.ir/sazeh/DocLib9/ASCE%207-05%20Minimum%20Design%20Loads%20for%20buildings%20and%20othe%20Struc.pdf>
- Cassano, A. (2009). *Análisis de Estructuras Bajo Acciones Dinámicas*. Recuperado el 8 de Mayo de 2017, de [http://www.edutecne.utn.edu.ar/guias\\_de\\_estudio/estruc\\_dinam.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/guias_de_estudio/estruc_dinam.pdf)
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras*. México: Pearson Education, Inc.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2012). *Protección Sísmica de Estructuras - Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*. Cámara Chilena de la Construcción, Santiago. Recuperado el 11 de Mayo de 2017, de [http://descargas.coreduc.cl/Proteccion\\_Sismica\\_de\\_Estructuras\\_-\\_Febrero\\_2012\\_CLR\\_v4.1.pdf](http://descargas.coreduc.cl/Proteccion_Sismica_de_Estructuras_-_Febrero_2012_CLR_v4.1.pdf)
- Diario El Tiempo. (2015). Hospital de Paute está listo para atender en el feriado. Recuperado el 12 de Mayo de 2017, de <http://www.eltiempo.com.ec/noticias/region/12/365244/hospital-de-paute-esta-listo-para-atender-en-el-feriado>
- FEMA 273. (1997). *NEHRP Guidelines for the Siesmic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

- FEMA 356. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, United States of America.
- Grases, J. (1989). *Concreto armado en zonas sísmicas*. Obtenido de <http://helid.digicollection.org/en/d/J049s/5.html>
- Guasch, Á. (2014). *Módulo de Cálculo Plástico para Programa de Cálculo Matricial de Estructuras*. Barcelona. Recuperado el 8 de Mayo de 2017, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21147/Memoria-Anexes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mayorga, C. (2011). *Caracterización Mecánica y Modelamiento Estructural de un Disipador Pasivo de Energía de Tipo Arriostamiento de Pandeo Restringido*. Bogotá. Recuperado el 9 de Mayo de 2017, de [http://www.bdigital.unal.edu.co/4392/1/294481.\\_2011.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/4392/1/294481._2011.pdf)
- Ministerio de Salud Pública. (2017). *Presidente Correa visitó la construcción del nuevo hospital básico de Yantzaza en Zamora Chinchipe*.
- NEC. (2014). *Cargas Sísmicas y Diseño Sismo Resistente*. Norma Ecuatoriana de la Construcción.
- OpenSees. (19 de Octubre de 2010). *OpenSees Example 9. Build and Analyze a Section Example*. Recuperado el 9 de Mayo de 2017, de [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees\\_Example\\_9.\\_Build\\_%26\\_Analyze\\_a\\_Section\\_Example](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_Example_9._Build_%26_Analyze_a_Section_Example)
- Organización Panamericana de la Salud. (2000). *Fundamentos de la Mitigación de Desastres en Establecimientos de la Salud*.
- Peralta, M. (2012). *Análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal del hospital de Vielha*. Barcelona. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17872/Tesina\\_Maximo.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17872/Tesina_Maximo.pdf)
- Pesantez, H. (2016). *Evaluación estructural de la entidad hospitalaria "Hospital Paute" del cantón Paute - provincia del Azuay, para cuantificar las amenazas y vulnerabilidad de la edificación hospitalaria*. Cuenca.
- Rodríguez, M. (2005). *Análisis Modal Operacional: Teoría y Práctica*. Sevilla. Recuperado el 28 de Junio de 2017, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3828/fichero/Cap%C3%ADtulos%252F5+An%C3%A1lisis+modal.pdf>
- Zayas, V. (2017). *Estándar de Aislamiento Sísmico para la Funcionalidad Continua*. Lima. Recuperado el 11 de Mayo de 2017
- Zayas, V., & Nahin, S. (2010). *Seismic Design Methodology to Avoid Damage to Structures, Nonstructural Components and Contents*.

## **ANEXOS**