

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
ECUADOR**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MÁSTER EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES**

**“DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INTERACTIVA PARA EL
ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE
BASE EN ESTRUCTURAS”**

AUTOR: DIEGO RAFAEL GUERRERO CARRILLO

DIRECTOR: ING. CARLOS ANDRÉS CELI SÁNCHEZ MSC.

QUITO, 2025

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	14
1.1 ANTECEDENTES	14
1.2 ALCANCE	14
1.3 HIPÓTESIS	15
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.5 OBJETIVO GENERAL	15
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.7 METODOLOGÍA.....	16
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	18
2.1 INTRODUCCIÓN.....	18
2.2 SEÑALES SÍSMICAS	18
2.3 PROCESAMIENTO DE SEÑALES SÍSMICAS	19
2.3.1 CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE	19
2.3.2 FILTRADO	21
2.4 MATRIZ DE MASAS	22
2.5 MATRIZ DE RIGIDEZ	23
2.6 MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN.....	24
2.7 MATRIZ DE RIGIDEZ LATERAL DE LA ESTRUCTURA.....	25
2.8 ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL	25
2.8.1 PERÍODO DE VIBRACIÓN	25
2.8.2 MODOS DE VIBRACIÓN	25
2.9 RESPUESTA DINAMICA LINEAL.....	26
2.10 DISEÑO DE AISLADORES LRB.....	27
2.10.1 AUTOMÁTICO	29
2.10.2 PERÍODO OBJETIVO.....	34
2.10.3 MODELO BILINEAL.....	34

2.11	RESPUESTA DINÁMICA NO LINEAL	35
2.12	ENERGÍA DISIPADA POR HISTÉRESIS.....	36
2.13	DESPLAZAMIENTOS	37
2.14	DERIVAS	37
2.15	ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES NEC 24	38
2.16	CORTANTE BASAL DE DISEÑO NEC 24	41
2.17	NORMATIVAS DE DISEÑO PARA AISLACIÓN SÍSMICA.....	42
CAPÍTULO 3: DESARROLLO.....		44
3.1	DESARROLLO.....	44
3.2	INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO.....	46
3.2.1	TIPO DE APLICACIÓN.....	46
3.2.2	PÚBLICO OBJETIVO	46
3.2.3	DISPOSITIVOS	47
3.2.4	DESCRIPCIÓN DE PANTALLAS	47
3.3	DOCUMENTACIÓN	48
3.3.1	MANUAL EN INGLES	49
3.3.2	MANUAL EN ESPAÑOL	57
3.4	CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN.....	65
3.5	LÓGICA DEL PROGRAMA	66
3.6	FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO IMPLEMENTADO	68
3.6.1	PARÁMETROS INICIALES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL	69
3.6.2	GENERACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL Y CONDENSACIÓN DEL SISTEMA	71
3.6.3	DEFINICIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO Y PROCESAMIENTO DEL REGISTRO SÍSMICO	79
3.6.4	FORMULACIÓN DEL SISTEMA AISLADO Y DISEÑO DEL AISLADOR LRB.....	96

3.6.5	ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL MEDIANTE INTEGRACIÓN PASO A PASO DE NEWMARK	103
3.6.6	FORMULACIÓN NO LINEAL DEL AISLADOR Y OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA HISTERÉTICA	106
3.6.7	OBTENCIÓN DE CORTANTES POR PISO.....	110
3.6.8	OBTENCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES.....	112
3.6.9	OBTENCIÓN DE DERIVAS DE ENTREPISO.....	113
3.7	POLÍTICA DE USO DE LA APLICACIÓN	114
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS		116
4.1	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	116
4.1.1	GEOMETRÍA Y CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL	116
4.1.2	PROPIEDADES DE MASA Y RIGIDEZ DEL SISTEMA	117
4.2	MODELACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL EN ISO-LATE	118
4.2.1	IDEALIZACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL	119
4.2.2	PROPIEDADES DE RIGIDEZ DEL SISTEMA.....	122
4.2.3	PROPIEDADES DE AISLADOR DE BASE	123
4.2.4	REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTRO NEC24	124
4.3	MODELACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL EN SOFTWARE COMERCIAL.....	127
4.3.1	DEFINICIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL.....	127
4.3.2	DEFINICIÓN DE MASAS	132
4.3.3	DEFINICIÓN DEL ESPECTRO NEC24	132
4.3.4	DEFINICIÓN DE REGISTRO SÍSMICO	133
4.3.5	DEFINICIÓN DE ELEMENTOS TIPO LINK.....	133
4.3.6	PARÁMETROS DE ANÁLISIS UTILIZADOS	135
4.4	COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DINAMICAS DEL SISTEMA	138
4.4.1	COMPARACIÓN DE PERÍODOS Y FRECUENCIAS	138

4.4.2	COMPARACIÓN DE FORMAS MODALES	139
4.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE ANALISIS MODAL ESPECTRAL.....	144
4.5.1	COMPARACIÓN DE CORTANTES POR PISO	144
4.5.2	COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES	146
4.5.3	COMPARACIÓN DE DERIVAS DE PISO	147
4.6	COMPARACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA.....	148
4.6.1	COMPARACIÓN DE RESPUESTAS DINÁMICAS	148
4.6.2	COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS.....	150
4.6.3	COMPARACIÓN DE CORTANTES MÁXIMOS POR PISO	151
4.7	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO CON AISLAMIENTO SÍSMICO	152
4.7.1	VARIACIÓN DEL PERIODO FUNDAMENTAL DEL SISTEMA ..	152
4.7.2	REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS EN LA SUPERESTRUCTURA	153
4.8	DIFERENCIAS ENTRE ISO-LATE Y EL SOFTWARE COMERCIAL....	154
4.9	VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA	154
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		155
5.1	CONCLUSIONES.....	155
5.2	RECOMENDACIONES	156
CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA.....		158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos ejemplo de ajuste polinomial	19
Tabla 2 Datos ajustados de ejemplo de ajuste polinomial	21
Tabla 3 Factor de amortiguamiento B_M	32
Tabla 4 Coeficiente F_a	39
Tabla 5 Coeficiente F_d	40
Tabla 6 Coeficiente F_s	40
Tabla 7 Coeficiente r	41
Tabla 8 Modelo de base fija - Análisis modal	138
Tabla 9 Modelo de base aislada - Análisis modal	139
Tabla 10 Cortantes por piso – análisis modal espectral	145
Tabla 11 Desplazamientos por piso – análisis modal espectral	147
Tabla 12 Comparativo de respuestas dinámicas	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura del aislador LRB	28
Figura 2 Modelo bilineal aislador de base.....	34
Figura 3 Espectro elástico de aceleraciones para el sismo de diseño.....	38
Figura 4 Zonificación sísmica	39
Figura 5 Diagrama de flujo de la aplicación	45
Figura 6 Página principal de ISO-LATE en interfaz de computador	47
Figura 7 Página principal de ISO-LATE en interfaz smartphone.....	48
Figura 8 Estructura aplicación ISO-LATE	66
Figura 9 Matriz de colocación.....	73
Figura 10 Espectro elástico de aceleraciones para el sismo de diseño.....	80
Figura 11 Ingreso de datos en la aplicación ISO-LATE	118
Figura 12 Resumen de datos en modelo estructural.....	119
Figura 13 Modelo 2D de la estructura - ISO-LATE	119
Figura 14 Grados de libertad de estructuras en ISO-LATE.....	120
Figura 15 Matriz global de estructura - ISO-LATE.....	121
Figura 16 Matriz condensada - ISO-LATE	121
Figura 17 Matriz de masas - ISO-LATE.....	122
Figura 18 Comprobación rápida de rigideces en piso ISO-LATE.....	122
Figura 19 Modelos de péndulo invertido para estructura fija y para estructura aislada	123
Figura 20 Propiedades ca aislador ISO-LATE	123
Figura 21 Modelo de histéresis bilineal para aislador - ISO-LATE	124
Figura 22 Espectro de diseño NEC24 - ISO-LATE.....	125
Figura 23 Carga y corrección de registros sísmicos - ISO-LATE	126
Figura 24 Escalado de registro sísmico - ISO-LATE	126
Figura 25 Ingreso de datos en software comercial	127

Figura 26 Ingreso de materiales en el software comercial	128
Figura 27 Definición de columnas en software comercial	128
Figura 28 Definición de vigas en software comercial	129
Figura 29 Modificación de propiedades de corte en software comercial.....	129
Figura 30 Modelo estructural en software comercial	130
Figura 31 Asignación de diafragmas y condiciones de apoyo en software comercial	130
Figura 32 Asignación de carga distribuida en software comercial.....	131
Figura 33 Configuración del análisis en 2D	131
Figura 34 Definición de fuentes de masa en software comercial	132
Figura 35 Ingreso del espectro NEC-24 en software comercial	132
Figura 36 Ingreso del registro sísmico en software comercial	133
Figura 37 Definición de propiedades del aislador en software comercial.....	134
Figura 38 Definición de propiedades no lineales del aislador en software comercial	134
Figura 39 Caso de carga modal espectral en software comercial.....	135
Figura 40 Caso de carga tiempo historia fija en software comercial	136
Figura 41 Caso de carga tiempo historia aislado en software comercial	137
Figura 42 Coeficientes de Rayleigh – ISO-LATE.....	137
Figura 43 Formas modales del modelo de base fija en ISO-LATE.....	140
Figura 44 Formas modales del modelo aislado en ISO-LATE.....	140
Figura 45 Modo 1 – software comercial	141
Figura 46 Modo 2 – software comercial	141
Figura 47 Modo 3 – software comercial	142
Figura 48 Modo 1 – modelo aislado.....	142
Figura 49 Modo 2 – modelo aislado.....	143
Figura 50 Modo 3 – modelo aislado.....	143
Figura 51 Cortantes por piso – Modal espectral – ISO-LATE	144
Figura 52 Desplazamientos por piso – Modal espectral – ISO-LATE	146

Figura 53 Derivas por piso – Modal espectral – ISO-LATE	147
Figura 54 Respuesta dinámica en software comercial	148
Figura 55 Respuesta dinámica en ISO-LATE	149
Figura 56 Desplazamientos por piso – Tiempo historia – ISO-LATE.....	150
Figura 57 Comparación de desplazamientos máximos	151
Figura 58 Desplazamientos por piso – Tiempo historia – ISO-LATE.....	151
Figura 59 Comparación de cortantes máximos por piso	152
Figura 60 Espectro NEC24 con periodos de ambas estructuras.....	153

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiar mi camino y darme la fortaleza necesaria para llegar hasta este momento.

A todas las personas que, de una u otra manera, han aportado en mi formación personal y profesional. Incluso aquellos que de forma indirecta han contribuido con su apoyo, enseñanzas o consejos a que hoy pueda alcanzar esta meta.

A cada uno de ellos, mi sincero agradecimiento.

DEDICATORIA

A Dios, por guiar siempre mi camino.

A mis padres, Miriam y Jaime, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mi hermana, Daniela por estar siempre presente y ser parte importante de este camino.

RESUMEN

El objeto de esta tesis es desarrollar una aplicación interactiva utilizando Python que facilite el análisis de sistemas de aislamiento de base para estructuras simplificadas de un grado de libertad y varios grados de libertad. La aplicación permitirá a los usuarios introducir parámetros estructurales y del sistema de aislamiento, y calcular la respuesta dinámica de la estructura con y sin la implementación del aislamiento de base. Además, la aplicación visualizará la respuesta en el dominio del tiempo y la frecuencia, ayudando a entender la efectividad del aislamiento de base en la reducción de vibraciones sísmicas.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to develop an interactive application using Python that facilitates the analysis of base isolation systems for simplified single-degree-of-freedom and multi-degree-of-freedom structures. The application will allow users to input structural and isolation system parameters and calculate the dynamic response of the structure with and without the implementation of base isolation. Additionally, the application will visualize the response in both the time and frequency domains, helping to understand the effectiveness of base isolation in reducing seismic vibrations.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Ecuador es un país de alta sismicidad debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, lo que lo expone a frecuentes y potencialmente devastadores movimientos telúricos. En este contexto, el diseño y la construcción de edificaciones con estrategias de mitigación sísmica son esenciales para reducir los daños estructurales y proteger la vida de sus habitantes. Una de las técnicas más efectivas para mejorar el desempeño sísmico de las estructuras es el aislamiento de base, el cual separa la estructura del movimiento del suelo, reduciendo significativamente las aceleraciones experimentadas durante un sismo.

A nivel académico y profesional, existe un creciente interés en promover el uso de soluciones innovadoras para mejorar la resiliencia estructural frente a terremotos. En este sentido, el desarrollo de una aplicación interactiva en Python que facilite el análisis dinámico de estructuras con y sin aislamiento de base representa una contribución relevante. Esta aplicación permitirá a ingenieros y estudiantes simular el comportamiento de sistemas de un grado de libertad y múltiples grados de libertad, proporcionando una comprensión clara de los beneficios del aislamiento de base y su influencia en la respuesta estructural.

1.2 ALCANCE

El trabajo se centrará en el desarrollo de una aplicación interactiva en Python, que será publicada en Streamlit como aplicación web. Esta permitirá a los usuarios analizar sistemas de aislamiento de base en estructuras discretas elásticas simplificadas, tanto de un grado de libertad como múltiples grados de libertad, frente a excitaciones sísmicas, es decir, señales no armónicas y no periódicas.

La aplicación contará con una interfaz gráfica de usuario para ingresar los parámetros necesarios para el diseño, así como para la visualización de los resultados. Su funcionamiento será verificado mediante estudios de caso simplificados. No se abarcarán estructuras complejas ni integraciones con software de terceros.

1.3 HIPÓTESIS

Un sistema estructural con aislamiento de base reducirá su respuesta en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento ante una excitación sísmica en comparación con un sistema sin aislamiento de base. Esta reducción podrá ser cuantificada y visualizada a fin de demostrar la efectividad de utilizar este sistema.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La implementación de un sistema de aislamiento de base puede marcar la diferencia en la seguridad estructural de edificaciones en zonas sísmicas como Ecuador. Si bien es cierto que existe una gran variedad de software estructural especializado que permite diseñar estos sistemas, muchas veces no se entiende realmente cómo estos programas realizan todos los procesos y cálculos necesarios. Por este motivo, se desarrollará un programa para comprender mejor estas resoluciones, ampliamente utilizadas en la vida profesional.

Desde una perspectiva académica, la aplicación propuesta servirá como un recurso didáctico para estudiantes e investigadores interesados en la ingeniería sísmica. Además, contribuirá a la difusión del conocimiento sobre aislamiento de base en la comunidad de ingenieros estructurales en Ecuador, promoviendo su uso en proyectos reales.

A nivel técnico, el uso de herramientas de código abierto como Python y Streamlit garantiza la accesibilidad y escalabilidad de la aplicación, permitiendo su mejora continua y adaptación a futuras necesidades. Asimismo, la documentación detallada y la guía alojada en el repositorio de GitHub asegurarán la reproducibilidad del proyecto y facilitarán su adopción en distintos contextos.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una aplicación interactiva en Python y Streamlit que permita realizar el análisis de sistemas de aislamiento de base para estructuras elásticas simplificadas de un grado de libertad y varios grados de libertad, facilitando el cálculo de la respuesta dinámica de la estructura con y sin aislamiento de base, y visualizando dicha respuesta en el dominio del tiempo.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar y resumir la teoría de sistemas de aislamiento de base.
- Analizar la respuesta dinámica de sistemas discretos elásticos de un grado de libertad (SDOF “Single Degree of Freedom”) y varios grados de libertad (MDOF “Multiple Degrees of Freedom) con y sin aislamiento de base.
- Diseñar una interfaz gráfica de usuario (GUI “Graphical User Interface”) que permita la entrada de parámetros estructurales y del sistema de aislamiento.
- Implementar algoritmos en Python + Streamlit para calcular la respuesta dinámica de la estructura con y sin aislamiento de base.
- Utilizar bibliotecas de Python con NumPy, SciPy, Matplotlib, Streamlit, etc. para los cálculos y la visualización de la respuesta dinámica.
- Comparar los resultados obtenidos con la aplicación con estudios de caso simplificados.
- Ajustar y mejorar los algoritmos basados en la retroalimentación obtenida de pruebas y validaciones.
- Elaborar una guía detallada que se colocara en el repositorio GitHub que explique el uso de la aplicación, incluyendo ejemplos prácticos.
- Documentar el código y los métodos utilizados para desarrollar la aplicación, asegurando la reproducibilidad y comprensión del proyecto.

1.7 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio, se emplearán las siguientes metodologías y técnicas:

- Revisión bibliográfica exhaustiva: Se analizarán libros, artículos científicos, normativas nacionales e internacionales, y estudios previos relacionados con sistemas de aislamiento de base y dinámica estructural.
- Consulta con expertos del área: Se buscará la retroalimentación de profesionales en ingeniería estructural y sismorresistencia para validar los enfoques y metodologías utilizadas.
- Modelamiento matemático de sistemas: Se implementarán ecuaciones de movimiento para describir la respuesta dinámica de estructuras con y sin

aislamiento de base, considerando sistemas de uno y múltiples grados de libertad (SDOF y MDOF).

- Verificación manual de resultados: Se realizarán comparaciones entre los resultados obtenidos en la aplicación y cálculos manuales simplificados para validar la precisión del software.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido, dentro de la ingeniería civil existen varios factores externos que pueden resultar perjudiciales para los ingenieros diseñadores. Muchas de estas eventualidades pueden ser altamente riesgosas, pero gracias al avance de la ingeniería estructural se ha logrado minimizar en gran medida estas variables. Uno de los fenómenos más devastadores a nivel mundial son los terremotos, y el Ecuador no es la excepción debido a su ubicación geográfica. Con el avance de la tecnología y el creciente interés en entender tanto por qué se dan estos eventos como en cómo se pueden mitigar sus efectos desde el diseño mismo de las estructuras, se busca como principal objetivo prevenir la pérdida de vidas humanas y, por qué no, también reducir las pérdidas económicas que muchas veces conllevan estas eventualidades. En el presente trabajo se elaborará una aplicación interactiva que ayude a analizar los sistemas de aislamiento de base en estructuras simplificadas. Para poder desarrollarla, es primordial entender ciertos conceptos y fundamentos que abarcan todo este trabajo.

2.2 SEÑALES SÍSMICAS

Como es bien sabido, la Tierra es un elemento que está en constante movimiento (sistema dinámico) debido a la interacción de fuerzas geológicas en su interior, principalmente relacionadas con el cinturón sísmico del Pacífico, ya que la gran mayoría de las zonas de subducción en el planeta se encuentran alrededor de este océano. Este cinturón se extiende a lo largo de la costa occidental de América, las islas Aleutianas, la costa oriental de Asia y las islas de Japón (Jiménez, 2007).

El comportamiento de una estructura frente a eventualidades sísmicas, también conocido como interacción suelo-estructura, es fundamental para comprender cómo se comporta cada uno de estos elementos de manera individual y conjunta. Las ondas sísmicas se subdividen en ondas primarias, conocidas como ondas P, que son compresivas y viajan rápidamente; y ondas secundarias, o S, que son transversales, viajan más lento, pero son mucho más destructivas (Celi Sánchez & Poveda, 2024).

Además, existen ondas superficiales que se originan cuando las ondas P y S alcanzan la superficie terrestre. Entre ellas, las ondas Love producen un movimiento

horizontal de lado a lado en el suelo, mientras que las ondas Rayleigh generan un movimiento de rotación elíptica. Estas últimas presentan una amplitud considerablemente mayor que las demás, por lo que suelen ser responsables de los mayores daños ocasionados durante un sismo (Swiss Seimological Service, 2025).

2.3 PROCESAMIENTO DE SEÑALES SÍSMICAS

Las ondas sísmicas transmitidas por estos eventos y que viajan a través de la corteza terrestre se recolectan por medio de aparatos o instrumentos electrónicos conocidos como sismógrafos, los cuales son un sistema de masa, resorte y amortiguador que registra los movimientos y permite que estos datos se graben en un medio digital o analógico, en un orden de valores que están en función de la gravedad y en un paso de tiempo determinado (Tombolini, Marambio, Alarcón, D, & E, 2016).

Las señales, una vez recolectadas con sus datos en bruto, pueden contener ciertos elementos que generan errores al momento de estudiarlas. Por ende, a continuación, se aclara cuáles son estos errores y cómo se mitigan.

2.3.1 CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE

Cuando se registran las señales a través de los aparatos antes mencionados, es muy común que el sensor ubicado en el extremo del resorte no esté en la posición inicial o posición 0. Esto ocurre porque el movimiento impide que el sensor regrese a su posición en cada medición, lo que genera un error acumulativo. Por tal motivo, los registros no quedan representados alrededor del eje de aceleración con valor 0, sino que presentan oscilaciones que alteran esta condición (Tombolini, Marambio, Alarcón, D, & E, 2016).

Tabla 1
Datos ejemplo de ajuste polinomial

Tiempo (s)	Aceleración (m/s ²)
0.0	0.5
0.5	0.8
1.0	1.3
1.5	1.7
2.0	2.1

Nota. Datos arbitrarios, elaborado por el Autor

Para corregir este error se utiliza un ajuste polinomial, el cual consiste básicamente en formar un polinomio de grado n . Para ello se deben encontrar los coeficientes que lo conforman mediante el método de mínimos cuadrados. Una vez obtenidos los valores del polinomio, se calcula el valor correspondiente para cada instante de tiempo, y con este resultado se puede restar el dato original del dato ajustado, corrigiendo así la tendencia, como se muestra a continuación.

Como se puede ver en la Tabla 1, se tienen datos de una muestra de aceleración de un registro sísmico, y se desea ajustarlos a un polinomio de segundo orden o cuadrático, el cual tendría la siguiente forma:

$$P(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2$$

Pero, para obtener los coeficientes del polinomio mostrado, se debe realizar un sistema matricial mediante el método de los mínimos cuadrados, cuya formulación es la siguiente:

$$c = (X^T X)^{-1} X^T a$$

Entonces, primero se van a estructurar las matrices necesarias, que serían las siguientes:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 \\ 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \\ 1 & t_4 & t_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.0 & 0.00 \\ 1 & 0.5 & 0.25 \\ 1 & 1.0 & 1.00 \\ 1 & 1.5 & 2.25 \\ 1 & 2.0 & 4.00 \end{bmatrix} \quad y \quad a = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.8 \\ 1.3 \\ 1.7 \\ 2.1 \end{bmatrix}$$

A partir de esto, se desarrollan las matrices para obtener los coeficientes del polinomio que se va a ajustar:

$$X^T X = \begin{bmatrix} 5.00 & 5.00 & 7.35 \\ 5.00 & 7.50 & 12.50 \\ 7.50 & 12.50 & 22.125 \end{bmatrix} \quad y \quad X^T a = \begin{bmatrix} 6.4 \\ 8.8 \\ 14.6 \end{bmatrix}$$

Finalmente, se resuelve el sistema obtenido para encontrar los valores:

$$\begin{bmatrix} 5.00 & 5.00 & 7.35 \\ 5.00 & 7.50 & 12.50 \\ 7.50 & 12.50 & 22.125 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.4 \\ 8.8 \\ 14.6 \end{bmatrix}$$

Los resultados aproximados de los coeficientes son:

$$c_0 \approx 0.4743, \quad c_1 \approx 0.7629, \quad c_2 \approx 0.0286$$

Con esto, se forma el polinomio que se usará para ajustar los valores, el cual sería el siguiente:

$$P(t) = 0.4743 + 0.7629 \cdot t + 0.0286 \cdot t^2$$

Y con este polinomio se irá reemplazando cada uno de los tiempos del registro para corregirlos, como se verá a continuación.

Tabla 2
Datos ajustados de ejemplo de ajuste polinomial

Tiempo (s)	Aceleración (m/s ²)	$P(t)$ ajustado	Aceleración corregida
0.0	0.5	0.4743	+0.0257
0.5	0.8	0.8629	-0.0629
1.0	1.3	1.2657	+0.0343
1.5	1.7	1.6829	+0.0171
2.0	2.1	2.1143	-0.0143

Nota. Elaborado por el Autor

Con este proceso se haría la corrección de línea base para todos y cada uno de los datos de un registro sísmico, y se puede aplicar para el grado de polinomio que se desee. Sin embargo, como se puede ver, es un proceso tedioso debido a la gran cantidad de datos, por lo que se utilizan lenguajes de programación que automaticen y simplifiquen este trabajo.

2.3.2 FILTRADO

Cuando se registran señales de registros sísmicos, si bien es cierto que se obtienen las aceleraciones del movimiento en cada fracción de tiempo, debido a la sensibilidad de los sismógrafos muchas veces se registran, conjuntamente con los datos sísmicos, señales de baja frecuencia producidas por errores de equipos descalibrados, cambios de temperatura, humedad, presión atmosférica o incluso movimientos tectónicos lentos. Estas frecuencias afectan directamente el proceso de integración

para obtener la velocidad y el desplazamiento, ya que este se basa en el cálculo del área bajo la curva, lo cual no ocurre con el ruido de alta frecuencia.

Cuando la señal se contamina con ruido de alta frecuencia —debido a la estática electrónica de los sensores, vibraciones mecánicas como maquinaria cercana, tráfico o incluso personas caminando— pueden generarse picos que distorsionan el registro de la aceleración.

Por estos motivos antes mencionados, se deben filtrar los registros sísmicos para que puedan ser utilizados de manera adecuada. Sin embargo, es importante analizar cada caso en particular, ya que en muchos casos podrían eliminarse frecuencias que no deberían ser descartadas (Carreño, 1999).

Como bien se conoce, existen varios tipos de filtros: los filtros pasa-baja (*lowpass*), que eliminan las frecuencias superiores a un valor dado y dejan pasar sin atenuación las inferiores; los filtros pasa-alta (*highpass*), que eliminan las frecuencias inferiores a una frecuencia dada y permiten el paso de las superiores; y finalmente, los filtros pasa-banda (*bandpass*), que eliminan todas las frecuencias por debajo y por encima de un rango determinado, permitiendo solo el paso de las frecuencias dentro del rango seleccionado (Carreño, 1999).

En la práctica, no existen filtros ideales como los descritos, pero sí existen aproximaciones matemáticas como los filtros de Chebyshev, Bessel y Butterworth. En este trabajo se utilizarán estos últimos.

Los filtros de Butterworth, también conocidos como filtros planos, son los más conservadores, ya que tienen una transición de atenuación relativamente lenta en comparación con otros tipos de filtros, cuya acción es más agresiva. Además, este tipo de filtro mantiene planas las frecuencias aceptadas (Steer, 2025).

2.4 MATRIZ DE MASAS

Según (Alejandro & Fluxà, 2013), la matriz de masas es una matriz diagonal cuyos elementos principales representan las masas concentradas en cada uno de los pisos que conforman la estructura en análisis. Este tipo de formulación se utiliza habitualmente en

el análisis modal, ya que permite desacoplar adecuadamente las ecuaciones de movimiento.

La masa asignada a cada piso se obtiene concentrando la masa total del nivel en un punto específico, al cual se asocia el correspondiente grado de libertad. En un planteamiento general, la matriz de masas se deriva de la formulación de los elementos finitos que integran el modelo; sin embargo, para este caso de estudio se adopta una matriz de masas condensada, es decir, una masa concentrada por cada nivel de la edificación.(Alejandro & Fluxà, 2013)

Las unidades de la matriz están dadas por:

$$\text{Unidad de masa} = \frac{\text{fuerza} \cdot \text{tiempo}^2}{\text{longitud}}$$

A continuación, se presenta la forma general de la matriz de masas utilizada:

$$\bar{m} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix}$$

2.5 MATRIZ DE RIGIDEZ

Para el presente trabajo se utiliza únicamente el análisis matricial en un pórtico plano bajo la suposición de que los elementos que lo componen son axialmente rígidos, además se define que un pórtico plano es un pórtico estructural el cual se ejemplifica únicamente en 2D (Guzmán et al., 2017). Los elementos que componen un pórtico plano se definen por una matriz de rigidez de 6x6 la cual se obtiene de aplicar desplazamientos unitarios en cada uno de sus grados de libertad, y además de esto se conoce que cada elemento tiene 3 grados de libertad por nodo que son dos traslacionales y uno rotacional con lo cual se obtiene la matriz de cada elemento que es la siguiente:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} AE/L & 0 & 0 & -AE/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -AE/L & 0 & 0 & AE/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix}$$

2.6 MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN

Según (Hibbeler, 2012), cuando se analizan armaduras o pórticos planos, es común que varios de sus elementos se encuentren orientados en distintas direcciones dentro del sistema estructural. Por esta razón, resulta necesario transformar las fuerzas, desplazamientos, reacciones y rigideces desde el sistema de coordenadas local del elemento (x', y', z') hacia el sistema de coordenadas global del modelo (x, y, z) . Esta conversión se realiza mediante una matriz de transformación, la cual permite expresar cualquier magnitud vectorial o matricial del elemento en términos de las coordenadas globales del conjunto.

En esencia, cuando un elemento no está alineado con el sistema global, su orientación puede descomponerse mediante sus ángulos de inclinación respecto a los ejes globales $Xy Y$. Para los pórticos planos, los ejes $Zy Z'$ coinciden, por lo que no requieren transformación. Considerando esta relación geométrica, la matriz de transformación para un elemento con seis grados de libertad (tres por nodo) se expresa de la siguiente manera:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \cos \theta_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta_y & \cos \theta_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta_x & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \theta_y & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $\lambda_x = \cos \theta_x$ y $\lambda_y = \cos \theta_y$ corresponden a los cosenos directores del elemento. A partir de esta matriz, la transformación de la matriz de rigidez local k' hacia la matriz de rigidez en el sistema global del elemento se obtiene mediante la siguiente operación matricial:

$$k = T^T k' T$$

El resultado es la matriz de rigidez del elemento en coordenadas globales, la cual permite posteriormente ensamblar la matriz global de rigidez del sistema completo.

$$k = \begin{bmatrix} \left(\frac{AE}{L}\lambda_x^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_y^2\right) & \left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & -\frac{6EI}{L^2}\lambda_y & -\left(\frac{AE}{L}\lambda_x^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_y^2\right) & -\left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & -\frac{6EI}{L^2}\lambda_y \\ \left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & \left(\frac{AE}{L}\lambda_y^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_x^2\right) & \frac{6EI}{L^2}\lambda_x & -\left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & -\left(\frac{AE}{L}\lambda_y^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_x^2\right) & \frac{6EI}{L^2}\lambda_x \\ -\frac{6EI}{L^2}\lambda_y & \frac{6EI}{L^2}\lambda_x & \frac{4EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}\lambda_y & -\frac{6EI}{L^2}\lambda_x & \frac{2EI}{L} \\ -\left(\frac{AE}{L}\lambda_x^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_y^2\right) & -\left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & \frac{6EI}{L^2}\lambda_y & \left(\frac{AE}{L}\lambda_x^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_y^2\right) & \left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & \frac{6EI}{L^2}\lambda_y \\ -\left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & -\left(\frac{AE}{L}\lambda_y^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_x^2\right) & -\frac{6EI}{L^2}\lambda_x & \left(\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)\lambda_x\lambda_y & \left(\frac{AE}{L}\lambda_y^2 + \frac{12EI}{L^3}\lambda_x^2\right) & -\frac{6EI}{L^2}\lambda_x \\ -\frac{6EI}{L^2}\lambda_y & \frac{6EI}{L^2}\lambda_x & \frac{2EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}\lambda_y & -\frac{6EI}{L^2}\lambda_x & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Este procedimiento se aplica a cada elemento estructural, garantizando consistencia entre su orientación real y el sistema de referencia utilizado en el análisis matricial. (Hibbeler, 2012)

2.7 MATRIZ DE RIGIDEZ LATERAL DE LA ESTRUCTURA

Con el fin de simplificar el análisis estructural mediante el método de rigidez, se asume que los elementos del pórtico plano son infinitamente rígidos dentro de su propio plano. Bajo esta hipótesis, su deformación ante cargas laterales es despreciable, por lo que cada nivel del pórtico puede considerarse como un diafragma rígido. Esta condición implica que todos los puntos de un mismo nivel experimentan el mismo desplazamiento horizontal, comportándose como un cuerpo rígido. Gracias a esta idealización, el modelo dinámico del sistema se simplifica significativamente, pues los grados de libertad se reducen a un solo desplazamiento lateral por planta, sin necesidad de considerar deformaciones internas dentro del nivel. (Oropeza Sarahi, 2025)

2.8 ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL

Según el trabajo de (Carabalí Darío, 2020) este tipo de análisis es el método más utilizado dentro del análisis de dinámica de estructuras, puesto que este proceso permite desacoplar un sistema de ecuaciones de manera que cada modo es resuelto de manera independiente para poder acoplar el sistema de ecuaciones y obtener la respuesta global de la estructura, en base a este se tienen dos métodos pero para este caso se utilizara los autovalores con el cual se obtienen formas modales y frecuencias del sistema.

2.8.1 PERÍODO DE VIBRACIÓN

El período es el tiempo —expresado en segundos— que requiere un sistema vibratorio para completar un ciclo completo de movimiento, es decir, para partir de un punto específico y regresar nuevamente a él (Celi Carlos, 2025). Por su parte, la frecuencia de vibración corresponde al recíproco del período y representa el número de ciclos que ocurren en un segundo. Esta magnitud se expresa en hertz (Hz).

2.8.2 MODOS DE VIBRACIÓN

Los modos de vibración corresponden a los patrones específicos de deformación con los que un sistema mecánico oscila de manera armónica alrededor de una posición de equilibrio estable. Cada modo se caracteriza por una frecuencia natural propia y una

forma modal asociada, las cuales describen cómo se distribuyen los desplazamientos relativos en la estructura durante la vibración. Estos modos surgen como solución del problema de autovalores asociado a las matrices de rigidez y masa del sistema, lo que permite determinar matemáticamente tanto sus frecuencias naturales como sus respectivas configuraciones espaciales de deformación. (Axisa François, 2005)

2.9 RESPUESTA DINAMICA LINEAL

Cuando se resuelve la ecuación de movimiento de un sistema con uno o varios grados de libertad sometido a una excitación variable en el tiempo, como ocurre con un registro sísmico, el uso de métodos analíticos tradicionales resulta poco práctico o incluso imposible, debido a la complejidad y a la naturaleza no lineal del estímulo. Por esta razón, la resolución del problema requiere emplear métodos numéricos, los cuales permiten aproximar la respuesta dinámica del sistema de forma eficiente y con un nivel de precisión adecuado para el análisis estructural. (Chopra Anil, 2014)

En este trabajo se empleará el método β de Newmark, uno de los procedimientos numéricos más utilizados para resolver la ecuación de movimiento de sistemas estructurales sometidos a excitaciones dinámicas. Este método consiste en un proceso incremental e iterativo que permite obtener, paso a paso en el tiempo, la aceleración, velocidad y desplazamiento del sistema. La integración se realiza aplicando un criterio de convergencia basado en una tolerancia de error, garantizando que los resultados obtenidos sean estables y precisos. (Chopra Anil, 2014)

Las ecuaciones de recurrencia propuestas por Newmark, que permiten avanzar del instante i al instante $i + 1$, se expresan de la siguiente forma:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1 - \gamma)\Delta t\ddot{u}_i + \gamma\Delta t\ddot{u}_{i+1}$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t\dot{u}_i + (0.5 - \beta)\Delta t^2\ddot{u}_i + \beta\Delta t^2\ddot{u}_{i+1}$$

La ecuación de equilibrio en el paso $i + 1$, considerando masa m , amortiguamiento c y fuerza restauradora (f_s), se escribe como:

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + (f_s)_{i+1} = p_{i+1}$$

Estas expresiones permiten resolver de manera secuencial la ecuación de movimiento bajo una excitación arbitraria dependiente del tiempo, como ocurre en el caso de un registro sísmico real.

Estas variables son las siguientes:

u_i : Desplazamiento del sistema en el instante de tiempo i

u_{i+1} : Desplazamiento del sistema en el paso siguiente $i + 1$

$\dot{u}_i$: Velocidad del sistema en el instante i

$\dot{u}_{i+1}$: Velocidad en el paso siguiente $i + 1$

$\ddot{u}_i$: Aceleración del sistema en el instante i

$\ddot{u}_{i+1}$: Aceleración en el paso siguiente $i + 1$

Δt : Incremento o paso del tiempo para cada instante de análisis

β y γ : Son parámetros propios del método de Newmark que ayudan en la estabilidad y precisión del método y por lo general los valores típicos son de 1/4 y 0.5 respectivamente.

m : La masa del sistema de análisis

c : El amortiguamiento del sistema analizado

$(f_s)_{i+1}$: La fuerza de restauración del sistema en el instante de paso siguiente, normalmente es ku pero esto varía la rigidez k cuando es un análisis no lineal y depende del modelo constitutivo o de histéresis

p_{i+1} : Carga o excitación externa aplicada en el instante $i + 1$, normalmente es el registro sísmico aplicado al sistema

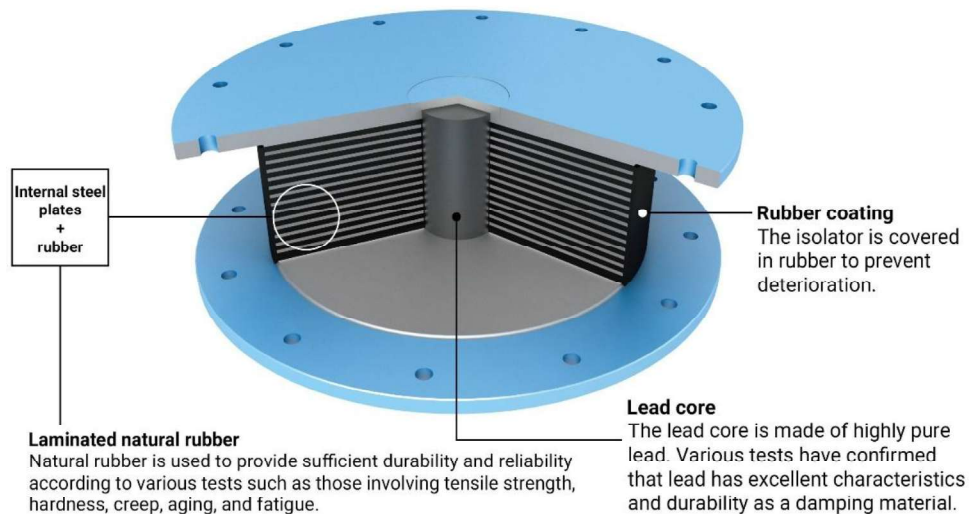
2.10 DISEÑO DE AISLADORES LRB

Los aisladores de base son dispositivos formados por capas alternadas de caucho y placas de acero, unidas mediante un proceso de vulcanización, lo que les confiere un comportamiento compuesto. La rigidez vertical está controlada principalmente por la alta

rigidez en el plano de las placas de acero, las cuales restringen la expansión del caucho en esa dirección. Por otro lado, la rigidez horizontal es gobernada por las propiedades del caucho: mientras mayor sea el espesor de las capas elastoméricas, mayor será la flexibilidad lateral del aislador. (Apolo Ángel & Esquivel Jaime, 2024)

En este trabajo se emplearán aisladores LRB (Lead Rubber Bearing), los cuales incorporan un núcleo de plomo adicional al caucho y al acero. Este núcleo incrementa significativamente la capacidad de disipación de energía, proporcionando un mayor amortiguamiento que el aportado únicamente por el elastómero. (Apolo Ángel & Esquivel Jaime, 2024)

Figura 1
Estructura del aislador LRB



Tomado de (*Building-Use Lead Rubber Bearing, LRB - OILES CORPORATION*, s. f.)

El diseño de aisladores LRB se realiza en función de las características particulares de la estructura a la que estarán asociados. Esto implica que cada proyecto requiere un diseño específico y adaptado a sus propiedades dinámicas. Por esta razón, se sigue el procedimiento iterativo establecido en la norma ASCE 7-22, específicamente en el Capítulo 17: “*Requerimientos de diseño sísmico para estructuras sísmicamente aisladas*”. Con base en este procedimiento normativo, los aisladores se dimensionan de manera automática a partir de las propiedades globales del sistema, tales como su masa, su rigidez, así como las propiedades del caucho y la rigidez aportada por el núcleo de

plomo. De esta forma, se determinan las características mecánicas necesarias de cada aislador ubicado en los elementos verticales (columnas) del pórtico.

A continuación, se presenta el procedimiento seguido para su diseño.

2.10.1 AUTOMÁTICO

Para el diseño automático se sigue el siguiente proceso propuesto por (Páez Carlos, 2023), el mismo que viene del propuesto del código ASCE 7-22:

1.- Se obtienen los datos necesarios para el diseño como lo son:

W_T : Peso total de la carga muerta en la estructura o sistema de análisis

W_{col} : Peso total de la carga muerta en la columna que se está analizando

W_{ais} : Peso de 1 aislador

g : Aceleración de la gravedad en mm/s^2 , con un valor de 9810

N° : Número de columnas o aisladores que se van a tomar en cuenta

k_{LRB} : Rigidez de los aisladores LRB

2.- Se diseña el diámetro del núcleo de plomo, se toma en cuenta que la norma ASCE 7 exige que la fuerza característica del sistema no sea menor que un valor que depende del peso y desplazamiento de diseño y típicamente este es del 5% del peso total

$$Q_{d\ total} = \sum Q_d$$

$$\frac{Q_{d\ total}}{W_T} = 0.05$$

$$0.05 = \frac{N^\circ \times Q_d}{W_T}$$

$$0.05 = \frac{N^\circ \times A_L \sigma_L}{W_T}$$

$$0.05 = \frac{N^{\circ} \times \frac{\pi D_L^2}{4} \times \sigma_L}{W_T}$$

$$D_L = \sqrt{\frac{0.05 \times W_T \times 4}{N^{\circ} \times \pi \times \sigma_L}}$$

3.- Se redondea el diámetro obtenido del núcleo, este debe ser redondeado a múltiplo cercano tomando en cuenta que los núcleos de plomo suelen tener medidas con incrementos de 20 mm. (Páez Carlos, 2023) Con este valor asumido se recalcula el valor de la fuerza característica del sistema:

$$Q_{d\ total} = N^{\circ} \times Q_d$$

$$Q_{d\ total} = N^{\circ} \times A_L \sigma_L$$

$$Q_{d\ total} = N^{\circ} \times \frac{\pi D_L^2}{4} \times \sigma_L$$

4.- Se obtiene el diámetro externo de los aisladores de tipo LRB

$$D_B = 4D_L$$

5.- Así mismo se obtiene la altura de capas de caucho la cual debe ser mayor o igual al diámetro interno del núcleo de plomo

$$T_r = D_L$$

6.- Con estos datos obtenidos se puede obtener la rigidez post elástica o la rigidez post fluencia del aislador, de la siguiente forma

$$k_d = f_L \frac{GA_r}{T_r}$$

7.- El módulo de corte es una propiedad del caucho que lo indica cada fabricante, pero por practicidad se va a utilizar un valor típico de

$$G = 0.45 \frac{N}{mm^2}$$

8.-Se obtiene la rigidez post fluencia de todo el sistema en conjunto

$$k_{d\ total} = N^{\circ} \times f_L \frac{GA_r}{T_r}$$

$$k_{d\ total} = N^{\circ} \times f_L \frac{G \times \frac{\pi(D_B^2 - D_L^2)}{4}}{T_r}$$

9.- Se penaliza con un factor de reducción, conocido como límite inferior a la fuerza característica del sistema y de la rigidez post fluencia

$$Q_{d\ total\ LB} = 0.85 \times Q_{d\ total}$$

$$k_{d\ total\ LB} = 0.85 \times k_{d\ total}$$

10.- Se determina la rigidez efectiva y el amortiguamiento efectivo de todo el sistema de aislamiento por un proceso iterativo, empezando con el cálculo del desplazamiento máximo

$$D_M = \frac{A_n}{\omega_n^2} = \frac{S_{DS}}{\frac{2\pi^2}{T}}$$

11.- Se obtiene la rigidez efectiva de la primera iteración

$$k_M = k_{d\ total\ LB} + \frac{Q_{d\ total\ LB}}{D_M}$$

12.- Se obtiene el período efectivo del sistema aislado (Se debe verificar que este período desde la primera iteración salga mayor que el del sistema analizado para que tenga sentido)

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W_T}{k_M g}}$$

13.- Se calcula el amortiguamiento efectivo en donde Y se toma un buen valor para iniciar la aproximación de 25 mm

$$\beta_M = \frac{2Q_{d\ total\ LB}(D_M - Y)}{\pi k_M D_M^2}$$

14.- Con este valor obtenido del amortiguamiento efectivo β_M , se utiliza la tabla 17.5-1 de la norma ASCE 7-22 para interpolar y obtener el valor del factor de amortiguamiento B_M

Tabla 3

Factor de amortiguamiento B_M

Amortiguamiento efectivo β_M	Factor B_M
≤ 2	0.80
5	1.00
10	1.20
20	1.50
30	1.70
40	1.90
≥ 50	2.00

Nota. Tomado de tabla 17.5-1 de (American Society of Civil Engineers, 2022)

Para obtener el valor específico para el caso se debe realizar una interpolación lineal como se ve a continuación

$$B_M = (x - x_1) \times \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} + y_1$$

15.- Se verifica el desplazamiento máximo antes calculado con los valores calculados

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M}$$

Con este último valor calculado del desplazamiento máximo nuevamente se inicia el proceso desde el punto 10 y así sucesivamente hasta que el valor inicial del desplazamiento en el punto 10 sea casi el mismo que el del punto 15 y con todos estos valores se obtienen los valores finales de las propiedades, se obtiene la rigidez efectiva de un solo aislador

$$k_{eff\ 1} = \frac{k_{d\ total\ LB}}{N^\circ} + \frac{\frac{Q_{d\ total\ LB}}{D_M}}{N^\circ}$$

$$k_{eff\ 1} = \frac{k_{d\ total\ LB} + \frac{Q_{d\ total\ LB}}{D_M}}{N^\circ}$$

Se obtiene el amortiguamiento efectivo, y hay que tomar en cuenta que no es lo mismo el factor de amortiguamiento “c” que el amortiguamiento efectivo “ $\zeta = \beta_M$ ”

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{k \times \frac{W}{g}}}$$

$$c = \zeta \times 2\sqrt{k \times \frac{W}{g}}$$

$$c = 2\beta_M \sqrt{k \times \frac{W}{g}}$$

Se calculan las propiedades no lineales para un solo aislador de la siguiente manera:

$$Stiffness\ (Rigidez\ del\ nucleo\ de\ plomo) = \frac{\frac{\pi \times D_L^2}{4} \times \sigma_L}{Y}$$

$$Yield\ Strength\ (Resistencia\ a\ la\ fluencia) = \frac{\pi \times D_L^2}{4} \times \sigma_L$$

$$Post\ Yield\ Stiffness\ Ratio = \frac{f_L \frac{GA_r}{T_r}}{Stiffness} = \frac{f_L \frac{G \times \frac{\pi(D_B^2 - D_L^2)}{4}}{T_r}}{Stiffness}$$

Como se puede observar de esta manera es el proceso que se a incluido en el programa para que diseñe de manera automática el aislador de base mas optimo que se va a utilizar en el sistema de análisis que se especifique de inicio.

2.10.2 PERÍODO OBJETIVO

Para este proceso se utiliza exactamente el mismo procedimiento anteriormente indicado, específicamente en el punto 12 se agrega un valor objetivo para de esta manera obtener los demás valores, por tal motivo ya no se entra en el proceso iterativo como el anterior únicamente con el período objetivo se obtiene todo lo demás.

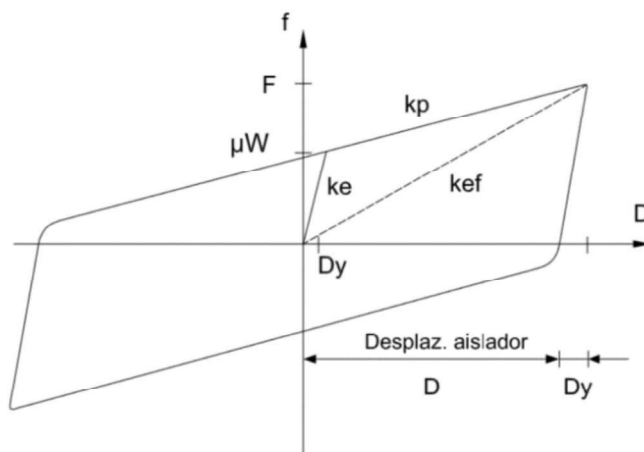
2.10.3 MODELO BILINEAL

Con los parámetros obtenidos en el diseño previo de los aisladores LRB, es posible construir el modelo bilineal que representa el comportamiento histerético del sistema de aislamiento. Dicho modelo es el que se empleará en el análisis global de la estructura, tanto para el caso fijo como para el aislado. En el presente estudio se asume que todos los aisladores de base son idénticos, por lo que la misma curva bilineal caracteriza a cada uno de ellos. En consecuencia, la curva de histéresis obtenida para un aislador se emplea como referencia para todo el sistema, aplicando únicamente los factores de escalamiento necesarios para representar la disipación total de energía aportada por el conjunto de aisladores.

A continuación, se presenta un esquema ilustrativo en el que se identifican claramente las componentes del modelo bilineal (rigidez inicial, fuerza de fluencia, rigidez post-fluencia y desplazamientos característicos), así como el procedimiento mediante el cual se construye la curva utilizando los valores determinados en el proceso de diseño.

Figura 2

Modelo bilineal aislador de base



Tomado de (Constantinou Michael et al., 2016)

La gran mayoría de los sistemas de aislamiento sísmico se pueden representar mediante esta curva de histéresis bilineal, es importante recalcar que las propiedades del aislador son independientes de la velocidad. En este modelo los desplazamientos máximo y mínimo ocurren con el corte máximo y mínimo respectivamente (Apolo Ángel & Esquivel Jaime, 2024)

2.11 RESPUESTA DINÁMICA NO LINEAL

Como se indicó previamente, los aisladores de base presentan un comportamiento histerético bilineal, caracterizado por dos pendientes diferenciadas: una rigidez inicial y una rigidez post-fluencia reducida. Esta variación de rigidez ocurre en función de la fuerza interna que desarrolla el aislador, la cual depende del desplazamiento relativo entre la superestructura y la base aislada. Debido a estas variaciones en sus propiedades mecánicas, el sistema deja de comportarse linealmente y pasa a constituir un sistema dinámico no lineal dependiente del estado. (Chopra Anil, 2014)

Según (Chopra Anil, 2014), en un sistema de estas características, la ecuación de movimiento debe resolverse considerando que los parámetros estructurales —en este caso, la rigidez efectiva del aislador en cada incremento de tiempo— cambian conforme evoluciona la respuesta dinámica. Esto implica que no es posible utilizar directamente los métodos clásicos de análisis lineal, ya que en ellos la matriz de rigidez permanece constante.

Para resolver esta no linealidad, en el presente trabajo se emplea nuevamente el método de integración directa de Newmark, anteriormente descrito, pero incorporando un procedimiento iterativo de actualización de rigideces. Es decir, en cada paso de tiempo:

1. Se estima inicialmente la rigidez del aislador en función del estado anterior.
2. Se calcula el desplazamiento mediante el esquema de Newmark.
3. Se verifica si el aislador ha entrado en el tramo post-fluencia o si continúa en el tramo lineal inicial.
4. Según corresponda, se actualiza la rigidez tangente para ese instante.
5. Se repite el proceso hasta lograr la convergencia del equilibrio dinámico.

Este procedimiento permite reproducir de manera precisa la evolución de la curva de histéresis y, con ello, la capacidad del sistema de aislamiento para disipar energía mediante mecanismos no lineales dependientes del desplazamiento y de la fuerza de fluencia del núcleo de plomo. En consecuencia, el análisis dinámico no lineal proporciona una representación más realista del comportamiento del sistema aislado frente a demandas sísmicas, en comparación con métodos lineales equivalentes.

Su implementación es indispensable para evaluar adecuadamente la eficiencia del aislamiento y verificar que el desplazamiento máximo se mantenga dentro de los límites de diseño establecidos por las normas (ASCE 7-22, AASHTO, NEC-15/24). (Chopra Anil, 2014)

2.12 ENERGÍA DISIPADA POR HISTÉRESIS

Según el trabajo de (Soto Gerardo & Vente Rodrigo, 2021), los aisladores de base disipan energía principalmente mediante su amortiguación histerética, la cual puede representarse, para efectos del análisis estructural, mediante una amortiguación viscosa equivalente. Este mecanismo de disipación introduce en el sistema un comportamiento no lineal dependiente del ciclo de carga, pero que puede modelarse de manera efectiva utilizando parámetros equivalentes de amortiguamiento y rigidez.

La incorporación de los aisladores produce un aumento significativo del período fundamental de la estructura, debido a la reducción de la rigidez lateral efectiva en la interfaz de aislamiento. Este incremento del período desplaza la respuesta dinámica hacia una zona del espectro sísmico donde, de manera general, las aceleraciones espectrales son menores, lo cual se traduce en una reducción de las fuerzas internas en la superestructura.

Adicionalmente, la disipación histerética aporta una demanda de energía menor en el sistema, ayudando a controlar los desplazamientos relativos entre la base y la superestructura. En conjunto, estos efectos permiten que la respuesta global esté dominada por un movimiento casi rígido controlado por el primer modo de vibración, lo que mejora considerablemente el desempeño sísmico de la estructura aislada en comparación con una estructura fija.

2.13 DESPLAZAMIENTOS

Los aisladores de base se diseñan en función de un desplazamiento máximo permitido, el cual se determina a partir del análisis sísmico específico de la estructura donde serán implementados. Debido a que dicho desplazamiento depende directamente de las propiedades dinámicas de cada edificación —masa, rigidez, configuración estructural y condiciones de sitio—, los aisladores deben ser diseñados a medida, lo que explica por qué no existe un modelo universal aplicable a todas las estructuras. El desempeño del sistema de aislamiento se basa en que la mayor parte del desplazamiento se concentra en la interfaz aislada, permitiendo que la energía proveniente del movimiento del suelo sea disipada principalmente en los aisladores a través de su comportamiento histerético. Como resultado, la superestructura experimenta desplazamientos significativamente menores, lo cual es beneficioso porque estos están directamente vinculados con las derivas de piso, uno de los parámetros clave para controlar daños estructurales y no estructurales. (Rojas, 2024)

En términos prácticos, el aumento del desplazamiento en la base acompañado de la reducción de derivas en los niveles superiores constituye uno de los principales mecanismos de protección que ofrece el aislamiento sísmico. Esto permite que los elementos estructurales y no estructurales trabajen dentro de rangos más seguros, preservando su integridad y garantizando la funcionalidad del edificio después de un evento sísmico severo.

2.14 DERIVAS

La deriva entre los pisos de una estructura se define como el desplazamiento relativo entre dos niveles dividido para la altura del piso que se está analizando. Este índice representa prácticamente la distorsión relativa de los pisos, y como su nombre indica, sirve para verificar las distorsiones máximas que puede presentar una edificación en función de su configuración estructural y de los materiales que la componen. Con esta información se puede decidir si es necesario rigidizar la estructura o, por el contrario, darle mayor ductilidad. (Krawinkler & Gupta, 1998)

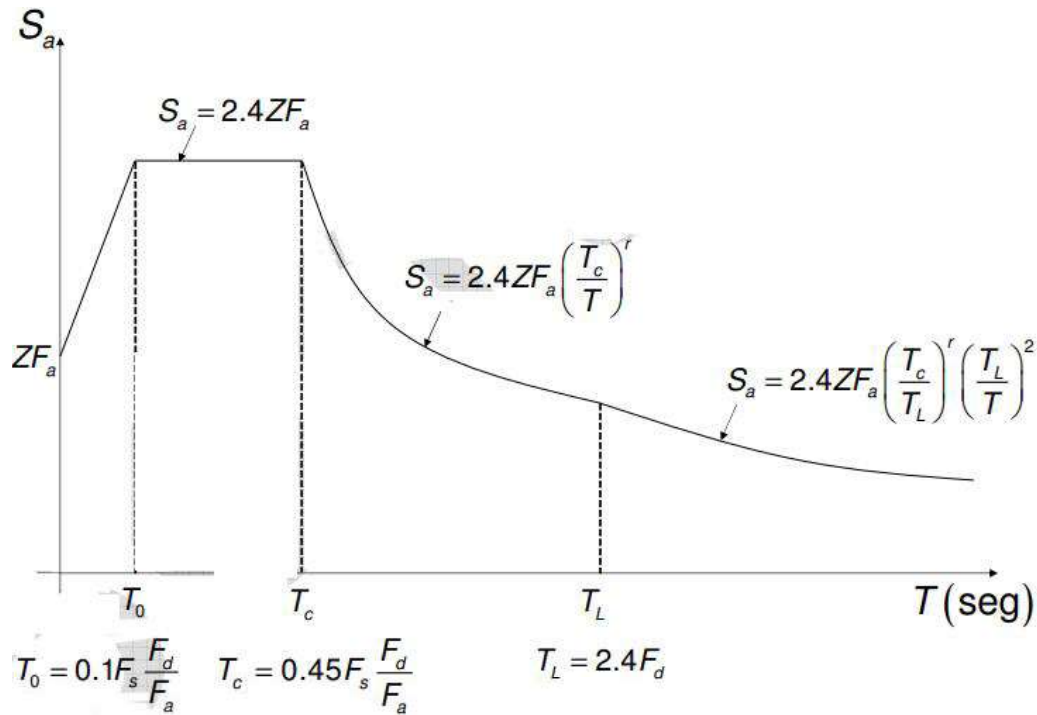
En base a esto se puede realizar una comparativa de como se mueve toda la estructura con una base rígida y una base aislada de tal manera que las distorsiones de piso (a partir del nivel del aislador en adelante) disminuyen de manera significativa.

2.15 ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES NEC 24

En la última actualización aun no oficializada de la NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción), específicamente en la NEC-SE-DS 2024 se a establecido un nuevo espectro de diseño el cual se indica a continuación:

Figura 3

Espectro elástico de aceleraciones para el sismo de diseño

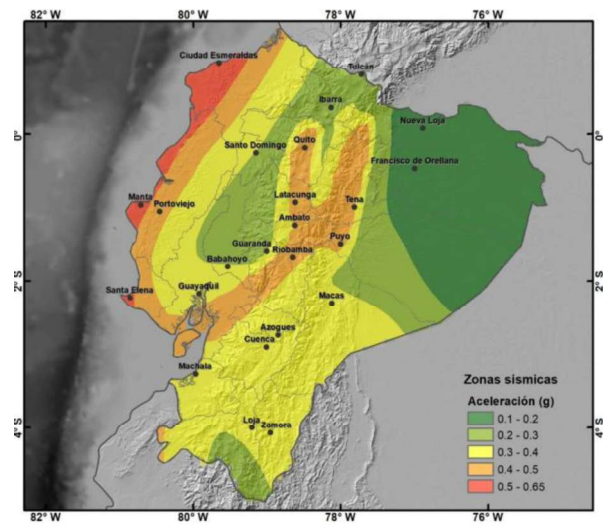


Tomado de (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

Para poder obtener el espectro específico a utilizar para una estructura en particular y con las condiciones en sitio específicas se deben obtener las variables que se tienen en el gráfico las cuales se obtienen a partir de la normativa como se tiene a continuación.

Se debe analizar la estructura y características mecánicas del suelo donde esta emplazada la estructura a fin de determinar el perfil de tipo de suelo que se tiene a utilizar y además de esto se debe determinar la zona sísmica la cual depende del coeficiente “Z” de fracción de la gravedad el cual básicamente se obtiene de la zonificación sísmica la cual se especifica en la normativa a través de la siguiente imagen:

Figura 4
Zonificación sísmica



Tomado de (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

Según (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024), el coeficiente “Z” representa la aceleración máxima en roca (como una fracción de la gravedad) asociada con la probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años para un período de retorno de 475 años.

Los coeficientes utilizados son “ F_a ” que corresponde al coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto que amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca dados por la siguiente tabla:

Tabla 4
Coeficiente F_a

Tipo de Perfil de Suelo	Zona Sísmica				
	I	II	III	IV	V
A	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.40	1.30	1.23	1.19	1.13
D	1.60	1.40	1.25	1.14	1.00
E	1.80	1.40	1.10	0.90	0.62

Nota. Tomado de (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

El coeficiente “ F_d ” amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño de roca. Los coeficientes se dan en la siguiente tabla:

Tabla 5
Coeficiente F_d

Tipo de Perfil de Suelo	Zona Sísmica				
	I	II	III	IV	V
A	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.36	1.28	1.15	1.08	1.00
D	1.62	1.45	1.28	1.15	1.00
E	2.10	1.75	1.65	1.52	1.36

Nota. Tomado de (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

Finalmente, el coeficiente “ F_s ” toma en cuenta la no linealidad de los suelos que se basa en la intensidad y contenido de la excitación sísmica que a causa de esto genera una reducción en el período de sitio. Los coeficientes se dan en la siguiente tabla:

Tabla 6
Coeficiente F_s

Tipo de Perfil de Suelo	Zona Sísmica				
	I	II	III	IV	V
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.06	1.17	1.28
D	1.02	1.06	1.19	1.32	1.44
E	1.50	1.60	1.80	1.94	2.09

Nota. Tomado de (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

Además, el coeficiente “ r ” depende de la región del Ecuador en donde está emplazado el proyecto, que puede ser en los siguientes caso:

Tabla 7
Coeficiente r

Región	r
Costa	1.20
Sierra y oriente	1.00

Nota. Tomado de (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

Además, una variable importante es el periodo “ T ”, que es el período fundamental o el período en el primer modo de la estructura en particular que se esta analizando, es importante este valor que este bien calculado para poder ubicar dentro del espectro específico en que lugar se encuentra la estructura que se va a analizar

2.16 CORTANTE BASAL DE DISEÑO NEC 24

En el estándar nuevo del NEC 24 se indica como realizar el calculo del cortante basal de diseño el cual se expone en la siguiente expresión:

$$V = \frac{I_e S_{aT}}{R} W$$

En donde existen más variables y factores que se deben tomar en cuenta para este cálculo que son los siguientes:

I_e que es básicamente el factor de importancia sísmica el cual se define en la tabla 1.3 de la normativa NEC-SE-CG 24 el cual permite 4 categorías de riesgo que se pueden utilizar que se basan en estructuras desde las más sencillas y que existen pocas personas hasta las más importantes que en caso de una eventualidad se van a dar más altas posibilidades de generar víctimas.

S_{aT} es el valor del espectro que está en fracción de la gravedad y se obtiene con el período fundamental de la estructura en particular que se esté analizando y verificando

R se define en la tabla 4.4 de la normativa NEC-SE-CG 24 que indica el factor de reducción de la respuesta sísmica que básicamente es un valor que depende del tipo de sistema constructivo que se este utilizando y son valores que vienen muy ligados y parecidos a la normativa ASCE 7 de estados unidos

W es el peso sísmico reactivo que se utiliza en la definición de la estructura que por lo genera es el 100% de la carga muerta que actúa directamente mas un porcentaje de la carga viva el cual depende del tipo de edificación que se utilice

2.17NORMATIVAS DE DISEÑO PARA AISLACIÓN SÍSMICA

Hoy en día existen estándares que identifican y rigen cómo debe diseñarse una estructura con aisladores de base, estableciendo qué parámetros, lineamientos y otras exigencias deben cumplirse para poder utilizar esta metodología. Además, estos estándares definen qué tipos de análisis son los adecuados para realizar este tipo de modelamientos. A continuación, se revisarán algunos de ellos, los cuales han sido utilizados para el desarrollo del presente trabajo.

ASCE 7-22: Como se habló de manera superficial con anterioridad, la normativa perteneciente al American Society of Civil Engineers, también conocida como la sociedad estadounidense de ingenieros civiles, cuenta de manera específica con un capítulo completo dedicado al diseño de estructuras aisladas sísmicamente. Este corresponde al Capítulo 17, titulado “Requisitos de diseño sísmico para estructuras sísmicamente aisladas”, en el cual se establecen diversos lineamientos de diseño.

Entre los puntos más importantes a considerar, la norma indica que el hecho de que una edificación cuente con un sistema de aislamiento de base no implica que deje de cumplir con los requisitos habituales de diseño estructural. Las estructuras aisladas deben igualmente satisfacer los criterios de derivas, regularidad estructural y, en caso de presentarse irregularidades, estas deben ser compensadas mediante la mayoración de los efectos torsionales, de manera que el sistema estructural se comporte de forma adecuada ante la acción sísmica.

Otro aspecto relevante es que la ASCE 7-22 especifica claramente los tipos de análisis permitidos para estructuras con sistemas de aislamiento de base. Entre ellos se encuentran el procedimiento de fuerzas laterales equivalentes, el análisis modal espectral y los análisis en el dominio del tiempo (tiempo–historia), los cuales pueden emplearse dependiendo de las características del sistema estructural y del nivel de detalle requerido en el análisis.

NEC-24: En la normativa ecuatoriana vigente del año 2015 no se identifica de manera clara el procedimiento a seguir para el diseño y análisis de estructuras con aislamiento de base. Sin embargo, en la normativa más reciente NEC-24, aunque aún no vigente legalmente, ya se incorpora de forma explícita el diseño de este tipo de estructuras en el Capítulo 9.

Esta normativa se adapta mejor a la realidad del país y puede considerarse como una adaptación de la ASCE 7, incorporando parámetros y variables propias del contexto sísmico y constructivo del Ecuador, lo que permite una aplicación más adecuada de los sistemas de aislamiento de base en el entorno nacional.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO

3.1 DESARROLLO

El programa se desarrolló en lenguaje Python, utilizando una interfaz en Visual Basic. Básicamente, para su elaboración se empleó el análisis matricial de estructuras, tomando como guía programas desarrollados en MATLAB, como los trabajados en el curso de Dinámica de Estructuras con el Ing. Carlos Celi. Adicionalmente, se elaboraron otros módulos propios, adaptándolos al lenguaje de programación que se está utilizando.

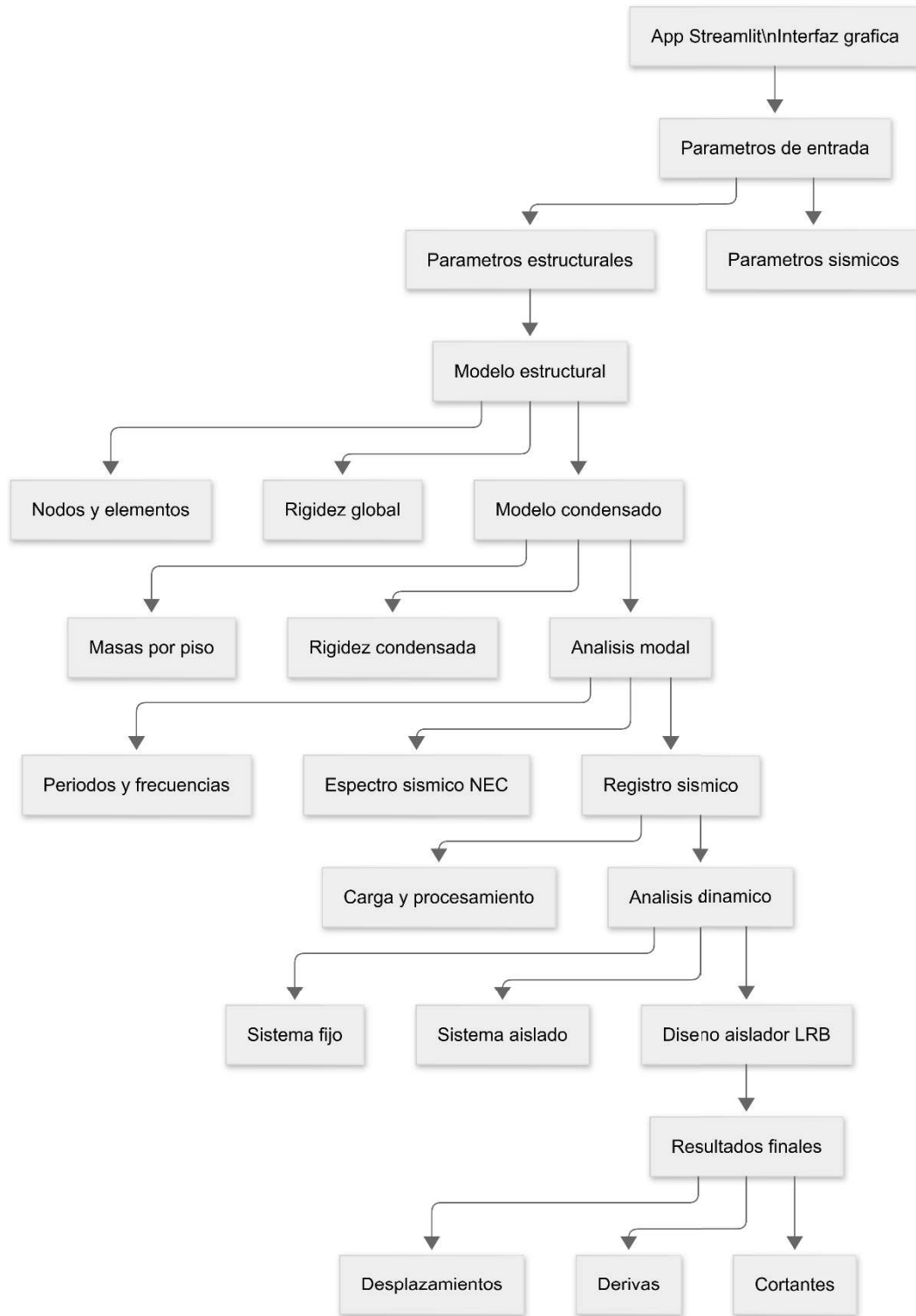
El alcance del programa es desarrollar una aplicación en la cual se pueda ingresar una estructura en 2D, a la que se le realice un análisis estático equivalente y un análisis modal espectral. Además, el programa permite el diseño de la misma estructura con aisladores de base y su respectivo análisis, con el objetivo de comparar las ventajas y desventajas entre una estructura fija y una estructura aislada.

La logística del programa es la que se indica en la Figura 5, donde básicamente se puede observar que el programa recibe parámetros de entrada para definir un modelo estructural utilizando el método matricial de análisis de estructuras. Es importante aclarar que se simplifica el modelo asumiendo que los elementos son axialmente indeformables, lo cual permite reducir los grados de libertad y, mediante un proceso de condensación, trabajar con un grado de libertad por nivel para realizar el análisis dinámico. A partir de este modelo se lleva a cabo un análisis modal, con el fin de obtener las propiedades dinámicas necesarias de la estructura.

Adicionalmente, se ingresa un archivo de registro sísmico, el cual es filtrado y corregido directamente en el programa para posteriormente realizar el análisis dinámico tanto para la estructura de base fija como para el mismo modelo estructural, pero con un sistema de aislamiento de base, el cual puede diseñarse de manera manual o automática, dependiendo de cada estructura en específico.

Finalmente, con todos los datos obtenidos, se generan los resultados finales y comparativos entre una estructura fija y una estructura aislada, evaluando parámetros como desplazamientos, derivas y fuerzas cortantes.

Figura 5
Diagrama de flujo de la aplicación



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

3.2 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

3.2.1 TIPO DE APLICACIÓN

La aplicación ISO-LATE utiliza una interfaz web desarrollada con Streamlit, una biblioteca de código abierto en Python que permite crear aplicaciones web de manera ágil e interactiva sin necesidad de emplear múltiples lenguajes de programación para el diseño. La principal ventaja es que trabaja directamente con Python, lo que facilita la integración con diversas librerías utilizadas en el ámbito de la ingeniería.

Una ventaja adicional de Streamlit es la posibilidad de alojar las aplicaciones en su propio servicio de hospedaje (Streamlit Community Cloud), el cual funciona sobre un entorno basado en Linux. Por este motivo, las librerías incorporadas en la aplicación deben ser compatibles con dicho sistema operativo. Un ejemplo es la librería OpenSees, que en determinadas configuraciones presenta compatibilidad limitada en entornos Linux, lo cual restringe su uso dentro del alojamiento web.

Otra consideración importante es el rendimiento. La aplicación alojada en la nube no ejecuta los cálculos con la misma velocidad que cuando se ejecuta en un entorno local, ya que depende de los recursos asignados por el servidor de alojamiento. Además, si múltiples usuarios utilizan simultáneamente la versión web, pueden presentarse retrasos en el procesamiento debido a que se trata de un servicio gratuito con recursos compartidos.

3.2.2 PÚBLICO OBJETIVO

El público objetivo se encuentra principalmente en el ámbito académico: profesores, estudiantes y personas interesadas en el análisis estructural y el análisis dinámico de estructuras.

La finalidad de ISO-LATE no es reemplazar programas profesionales de diseño estructural, sino servir como herramienta didáctica para comprender el comportamiento de sistemas aislados frente a sistemas fijos.

El objetivo es que el proceso sea más claro y comprensible, permitiendo que los resultados gráficos faciliten la interpretación del análisis, ya que en muchos casos la formulación matemática puede resultar compleja para quienes se encuentran en etapa de

aprendizaje. De esta manera, la aplicación busca ejemplificar de forma más sencilla los procedimientos que normalmente realizan programas profesionales de cálculo estructural.

3.2.3 *DISPOSITIVOS*

La aplicación ISO-LATE puede utilizarse en cualquier sistema que cuente con acceso a internet y un navegador web, como una computadora desde la cual se pueda ingresar al repositorio o al enlace de la aplicación alojada en la nube.

Figura 6

Página principal de ISO-LATE en interfaz de computador

The screenshot displays the ISO-LATE web application interface. At the top, there is a logo for ISO-LATE and language selection buttons for EN (English) and ES (Spanish). Below this is a section titled "General structural model parameters" with a subtitle "Define geometry, sections and material properties for the base model." The interface is divided into three main columns: "Geometry", "Section properties", and "Material and loads".

- Geometry:** Includes input fields for "Number of stories" (set to 2), "Number of bays" (set to 1), "Bay length [m]" (set to 5.00), "1st story height [m]" (set to 4.00), and "Typical story height [m]" (set to 3.00). A note indicates "Allowed ranges: stories 1-20 | bays 1-6".
- Section properties:** Features a "Basic mode (dimensions in cm)" section with "Column" and "Beam" properties. For columns, "Column width [cm]" and "Column depth [cm]" are both set to 50.00. For beams, "Beam width [cm]" is set to 30.00 and "Beam depth [cm]" is set to 50.00. There is also an "Advanced mode" toggle.
- Material and loads:** Includes "Elastic modulus E [Tf/m²]" (set to 2534563.54) and "Unit weight [Tf/m³]" (set to 2.4028). Under the "Loads" section, "Additional dead load [Tf/m]" is set to 0.00 and "Damping ζ (%)" is set to 5.00.

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

De igual manera, es posible acceder desde un teléfono móvil o una tableta. Sin embargo, debido a la naturaleza técnica de la aplicación y la visualización de gráficos, se recomienda su uso principalmente en computadoras para una mejor experiencia de análisis e interpretación de resultados.

3.2.4 *DESCRIPCIÓN DE PANTALLAS*

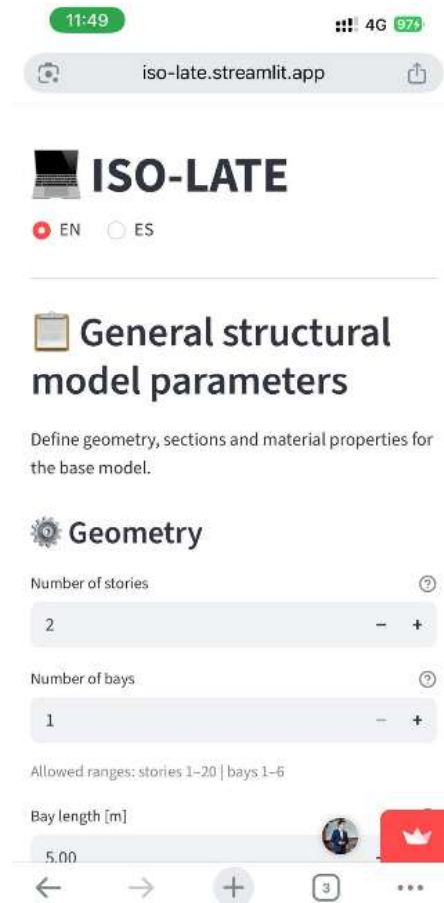
Las pantallas de uso de la aplicación ISO-LATE fueron diseñadas para ser intuitivas y de fácil comprensión. Se emplea un lenguaje técnico básico que cualquier estudiante o profesional del área de ingeniería puede interpretar con claridad.

Los parámetros disponibles para el análisis están deliberadamente limitados, con el fin de mantener la simplicidad del modelo y centrar la atención en los conceptos fundamentales que se desean comprender. Esto evita que el usuario se distraiga con configuraciones avanzadas que no forman parte del objetivo didáctico principal.

Asimismo, el programa incorpora al inicio una selección de idioma, permitiendo su uso tanto en español como en inglés, lo que amplía su accesibilidad. Cada parámetro incluye un ícono de ayuda (“?”), que funciona como asistente informativo, explicando el significado de cada variable, qué representa cada indicador y qué tipo de datos debe ingresar el usuario para que el análisis sea coherente y correcto.

Figura 7

Página principal de ISO-LATE en interfaz smartphone



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

3.3 DOCUMENTACIÓN

La documentación pertinente, así como archivos, códigos y elementos adicionales, están alojados en el repositorio de GitHub perteneciente al autor, disponible en el siguiente enlace: <https://github.com/dierafgue/ISO-LATE>. Estos archivos son de libre uso, pero están reservados para ser utilizados bajo la referencia de propiedad de elaboración de los códigos y todo lo que se incluya en el repositorio.

Así mismo, para aumentar el alcance de uso de la aplicación, se ha elaborado de la misma manera el manual de usuario, tanto en idioma inglés como en español, los cuales se adjuntan a continuación.

3.3.1 *MANUAL EN INGLES*



ISO-LATE

Interactive Tool for Structural Analysis – Fixed Base vs Seismic Isolation



ISO-LATE is an interactive engineering application developed to **simulate, analyze, and compare** the seismic response of two-dimensional structures with a fixed base and base isolation systems.

 [Open Live Application](#)

Table of Contents

- [General Description](#)
- [Key Features](#)
- [Engineering Scope](#)
- [Theoretical Background](#)
- [Application Structure](#)
- [User Manual](#)

General Description

ISO-LATE is an educational and engineering-oriented platform that enables users to:

- Model multi-story two-dimensional frame structures.
- Perform linear dynamic analysis.
- Compare the structural response between fixed-base and base-isolated systems.
- Visualize seismic response parameters in a clear and structured format.
- Understand the mechanical and dynamic effects of seismic isolation systems.

The tool is designed for academic, research, and comparative purposes, facilitating conceptual understanding of structural dynamic behavior.

Key Features

- Parametric definition of two-dimensional structures.
- Automatic generation of global and condensed mass and stiffness matrices.
- Matrix condensation to one horizontal degree of freedom per story.
- Modal analysis including natural frequencies and modal periods.
- Response Spectrum Analysis using modal superposition.
- Time-History Analysis using the Newmark- β numerical integration method.
- Linear-equivalent modeling of Lead Rubber Bearings and Natural Rubber Bearings.
- Direct comparison between fixed-base and base-isolated systems.
- Clean, scalable engineering plots and exportable tables.
- Excel export functionality for structural response results.

Engineering Scope

The application considers:

- Linear elastic structural behavior.
- Two-dimensional planar structural modeling.
- Shear-building idealization with one horizontal degree of freedom per story.
- Linear-equivalent modeling of seismic isolators.
- Educational and comparative analysis purposes.

ISO-LATE is not intended to replace professional nonlinear structural analysis software or to be used for final structural design.

Theoretical Background

The structural formulation is based on matrix structural dynamics and the governing equation of motion for multi-degree-of-freedom systems:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M r \ddot{u}_g$$

Where:

- M is the mass matrix.
- C is the damping matrix.
- K is the stiffness matrix.
- u is the relative displacement vector.
- $\dot{u}$ is the relative velocity vector.
- $\ddot{u}$ is the relative acceleration vector.
- $\ddot{u}_g$ is the ground acceleration record.
- r is the seismic influence vector.

The right-hand term represents inertial forces induced by ground acceleration acting on the structural mass.

ISO-LATE solves this equation using:

- Modal superposition for spectral analysis.
- Rayleigh damping formulation.
- Newmark- β time integration method for time-history analysis.

2. Structural Model Generation

The program automatically generates:

- Nodes.
- Structural elements.
- Degrees of freedom.
- Rigid diaphragm per story.
- Global mass and stiffness matrices.
- Condensed system matrices.

Stiffness validation includes the reference expression:

$$\frac{12EI}{L^3}$$

Definición geométrica y estructural del modelo

Genera la geometría del pórtico, ensambla K_{global} y calcula M_{cond} , T y K_{cond} (diaphragma rígido + condensación estática a 1 GDL lateral por piso).

Control del modelo

Modelo estructural generado correctamente.

Resumen del modelo

Nodos	Elementos	GDL
6	6	10

Generar modelo estructural

Matrices

> Ver matriz global de rigidez

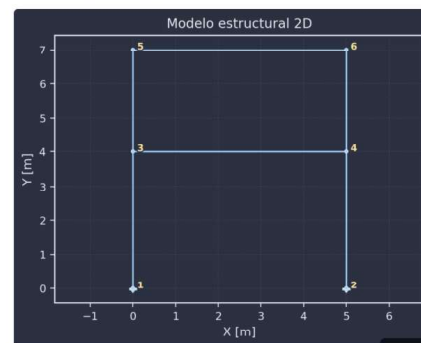
> Ver matriz de masas condensada

> Ver matriz de transformación

> Ver matriz de rigidez condensada

> Chequeo rápido

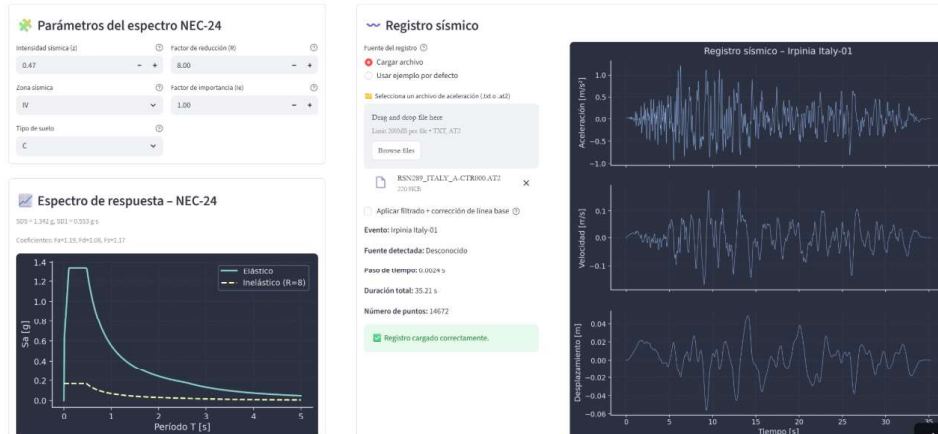
Modelo estructural 2D



3. NEC-24 Spectrum and Ground Motion

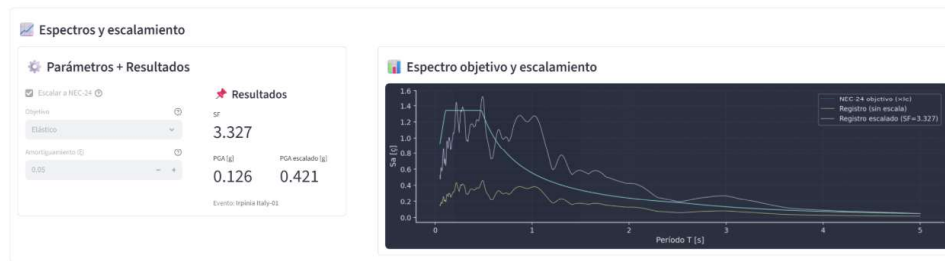
- Automatic generation of the NEC-24 design spectrum.
- Seismic record loading in TXT or AT2 format.
- Optional baseline correction and filtering.
- Compatibility with RENAC and PEER databases.

NEC-24 + Registro sísmico



4. Record Scaling

- Scaling of the seismic record to match the NEC-24 target spectrum.
- Elastic or inelastic spectrum selection.
- Damping ratio definition.



5. LRB Isolator Design

Two design methods are available:

- Automatic method based on ASCE 7 Chapter 17.
- Target period method (up to 5 seconds).

Outputs include:

- Effective stiffness.
- Design displacement.
- Energy dissipation.
- Bilinear hysteresis representation.

Rayleigh modal damping is set by default to $\zeta = 5\%$.

Isolator design completed successfully.

Modal data

Design mode

Design mode

Automatic

By target period

T_target [s]

2.50

Run isolator design

Quick checks

$\checkmark \beta < D_M$

$\checkmark K_e > K_p$

$\checkmark \beta$ reasonable

$\checkmark \beta$ (design) = β (cycle)

$\beta_{design} = 0.047$ $\beta_{cycle} = 0.047$

=== INDIVIDUAL LRB ISOLATOR PROPERTIES ===

Effective stiffness K_{eff} : 8.368 Tonf/m

Number of isolators N : 2

Total effective stiffness $N \cdot K_{eff}$: 16.736 Tonf/m

Viscous damping C_d : 0.187 Tonf·s/m

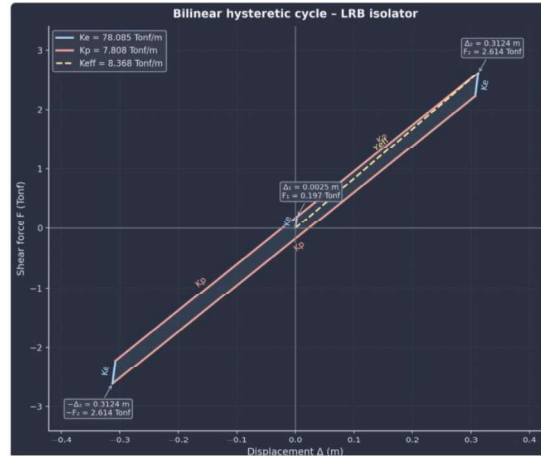
Initial elastic stiffness K_e : 78.085 Tonf/m

Post-yield stiffness K_p : 7.808 Tonf/m

Yield force F_y : 0.197 Tonf

Stiffness ratio $r = K_e/K_p$: 0.100

(Bilinear model - Units: Tonf and m)



6. Modal Analysis

Performed for:

- Fixed-base system.
- Base-isolated system.

Displays:

- Natural frequencies.
- Modal periods.
- Mode shapes.

Análisis modal – Base fija vs Base aislada

Matrices condensadas

Aquí se muestran matrices condensadas (1 GDL lateral por piso) usadas para el modal.

Matrices del modelo FIJO (K_{cond} , M_{cond})

Matrices del modelo AISLADO (K_{cond_ais} , M_{cond_ais})

Análisis modal

Las formas modales se normalizan para los gráficos; los períodos se obtienen de la solución por autovalores.

1 Frecuencias y períodos – FIJA

Modo	f [Hz]	T [s]
1	7.3686	0.1357
2	26.577	0.0376

1 Frecuencias y períodos – AISLADA

Modo	f [Hz]	T [s]
1	0.9958	1.6784
2	14.1064	0.0709
3	30.6482	0.0326

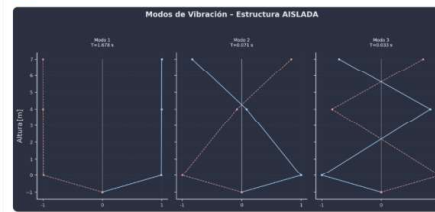
7. Normalized Mode Shapes

Graphical representation of normalized vibration modes.

2 Modos de vibración – FIJA



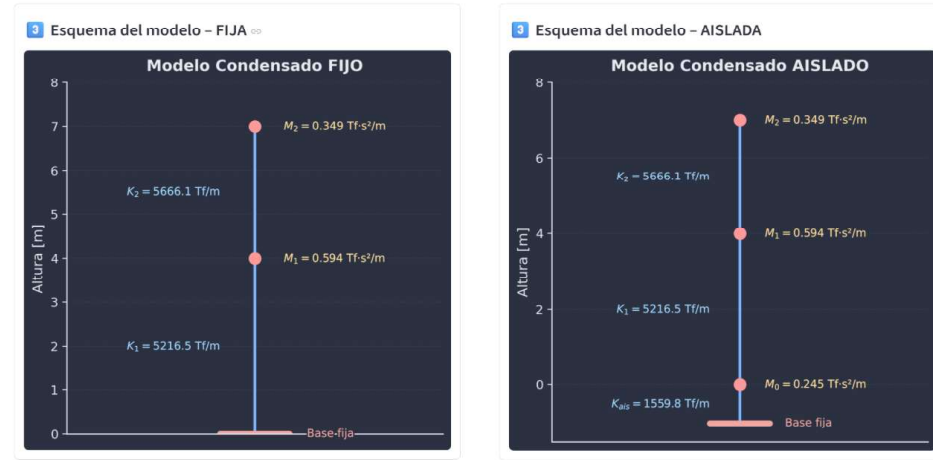
2 Modos de vibración – AISLADA



8. Inverted Pendulum Representation

Summary of:

- Story stiffness values.
- Story mass distribution.



9. Dynamic Analysis – Newmark- β

Time-history analysis is performed for both structural configurations.

The program:

- Computes Rayleigh damping.
- Determines α and β coefficients.
- Solves the equation of motion.
- Generates acceleration, velocity, and displacement time histories.

Results can be exported to Excel format.

⚙️ Análisis dinámico (Newmark- β) – FIJA lineal vs AISLADA lineal

Ambos casos usan Newmark- β lineal con amortiguamiento Rayleigh. El caso aislado emplea el modelo condensado con rigidez efectiva ya ensamblado en bloques previos.

Usando amortiguamiento modal $\zeta = 0.050$.

FIJA				AISLADA			
α	β	ζ	Duración	α	β	ζ	Duración
3.625e+00	4.689e-04	0.050	35.21	3.592e-01	1.083e-03	0.050	35.21
+/-	+/-		+/-	+/-	+/-		+/-
Descargar datos Excel							

FIJA – Respuestas por nivel		AISLADA – Respuestas por nivel	
> Nivel 1		> Aislador (Nivel 0)	
> Nivel 2		> Nivel 1	
		> Nivel 2	

10. Story Shears

Shear forces are obtained using:

- Response Spectrum Analysis with modal combination.
- Time-History Analysis including maximum, minimum, and absolute values.

Análisis modal espectral (RSA) [v](#)

Sa a usar en RSA [f](#)

Elástico [v](#)



11. Lateral Displacements

Computed using:

- Response Spectrum Analysis.
- Time-History Analysis.



12. Interstory Drifts

Two drift definitions are available:

Real drift:

$$\frac{|\Delta|}{h}$$

Code-based drift according to NEC-24:

$$\frac{C_d}{hI} |\Delta|$$

Derivas por entrepiso – Modal espectral (RSA) y Tiempo historia (THA)

salida de deriva

Deriva real (Δ/h) Deriva NEC24 ($C_d \Delta/h$)

Fuente: THA (envolvente max/min) (desde desplazamientos)

FIJA – THA (envolvente max/min)

Ver tabla de derivas (FIJA)



AISLADA – THA (envolvente max/min)

Ver tabla de derivas (AISLADA)



13. Final Comparison – Fixed Base vs Base Isolated

Overlay comparison of:

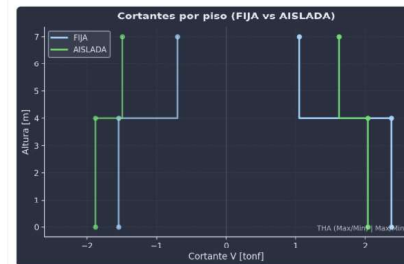
- Story shears.
- Lateral displacements.
- Interstory drifts.

Includes quantitative indicators of isolation efficiency.

Comparativo – FIJA vs AISLADA

Cortantes por piso (FIJA vs AISLADA)

Fuente cortantes: THA (Max/Min)



Desplazamientos laterales (FIJA vs AISLADA)

Fuente desplazamientos: THA (envolvente max/min)



3.3.2 MANUAL EN ESPAÑOL



Herramienta Interactiva para Análisis Estructural – Base Fija vs Aislamiento Sísmico



ISO-LATE es una aplicación de ingeniería interactiva desarrollada para simular, analizar y comparar la respuesta sísmica de estructuras bidimensionales con base fija y sistemas con aislamiento sísmico en la base.

[Acceder a la Aplicación en Línea](#)

Tabla de Contenidos

- [Descripción General](#)
 - [Características Principales](#)
 - [Alcance de Ingeniería](#)
 - [Fundamento Teórico](#)
 - [Estructura de la Aplicación](#)
 - [Manual de Usuario](#)
-

Descripción General

ISO-LATE es una plataforma educativa y orientada a la ingeniería estructural que permite:

- Modelar estructuras aporticadas bidimensionales de múltiples niveles.
- Realizar análisis dinámico lineal.
- Comparar la respuesta estructural entre sistemas de base fija y sistemas con aislamiento sísmico.
- Visualizar parámetros de respuesta sísmica de manera clara, ordenada y técnica.
- Comprender el comportamiento mecánico y dinámico de los sistemas de aislamiento sísmico.

La herramienta está diseñada con fines académicos, investigativos y comparativos, facilitando la comprensión conceptual del comportamiento dinámico estructural.

Características Principales

- Definición paramétrica de estructuras bidimensionales.
 - Generación automática de matrices globales y condensadas de masa y rigidez.
 - Condensación matricial a un grado de libertad horizontal por nivel.
 - Análisis modal con cálculo de frecuencias naturales y períodos modales.
 - Análisis espectral mediante superposición modal.
 - Análisis tiempo-historia utilizando el método de integración Newmark- β .
 - Modelado equivalente lineal de aisladores sísmicos tipo LRB (Lead Rubber Bearing) y NRB (Natural Rubber Bearing).
 - Comparación directa entre sistema de base fija y sistema con aislamiento sísmico.
 - Visualización gráfica técnica limpia y escalable.
 - Exportación de resultados en formato Excel.
-

Alcance de Ingeniería

La aplicación considera:

- Comportamiento estructural elástico lineal.
- Modelado estructural bidimensional.
- Idealización tipo shear-building con un grado de libertad horizontal por piso.
- Modelado equivalente lineal de aisladores sísmicos.
- Uso educativo, académico y comparativo.

ISO-LATE no está diseñado para reemplazar software profesional de análisis estructural no lineal avanzado ni para diseño estructural definitivo.

Fundamento Teórico

La formulación estructural se basa en la dinámica matricial de estructuras y en la ecuación de movimiento para sistemas de múltiples grados de libertad:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M r \ddot{u}_g$$

Donde:

- $\mathbf{M}$ es la matriz de masa.
- $\mathbf{C}$ es la matriz de amortiguamiento.
- $\mathbf{K}$ es la matriz de rigidez.
- $\mathbf{u}$ es el vector de desplazamientos relativos respecto al terreno.
- $\dot{\mathbf{u}}$ es el vector de velocidades relativas.
- $\ddot{\mathbf{u}}$ es el vector de aceleraciones relativas.
- $\ddot{\mathbf{u}}_g$ es la aceleración del terreno correspondiente al registro sísmico.
- $\mathbf{r}$ es el vector de influencia sísmica.

El término del lado derecho representa las fuerzas inerciales inducidas por la aceleración del terreno actuando sobre la masa estructural.

ISO-LATE resuelve esta ecuación utilizando:

- Superposición modal para el análisis espectral.
- Formulación de amortiguamiento de Rayleigh.
- Integración numérica mediante el método Newmark- β para el análisis tiempo-historia.

Referencias Técnicas

- Chopra, A.K. – *Dynamics of Structures*
- ASCE 7
- NEC24

Estructura de la Aplicación

```
ISO-LATE/
|
|-- app.py
|-- funciones_usuario.py
|-- requirements.txt
|-- .streamlit/
|   |-- config.toml
|-- assets/
|   |-- logo.png
|-- data/
|-- README.md
```

Manual de Usuario

ISO-LATE está organizado en bloques secuenciales que guían al usuario a través del proceso completo de modelado y análisis estructural.

Cada etapa construye progresivamente la comparación entre un sistema de base fija y un sistema con aislamiento sísmico.

1. Definición Inicial del Modelo

El usuario define:

- Número de niveles y vanos.
- Altura de entrepiso y longitud de vano.
- Geometría de las secciones o propiedades mecánicas.
- Propiedades del material.
- Parámetros de carga.

Si se activa el Modo Avanzado, el usuario ingresa directamente:

- Área transversal.
- Momento de inercia.

General structural model parameters

Define geometry, sections and material properties for the base model.

Geometry

Number of stories: 2
Number of bays: 1

Allowed ranges: stories 1-20 / bays 1-6

Bay length [m]: 5.00
1st story height [m]: 4.00
Typical story height [m]: 3.00

Section properties

Advanced mode

Basic mode (dimensions in cm)

Column

Column width [cm]: 50.00
Column depth [cm]: 50.00

Beam

Beam width [cm]: 30.00
Beam depth [cm]: 50.00

Material and loads

Elastic modulus E [Tf/m²]: 2534563.54
Unit weight [Tf/m³]: 2.4028

Loads

Additional dead load [Tf/m]: 0.00
Damping ζ (%): 5.00

2. Generación del Modelo Estructural

El programa genera automáticamente:

- Nodos.
- Elementos estructurales.
- Grados de libertad.
- Diafragma rígido por piso.
- Matrices globales de masa y rigidez.
- Matrices condensadas del sistema.

La validación de rigidez incluye la expresión de referencia:

$$\frac{12EI}{L^3}$$

Definición geométrica y estructural del modelo

Genera la geometría del pórtico, ensambla K global y calcula M_{cond}, T y K_{cond} (diafragma rígido + condensación estática a 1 GDL lateral por piso).

Control del modelo

Modelo estructural generado correctamente.

Resumen del modelo

Nodos	Elementos	GDL
6	6	10

Generar modelo estructural

Matrices

> Ver matriz global de rigidez

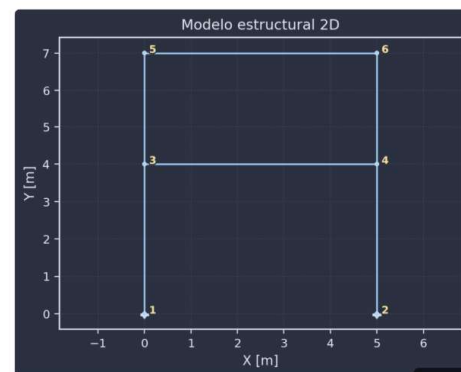
> Ver matriz de masas condensada

> Ver matriz de transformación

> Ver matriz de rigidez condensada

> Chequeo rápido

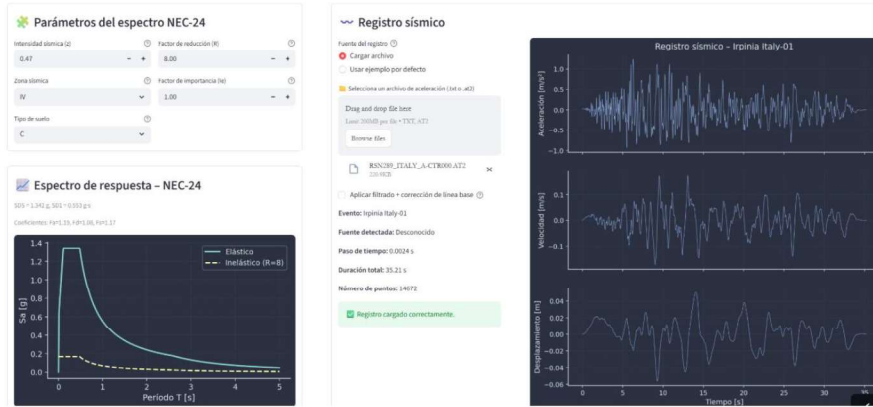
Modelo estructural 2D



3. Espectro NEC-24 y Registro Sísmico

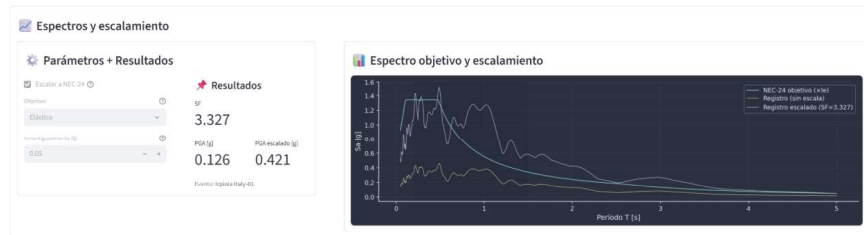
- Generación automática del espectro de diseño conforme a la NEC-24.
- Carga de registros sísmicos en formato TXT o AT2.
- Corrección opcional de línea base y filtrado.
- Compatibilidad con bases de datos RENAC y PEER.

NEC-24 + Registro sísmico



4. Escalamiento del Registro

- Escalamiento del registro sísmico para ajustarlo al espectro objetivo NEC-24.
- Selección de espectro elástico o inelástico.
- Definición del nivel de amortiguamiento.



5. Diseño del Aislador LRB

Se disponen dos métodos de diseño:

- Método automático basado en el Capítulo 17 de ASCE 7.
- Método por período objetivo (hasta 5 segundos).

Se obtienen:

- Rigidez efectiva.
- Desplazamiento de diseño.
- Energía disipada.
- Representación bilineal de histéresis.



6. Análisis Modal

Se ejecuta para:

- Sistema de base fija.
- Sistema con aislamiento sísmico.

Se muestran:

- Frecuencias naturales.
- Períodos modales.
- Formas modales.

🔄 Análisis modal – Base fija vs Base aislada

📊 Matrices condensadas

Aquí se muestran matrices condensadas (1. GDL lateral por piso) usadas para el modal.

➤ ■ Matrices del modelo FIJO (K_cond, M_cond)

➤ ■ Matrices del modelo AISLADO (K_cond_ais, M_cond_ais)

📊 Análisis modal

Las formas modales se normalizan para los gráficos; los periodos se obtienen de la solución por autovalores.

1 Frecuencias y periodos – FIJA

Modo	f [Hz]	T [s]
1	7.3686	0.1357
2	26.577	0.0376

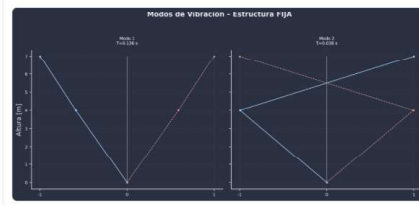
1 Frecuencias y periodos – AISLADA

Modo	f [Hz]	T [s]
1	0.9958	1.6784
2	14.1064	0.0709
3	30.6482	0.0326

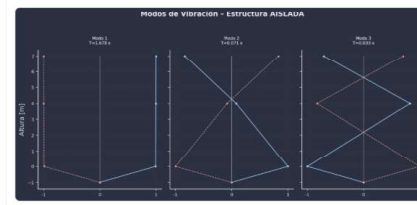
7. Formas Modales Normalizadas

Representación gráfica de los modos de vibración normalizados.

2 Modos de vibración – FIJA



2 Modos de vibración – AISLADA

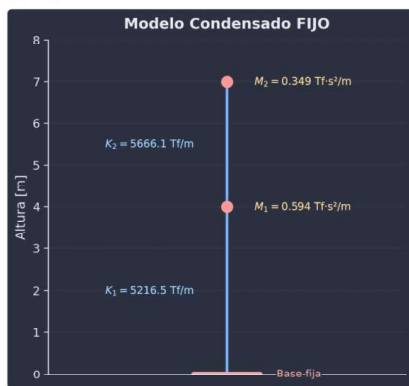


8. Representación Tipo Péndulo Invertido

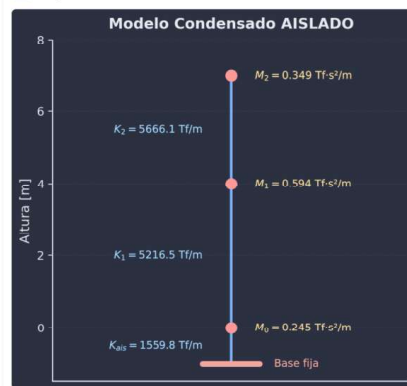
Resumen de:

- Rigideces por piso.
- Distribución de masas por nivel.

3 Esquema del modelo – FIJA



3 Esquema del modelo – AISLADA



9. Análisis Dinámico – Newmark-β

Se realiza el análisis tiempo-historia para ambas configuraciones estructurales.

El programa:

- Calcula el amortiguamiento de Rayleigh.
- Determina los coeficientes α y β .
- Resuelve la ecuación de movimiento.
- Genera historias de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Los resultados pueden exportarse en formato Excel.

Análisis dinámico (Newmark-β) – FIJA lineal vs AISLADA lineal

Ambos casos usan Newmark-β lineal con amortiguamiento Rayleigh. El caso aislado emplea el modelo condensado con rigidez efectiva ya ensamblado en bloques previos.

Usando amortiguamiento modal $\zeta = 0.050$.

FIJA

α	β	ζ	Duración
3.625e+00	4.689e-04	0.050	35.21
↑ 1%	↑ s		↑ s

Descargar datos Excel

FIJA – Respuestas por nivel

Nivel 1

Nivel 2

AISLADA

α	β	ζ	Duración
3.592e-01	1.083e-03	0.050	35.21
↑ 1%	↑ s		↑ s

Descargar datos Excel

AISLADA – Respuestas por nivel

Aislador (Nivel 0)

Nivel 1

Nivel 2

10. Cortantes por Piso

Los cortantes se obtienen mediante:

- Análisis espectral con combinación modal.
- Análisis tiempo-historia considerando valores máximos, mínimos y absolutos.



11. Desplazamientos Laterales

Se calculan mediante:

- Análisis espectral.
- Análisis tiempo-historia.

Análisis modal espectral (RSA)

Sa a usar en RSA

Inelástico (R)



12. Derivas de Entrepiso

Se presentan dos definiciones:

Deriva real:

$$\frac{|\Delta|}{h}$$

Deriva según la NEC-24:

$$\frac{C_d |\Delta|}{hl}$$



13. Comparativo Final – Base Fija vs Base Aislada

Se superponen:

- Cortantes por piso.
- Desplazamientos laterales.
- Derivas de entrepiso.

Incluye indicadores cuantitativos de eficiencia del aislamiento sísmico.

13. Comparativo Final – Base Fija vs Base Aislada

Se superponen:

- Cortantes por piso.
- Desplazamientos laterales.
- Derivas de entrepiso.

Incluye indicadores cuantitativos de eficiencia del aislamiento sísmico.

📌 Comparativo – FIJA vs AISLADA



3.4 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

El lenguaje utilizado en el desarrollo del programa es Python en su versión 3.12, con varias librerías útiles para poder desarrollar los cálculos necesarios. Algunas de las librerías más importantes son:

numpy: Es una librería utilizada con el lenguaje de Python la cual tiene su enfoque principal en el cálculo numérico y el análisis de datos. Maneja esta gran cantidad de datos a través de elementos conocidos como arrays, que pueden tener n dimensiones.

Además, dentro de esta librería existen varias funciones y comandos que ayudan a manipular de manera más eficiente y ordenada todos estos datos. Su ventaja principal frente a otros métodos es que el procesamiento de datos es muchísimo más rápido y por tal motivo es eficiente y maneja mejor cálculos que puedan utilizar esta librería.

Básicamente gestiona y realiza distintas operaciones matemáticas con datos. (Sánchez, 2022)

pandas: Librería de código abierto utilizada para la manipulación y análisis de datos. En el presente trabajo se utiliza mayoritariamente para organizar tablas de datos de

los valores y matrices que se utilizan en el análisis estructural del programa ISO-LATE. (Attal Mike, 2026)

streamlit: Es una librería de código abierto que utiliza Python. Está enfocada en el diseño de aplicaciones web interactivas con distintos controles, visualizadores y widgets que ejemplifiquen proyectos que utilicen análisis de datos a través de un aprendizaje más automático y simplificado.

En el presente proyecto se utiliza como base para la interfaz gráfica e interactiva de toda la aplicación ISO-LATE. (Merced Alex, 2024)

matplotlib: Es una librería de acceso libre que se utiliza para visualizar datos de manera animada, estática o interactiva en Python de manera amigable y sencilla. (Caswell Thomas, 2025)

En la aplicación ISO-LATE se utiliza esta librería para generar todos los gráficos, desde el modelo en 2D de la estructura hasta los cortantes, derivas, desplazamientos, respuestas y todos los detalles que tengan que ver con estos resultados.

3.5 LÓGICA DEL PROGRAMA

La estructura general del repositorio con sus carpetas tiene la siguiente configuración:

Figura 8

Estructura aplicación ISO-LATE

```
ISO-LATE/
├── .devcontainer/
│   └── devcontainer.json
├── .streamlit/
│   └── config.toml
├── assets/
├── EJEMPLO.txt
├── README.md
├── app.py
├── funciones_usuario.py
├── requirements.txt
└── runtime.txt
```

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

La aplicación ISO-LATE se encuentra alojada en un repositorio de GitHub, implementando el lenguaje de Python en la interfaz de Streamlit, el cual facilita de manera rápida la creación de interfaces interactivas para aplicaciones científicas y de ingeniería como lo es esta aplicación.

En el repositorio se encuentra alojada la carpeta denominada ISO-LATE, la cual contiene todos los archivos necesarios para ejecutar, configurar y procesar el programa, así como la documentación necesaria para identificar y entender el uso de la aplicación.

A continuación, se explica de manera breve cada componente dentro de la estructura del repositorio.

ISO-LATE/: Esta es la carpeta principal o directorio raíz de toda la estructura de la aplicación. Dentro de esta se encuentran todas las carpetas, subcarpetas y archivos que conforman la aplicación.

.devcontainer/: Esta carpeta tiene la configuración necesaria para el entorno reproducible que se va a utilizar. En este caso tiene las configuraciones que crea Streamlit para el entorno de programación, como son la versión de Python, librerías necesarias y herramientas utilizadas. Básicamente ayuda a que la aplicación pueda correr en el sistema donde se ejecute, garantizando la correcta compilación del mismo.

.streamlit/: Es la carpeta de configuración de la aplicación, la cual contiene el archivo config.toml, el cual configura las apariencias visuales de Streamlit, el comportamiento y organización de la interfaz, además de otros ajustes para que la aplicación corra de manera correcta.

Este archivo se puede modificar para el compilador en línea <https://share.streamlit.io/> sin afectar la lógica de la aplicación como tal.

assets/: Esta carpeta aloja recursos para el manual de usuario, como son las imágenes utilizadas dentro del archivo README.md, con las cuales se ordena y ejemplifica de manera correcta el repositorio.

app.py: Archivo principal de la aplicación. Es el archivo base donde se organiza, a través de 11 bloques, cada uno de los puntos que conforman en orden la aplicación.

Si bien esta parte de la aplicación tiene funciones, se enfoca más en la interfaz gráfica, como es la organización de ventanas, botones, variables de ingreso y salida, y botones de descarga de datos. Aquí se encuentran los bloques de ingreso de datos para la aplicación, generación del modelado estructural, desplegables de matrices para los sistemas estructurales, visualización de resultados y comparativos e imágenes de resultados.

funciones_usuario.py: Este archivo contiene funciones que dan la lógica y los motores de cálculo para la aplicación. Trabaja en conjunto con el archivo `app.py`, donde intercambian información de lógicas numéricas y procesamiento de datos para llevarlo a la interfaz, en donde se exponen los resultados de todos estos cálculos.

README.md: Este archivo contiene la documentación, índice y manuales en idioma inglés y español de la aplicación. Está escrito en formato Markdown de GitHub.

EJEMPLO.txt: Es un archivo de registro sísmico del evento sísmico de Pedernales del 2016, tomado de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC). Se utiliza como registro sísmico en la opción de carga de registros cuando el usuario escoge la opción de registro de ejemplo y no carga uno propio.

requirements.txt: Este archivo en formato texto indica qué librerías y bibliotecas, y en qué versión, debe utilizar el compilador (en este caso Streamlit) para que el programa corra y no tenga errores de bibliotecas faltantes.

runtime.txt: Este archivo de texto indica al compilador la versión exacta de Python que debe usar. Aquí se indica la versión 3.12, que es en la que fue desarrollado el programa.

3.6 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO IMPLEMENTADO

El programa ISO-LATE utiliza el modelo matemático de dos dimensiones para el análisis simplificado del comportamiento estructural considerando tanto un sistema fijo como un sistema con aislamiento de base.

El programa utiliza métodos numéricos utilizados comúnmente en la ingeniería asistida por computador, así como otros conceptos de la dinámica estructural. El funcionamiento de la aplicación inicia con la definición de parámetros geométricos,

mecánicos y de cargas para generar el modelo matemático estructural de los cuales se obtienen sus matrices de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema.

Posteriormente, el programa realiza un proceso de análisis modal y analiza la respuesta sísmica mediante el análisis modal espectral y el análisis dinámico tiempo historia. Además, para el caso del aislamientos se incorpora n modelo bilineal con comportamiento no lineal para ver la histéresis de estos elementos.

Finalmente, a partir de estos análisis obtenidos la aplicación calcula parámetros estructurales de interés como los cortantes de piso, desplazamientos estructurales y derivas de piso, a continuación, se explica de manera detallada todos estos procesos y cómo funcionan dentro de ISO-LATE.

3.6.1 PARÁMETROS INICIALES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

El usuario al iniciar ISO-LATE, realiza el ingreso de parámetros geométricos, mecánicos y de cargas que caracterizan al modelo estructural, a través de estos parámetros inicia la generación de los análisis que generan el flujo de la aplicación.

El modelo matemático analizado corresponde a un pórtico plano de dos dimensiones, compuesto por elementos verticales (columnas) y elementos horizontales (vigas) con una configuración regular.

Para la definición de estos elementos el usuario define el número de pisos del pórtico, el numero de vanos que va a tener el pórtico, la longitud regular que van a tener cada uno de los vanos utilizados, la altura del primer piso que normalmente suele ser diferente a las alturas de los demás pisos y la altura de los pisos restantes que se repite en los demás pisos. Con todos estos valores se genera el sistema estructural que se va a analizar.

La altura total para el sistema de análisis se utiliza la siguiente expresión:

$$H = h_{base} + (n - 1)h_{piso}$$

H : Altura total del modelo estructural

h_{base} : Altura del primer piso del modelo estructural

h_{piso} : Altura típica de los entrepiso del modelo estructural

n : Número de pisos ingresados por el usuario

Adicionalmente el usuario ingresa algunas propiedades mecánicas básicas a utilizarse dentro del modelo de análisis que se utiliza dentro la aplicación entre las que están el módulo de elasticidad del material utilizado, el peso específico del material utilizado con los cuales se determinan la rigidez y las masas del sistema respectivamente

Las propiedades geométricas el usuario las define de dos maneras, en el modo básico a través de las medidas de las secciones de los elementos vigas y columnas mediante su base y su altura a partir de las cuales la aplicación calcula el área y la inercia de los mismo de la siguiente manera:

$$A = b \times h$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12}$$

Estas propiedades corresponden al área “ A ” comúnmente representada en m^2 por consistencia de unidades y el valor del momento de inercia “ I ” comúnmente representado en m^4 .

En cambio, si el usuario quiere utilizar el método avanzado puede ingresar de manera directa los valores de área e inercia de los elementos estructurales que se va a utilizar, el fin de utilizar este método es para utilizar propiedades ya definidas o materiales y secciones que no tienen configuraciones cuadradas o rectangulares como comúnmente sucede con elementos de acero estructural.

Finalmente, la aplicación recibe información de carga gravitacional con distribución uniforme a lo largo de los elementos horizontales y un valor de coeficiente de amortiguamiento estructural inicial para el sistema estructural analizado.

3.6.2 GENERACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL Y CONDENSACIÓN DEL SISTEMA

Con todas las variables que definen el sistema estructural analizado anteriormente, la aplicación de ISO-LATE genera un modelo matemático compuesto por nodos y a partir de estos nodos elementos estructurales que conforman el pórtico bidimensional.

3.6.2.1. Generación geométrica del pórtico

Con los datos ingresados del usuario tanto con el numero de pisos como de vanos, así como las dimensiones de los mismos el programa genera una malla regular para ubicar los nodos en cada una de sus coordenadas, así como un identificador numérico para cada uno de los nodos de la siguiente manera

- $n + 1$: Número de pisos mas un nivel de base conforman los niveles verticales.
- $m + 1$: Número de nodos por nivel mas uno para el total de ejes verticales.

3.6.2.2. Definición de conectividades y elementos

La aplicación de ISO-LATE genera únicamente dos tipo de elementos, para elementos tipo columna conecta únicamente nodos que estén ubicados entre un nivel i a un nivel $i + 1$ y los elementos tipo viga se genera únicamente en nodos que estén en el mismo nivel a excepción de los nodos que están en el nivel 0

3.6.2.3. Idealización del elemento estructural viga-columna plano

Cada elemento que conforma un pórtico sea una viga o sea un columna esta modelado como un elemento de pórtico plano conformado por tres grados de libertad por cada nodo que conforma el elemento: desplazamiento horizontal, desplazamiento vertical y rotación.

$$[u_1 \quad v_1 \quad \theta_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad \theta_2]$$

Por lo tanto, cada elemento tendría un total de seis grados e libertad y por ende su comportamiento se representa por medio de una matriz de rigidez de una dimensión de 6x6.

Esta matriz que se utiliza considera que las secciones planas permanecen planas después de haberse deformado, lo cual significa que consideran que las deformaciones

por el corte se ignoran. Por este motivo el comportamiento de estos elementos está definido únicamente por deformaciones axiales y de flexión. Justamente en esta matriz interviene propiedades como el área de cada elemento y su momento de inercia, la longitud del elemento analizado y el módulo de elasticidad del material que compone el elemento analizado.

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} AE/L & 0 & 0 & -AE/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -AE/L & 0 & 0 & AE/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix}$$

Básicamente esta matriz representa la relación de deformaciones que se generan a través de la relación de aplicar desplazamientos unitarios en cada uno de los elementos que conforman el elemento de pórtico plano

3.6.2.4. Transformación de coordenadas locales a globales

Debido a que normalmente no todos los elementos de un pórtico plano se orientan en las mismas direcciones si no en distintas direcciones para conformar el sistema, la matriz de rigidez local de cada uno de los elementos calculado debe ser transformada a un sistema global antes de poder generar la matriz de rigidez del total del sistema, para esto se utiliza una matriz de transformación geométrica definida en función de la orientación geométrica del elemento que se está analizando:

$$T^{(e)} = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En donde $c = \cos \theta$ y $s = \sin \theta$ se utilizan para la transformación de un elemento de coordenadas locales para llevarlo a coordenadas globales con la siguiente expresión:

$$k^{(e)}_{global} = (T^{(e)})^T \times k^{(e)}_{local} \times T^{(e)}$$

$$[6 \times 6] = [6 \times 6] \times [6 \times 6] \times [6 \times 6]$$

3.6.2.5. Definición del mapa de grados de libertad

ISO-LATE genera un mapa de grados de libertad en la cual se utiliza la hipótesis de que existe un diafragma rígido lateral por cada piso del sistema estructural, es decir que todos los nodos ubicados en un mismo nivel comparten el mismo grado de libertad horizontal lo cual da el siguiente criterio:

- v_x : un grado de libertad horizontal compartido por nodos del mismo piso
- v_y : un grado de libertad vertical por cada nodo
- θ : un grado de libertad de giro por cada nodo

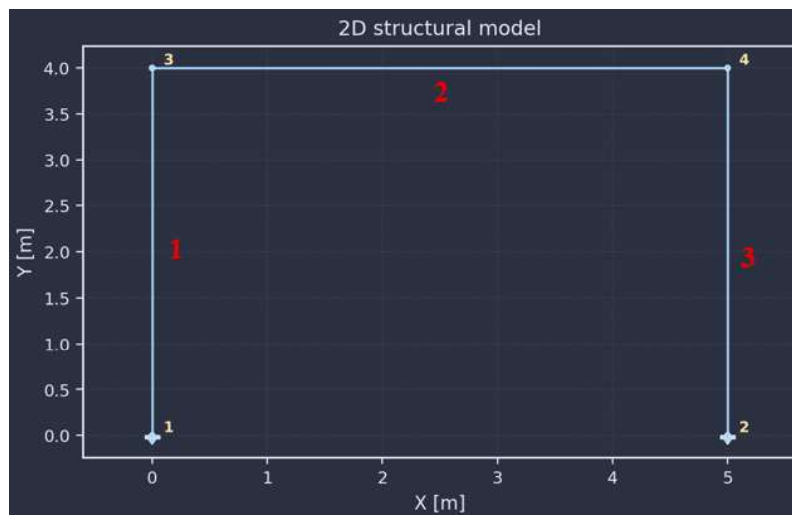
Adicionalmente todos y cada uno de los nodos que se ubican en el nivel 0 del sentido vertical son considerados empotrados por lo que todos los grados de libertad se anulan y tienen un valor de 0, de esta manera se reducen de inicio los grados de libertad totales de la estructura.

3.6.2.6. Ensamblaje de la matriz de rigidez global

Con la matriz de rigidez en coordenadas globales de cada uno de los elementos se puede armar de manera adecuada la matriz global de toda la estructura, para realizar este proceso se debe ubicar cada matriz de cada elemento dentro de una posición específica de la matriz total de la estructura de acuerdo a la numeración de los nodos y los grados de libertad de la estructura.

Figura 9

Matriz de colocación



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Para lograr esto se utiliza la matriz de colocación o vector de colocación el cual indica las posiciones que debe ubicar cada sub-elemento de la matriz de rigidez de cada elemento para conformar y aportar a la matriz global de toda la estructura.

Para ejemplificar esto vamos a usar la **Figura 9** en la cual se indica el elemento 1 el cual es un elemento vertical con un empotramiento en base el cual en el nodo 1 no tiene ningún grado de libertad y en el nodo 3 los grados de libertad 1 en u_x , 2 en u_y y 3 en el giro por lo cual la matriz de rigidez de este elemento con su vector de colocación seria de la siguiente forma:

$$k_{e(1)} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Con esta matriz de mapeo se puede generar la matriz de rigidez global de toda la estructura la cual en el ejemplo realizado tendría un tamaño de 6x6 en la cual se ubicaría cada uno de las rigideces que componen esta matriz global:

$$K_{global} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix}$$

De esta manera queda conformada la matriz de rigidez de todo el sistema estructural de tal manera que se puede iniciar cualquier análisis correspondiente con la misma. Es importante tener siempre en cuenta que si la estructura total tiene un total de N grados de libertad, la matriz de rigidez global de toda la estructura tendrá una dimensión de $N \times N$, con esto se suma los aportes de todos los elementos que se conectan a un mismo nodo formando la matriz total de la estructura, ISO-LATE genera un mapeo de nodos como comúnmente se lo hace para ubicar cada valor perteneciente a cada elemento en la matriz global e ir sumando las contribuciones en cada posición de la matriz global que hace falta

3.6.2.7. Participación del sistema y condensación estática

Con el fin de reducir los grados de libertad y realizar un modelo con una rigidez equivalente asociada únicamente a los grados de libertad laterales de cada piso se realiza una condensación estática a la matriz de rigidez global del modelo matemático. Para poder realizar este proceso se dividen los grados de libertad de todo el sistema de principales que son lo que nos interesan de desplazamientos laterales de cada piso y los secundarios correspondientes a desplazamientos verticales y giros en cada nodo

Una vez se han definido la cantidad de estos grados de libertad se subdivide la matriz global de rigidez de todo el sistema en 4 submatrices las cuales son:

- K_{pp} = Submatriz de rigidez asociada a los grados de libertad principales
- K_{ss} = Submatriz de rigidez asociada a los grados de libertad secundarios
- K_{ps} = Submatriz de acoplamiento entre gdl principales y secundarios

Como se tiene armada la matriz de rigidez global de tal forma que se ubican los grados de libertad principales al inicio de la misma se tiene siempre una matriz de la siguiente distribución

$$K_{global} = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{ps} \\ K_{sp} & K_{ss} \end{bmatrix}$$

Con la matriz de rigidez debidamente subdividida en las 4 matrices necesarias se realiza la condensación estática con la siguiente expresión

$$K_{cond} = K_{pp} - K_{ps}K_{ss}^{-1}K_{sp}$$

Esta matriz condensada de rigidez representa la rigidez lateral equivalente del edificio la cual esta expresada en un único grado de libertad por piso del modelo estructural, de tal forma que si la estructura tiene n numero de pisos, la matriz condensada tendrá una dimensión de $n \times n$.

Esta matriz es uno de los puntos más importantes dentro del análisis de ISO-LATE puesto que de esta matriz se parte hacia el análisis modal total de la estructura y si esta fallase todo el programa no tendría sentido matemático.

3.6.2.8. Verificación aproximada de la rigidez lateral por piso

Con la obtención de la matriz de rigidez condensada K_{cond} , cuyo tamaño corresponde al número de pisos de la edificación, se puede obtener la rigidez lateral equivalente de cada nivel o cada piso a partir de los términos que conforman esta matriz

La matriz de rigidez condensada representa el comportamiento lateral del edificio con un único grado de libertad horizontal por nivel de piso, sin embargo tomando en consideración que la condensación se realizó a partir de un modelo de pórtico completo con algunas hipótesis anteriormente mencionadas, la matriz de tamaño $n \times n$ es cuadrada en base al número de pisos del sistema analizado y tiene términos por fuera de la diagonal principal los cuales son la representación de los acoplamientos de los pisos y elementos que conforman el sistema.

A pesar de la presencia de estos elementos adicionales se puede utilizar los términos que conforman esta matriz para obtener los términos de rigidez lateral equivalente para cada uno de los pisos de la estructura. Para el primer piso de la estructura se obtiene la rigidez equivalente de la siguiente manera:

$$K_{modelo,1} = K_{11} + K_{12}$$

Donde el valor de K_{12} es negativo y representa el acoplamiento entre el primer y el segundo nivel. Además, para los pisos restantes se obtiene la rigidez lateral equivalente de la misma manera

$$K_{modelo,2} = -K_{12}$$

$$K_{modelo,3} = -K_{23}$$

$$K_{modelo,4} = -K_{34}$$

$$K_{modelo,i} = -K_{i-1,i}$$

Se usa este valor de la matriz de rigidez condensada debido a que este valor de la matriz representa directamente la interacción lateral equivalente incluso si tiene mas acoplamientos porque representa directamente la interacción entre dos pisos que están consecutivos. Con todos estos valores de rigidez lateral equivalente de cada piso es necesario realizar una comprobación con el fin de verificar si estos valores tienen o no

tiene sentido, existe una estimación aproximada que se calcula la rigidez de piso mediante la siguiente expresión:

$$k_{aprox} = n_{col} \frac{12EI}{h^3}$$

En donde:

n_{col} : es el número de columnas del piso que se está analizando

E : es el módulo de elasticidad utilizado del material definido

I : es el momento de inercia de las columnas del piso que se está analizando

h : es la altura del piso de las columnas que se están analizando

Con esta expresión se hace una aproximación clásica de un pórtico tomando en cuenta que esta aproximación únicamente toma en cuenta la flexión de las columnas y supone que los extremos de estas están completamente empotrados por lo que hay que tomar en cuenta que no es una aproximación de alta exactitud, solo sirven para dar una buena referencia de que el programa está realizando bien el proceso de condensar la rigidez y obtener rigideces laterales equivalentes y se verifica esto con un ratio de relación entre ambas de la siguiente manera:

$$ratio = \frac{k_{modelo}}{k_{aprox}}$$

En general se observa y se entiende que con este método aproximado existen buena concordancia de rigideces en los pisos intermedios de los sistemas estructurales, pero por el contrario el primer y último piso pueden presentar diferencias del 0.40 al 0.60 debido a como interactúa todo el sistema y a los efectos de borde del sistema estructural

Por todo esto que se a analizado anteriormente la comparativa de las rigideces calculadas a partir de la matriz de rigidez condensada y este método aproximado por piso esta comparación debe únicamente interpretarse como una verificación muy aproximada de orden de consistencia mas no como una validación exacta del modelo estructural analizado.

3.6.2.9. Formulación de matriz de masas por piso

La aplicación genera una matriz de masas condensadas por cada uno de los niveles de piso la cual se calcula a partir del peso propio de las vigas, columnas y la sobrecarga adicional que el usuario define de inicio. La masa se obtiene mediante la relación conocida de:

$$W = m \times g$$

$$m = \frac{W}{g}$$

Donde W es el peso tributario o peso considerado asociado al elementos y g es la aceleración de la gravedad. En caso del calculo del peso de un elemento estructural se usa

$$W = \gamma \times A \times L$$

Por lo tanto, el cálculo de su masa sería

$$m = \frac{W}{g} = \frac{\gamma \times A \times L}{g}$$

Donde γ es el peso específico del material que se está utilizando y lo define el usuario de inicio, A es el área de la sección del elemento que se esta analizando y L es la longitud del elemento. Además, para tener concordancia a la realidad el modelo calcula la masa de cada columna y la reparte en dos partes iguales a los dos niveles que la conectan y la masa de cada viga la asigna al nivel al cual se encuentra ubicada

En el caso de las vigas la longitud utilizada para el cálculo del peso propio no es la longitud de eje a eje la cual ingresa el usuario sino la longitud libre que es la que resulta de la resta de las medias columnas que existen en la viga hasta el eje

$$L_{real} = L - \frac{b_c}{2} - \frac{b_c}{2}$$

En donde b_c es la dimensión de la columna en donde se asienta la viga.

En cambio, si el usuario define una sobrecarga adicional su contribución de masa se calcula de la siguiente manera

$$m_{sob} = \frac{q_d L}{g}$$

En donde q_d es la carga adicional distribuida y uniforme que el usuario la define, L es la luz de eje a eje de los elementos horizontales y nuevamente g es la aceleración de la gravedad. Con todos estos datos se arma la matriz de masa lumpada por piso

$$M_c = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix}$$

3.6.3 DEFINICIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO Y PROCESAMIENTO DEL REGISTRO SÍSMICO

Una vez definido el modelo estructural y obtenida las matrices necesarias para un análisis estructural, el siguiente paso consiste en definir una excitación sísmica que actuara sobre la estructura definida, el programa ISO-LATE para realizar este proceso utiliza dos componentes principales:

- Definición del espectro de diseño con la NEC-24
- Carga y procesamiento de un registro sísmico real

Este procedimiento permite comparar la estructura con dos tipos de análisis dinámicos los cuales son los siguientes:

- Análisis modal espectral que se basa en el espectro de diseño de la normativa
- Análisis tiempo historia utilizando registros sísmicos reales

3.6.3.1. Definición del espectro de diseño según la NEC-24

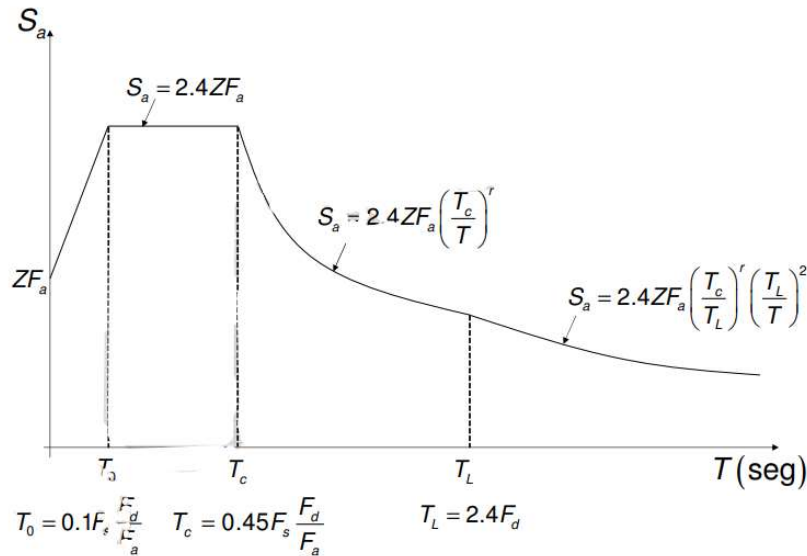
El espectro de diseño utilizado se calcula utilizando los parámetros establecidos por la Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC-24, los cuales dependen de algunos factores como:

- La intensidad sísmica z
- La zona sísmica
- El tipo de suelo donde se asienta la estructura
- El factor de reducción de respuesta R

- El factor de importancia de la edificación I_e

Figura 10

Espectro elástico de aceleraciones para el sismo de diseño



Tomado de: (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

Según la normativa en (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024), el espectro elástico de diseño normativo para aceleraciones de carga horizontal esta asociado claramente para un periodo de 475 años con un porcentaje de amortiguamiento viscoso del 5%.

El proceso para obtener el espectro elástico se basa en definir primero la ubicación del proyecto que se va a analizar para con esto obtener los valores de la zona sísmica y el coeficiente de intensidad Z , así como el tipo de suelo sobre el cual se va a asentar la edificación. (Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 2024)

A partir de estas variables y parámetros se obtienen los coeficientes de amplificación para el suelo utilizado que son:

- F_a : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto que se obtiene de la tabla 3.3 de la normativa NEC-24
- F_d : Coeficiente de amplificación del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca que se obtiene de la tabla 3.4 de la normativa NEC-24

- F_s : Coeficiente que ajusta el espectro en base al comportamiento no lineal de los suelos que se obtiene de la tabla 3.5 de la normativa NEC-24

El espectro se lo define en función del período estructural T mediante una función por tramos que da la forma al espectro elástico. Esta función por tramos que esta en función de los periodos de periodos cortos, meseta, periodos intermedios y periodos largos se la obtiene calculando los periodos característicos de la siguiente manera:

T_0 es el período inicial del espectro

$$T_0 = 0.1 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

T_c es el período de transición

$$T_c = 0.45 F_s \frac{F_d}{F_a}$$

T_L es el período largo

$$T_0 = 2.4 F_d$$

r es el coeficiente que depende de la región del Ecuador donde se ubica la estructura que si indica que está en una provincia de la sierra, oriente o esmeraldas tiene un valor de 1.0 y si está en el resto de la costa un valor de 1.2

Con estas límites de los periodos se calcula la función por partes para cada un instante de período con un paso pequeño que represente bien la función espectral y se obtiene los valores para el espectro elástico según:

Para períodos cortos delimitados de la siguiente manera $T < T_0$

$$S_a = Z F_a \left[1 + 1.4 \left(\frac{T}{T_0} \right) \right]$$

Para períodos ubicados en la meseta del espectro $T_0 < T < T_c$

$$S_a = 2.4 Z F_a$$

Para períodos intermedios delimitados de la siguiente manera $T_c < T < T_L$

$$S_a = 2.4ZF_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r$$

Para períodos largos delimitados de la siguiente manera $T > T_L$

$$S_a = 2.4ZF_a \left(\frac{T_c}{T_L} \right)^r \left(\frac{T_L}{T} \right)^2$$

Además, a partir del espectro elástico calculado y graficado también se puede obtener el espectro inelástico, el cual se reduce mediante el factor R

$$S_{a,inel} = \frac{S_{a,elast}}{R}$$

El cual es básicamente cada uno de los valores del espectro elástico divididos para el factor de reducción, adicionalmente a esto se calculan los valores característicos del espectro

$$SDS = S_a = 2.4ZF_a$$

$$SD1 = S_a(T = 1s)$$

Con los cuales se caracteriza el nivel de amenaza sísmica del sitio y también son valores que utilizaran más adelante para el diseño del aislador LRB por lo que se guardan

3.6.3.2. Carga y normalización del registro sísmico

La aplicación permite reconocer y cargar registros sísmicos de dos diferentes fuentes la una es del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER Ground Motion Database) perteneciente a la Universidad de Berkeley y también los de la Red Nacional de Acelerógrafos del Ecuador (RENAC) de los cuales identifica lo siguiente:

- Nombre del evento
- Unidad de aceleración (PEER viene en función de la gravedad y RENAC en m/s^2)
- Intervalo de muestreo indicado en el registro
- Número de puntos del registro utilizado

Con estos datos el programa aplica las respectivas conversiones para tener consistencia de unidades en todo el programa que trabaja las aceleraciones en unidades de m/s^2 . De

esta manera se guarda un vector del registro y además un vector del tiempo correspondiente a cada valor de la aceleración que se lo genera como:

$$t_i = i \cdot dt$$

3.6.3.3. Selección de registros sísmicos

Para la descarga de registros sísmicos como se indicó anteriormente se utilizan dos plataformas, primero se va a ejemplificar la obtención de registros de la página del PEER de Berkeley, para esto se debe registrar en la página de la base de datos con un correo institucional, una vez registrado se ingresa a la página principal del PEER se utiliza la base de datos de NGA-West2 puesto que como dice en su descripción es la base de datos que incluye la más amplia base de registros con los datos más completos y distintas características para escoger registros (*PEER Ground Motion Database - PEER Center*, s. f.)

Una vez dentro de la base de datos la página nos pregunta si tenemos un espectro objetivo para buscar y escalar los registros, en tal motivo si se tiene el espectro inelástico de la NEC-24 que se lo gráfica y obtiene en la app de ISO-LATE, para esto se selecciona el espectro definido por el usuario como se ve a continuación:

Figura 11

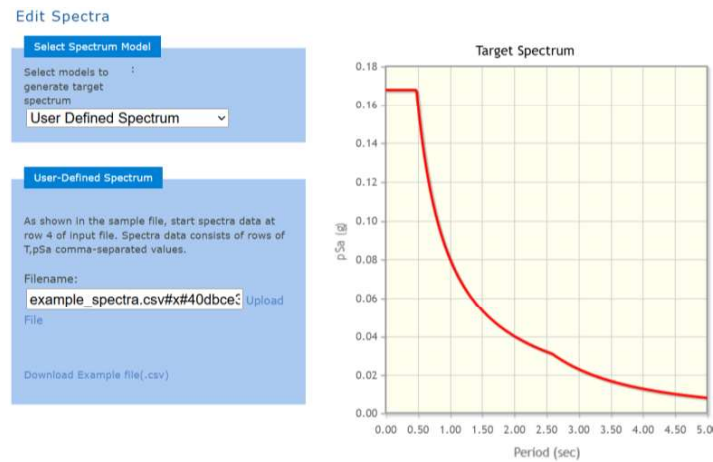
Espectro objetivo en la base de registros NGA-West2 PEER



Tomado de: (*PEER Ground Motion Database - PEER Center*, s. f.)

Para cargar el espectro se utiliza el archivo de ejemplo del PEER para poner en este los datos con el mismo formato y cargarlo a la página, una vez ingresado el espectro en la página se lo puede revisar de tal manera que se pueda asegurar que el espectro objetivo que se está cargando sea coherente con el que se necesita.

Figura 12
Revisión del espectro escalado NGA-West2 PEER



Tomado de: (PEER Ground Motion Database - PEER Center, s. f.)

Con este espectro objetivo ingresado se procede a obtener los registros para esta aplicación, para esto se necesitan ciertos datos sismo genéticos y geológicos los cuales son propios de la zona en donde se va a implantar la estructura y deben ser compatibles con la misma para que el análisis tenga sentido, en este ejemplo se realiza con los datos para la ciudad de Quito donde se define la magnitud, la distancia al epicentro, la distancia de ruptura, la velocidad de onda de corte en el suelo y a duración significativa

Figura 13
Datos para buscar registros sísmicos NGA-West2 PEER

The screenshot displays the 'Search' and 'Suite' panels of the PEER NGA-West2 PEER interface. The 'Search' panel on the left contains sections for 'Record Characteristics' (RSN(s), Event Name, Station Name), 'Search Parameters' (Fault Type, Magnitude, R_{JB}(km), R_{rup}(km), Vs30(m/s), DS-95(sec), Pulse), and 'Additional Characteristics' (Max No. Records, Initial ScaleFactor). The 'Suite' panel on the right contains sections for 'Suite' (Spectral Ordinate, Damping Ratio, Suite Average), 'Scaling' (Scaling Method, MSE), and 'Weight Function' (Period Points, Weights, Wn). The 'Weight Function' section includes a plot of the weight function W versus Period (sec).

Tomado de: (PEER Ground Motion Database - PEER Center, s. f.)

Adicional a esto se selecciona el tipo de combinación para las tres componentes que conforman un registro sísmico y el rango de período objetivo que es el 20% inferior y superior desde el periodo objetivo como indica la normativa ASCE7, con esto se buscan los registros y se los puede descargar con sus respectivos datos seleccionados y factores de escala listos para ser utilizados en la app.

Es importante aclarar que en la app no se ingresa el factor de escala del PEER puesto que el programa con el registro seleccionado y tomando en el espectro de este como período objetivo el periodo fundamental de la estructura fija arma los limites para escalar el mismo con un 20% tanto al limite inferior como superior

3.6.3.4. Integración numérica del acelerograma

A partir del registro de aceleraciones anteriormente almacenado es posible obtener los registros de velocidad y desplazamiento mediante un proceso de integración numérica, como se dispone del registro en aceleración la velocidad se obtiene de la siguiente manera:

$$v(t) = \int a_g(t)dt$$

Y de la misma manera habiendo obtenido el registro de velocidades se obtiene los desplazamientos de la siguiente manera

$$u(t) = \int v(t)dt$$

Pero al ser un registro de ínfimos valores se utiliza la integración por el siguiente método numérico para ambos casos

$$v_i = v_{i-1} + \frac{a_i + a_{i-1}}{2} dt$$

$$u_i = u_{i-1} + \frac{v_i + v_{i-1}}{2} dt$$

Con esta metodología se puede obtener los tres registros principales pertenecientes a un registro sísmico para posteriormente visualizarlos y procesarlos, sin embargo, debido a errores en los equipos de medición por calibración, ruido de medición estos procesos

suelen producir derivas artificiales en la velocidad y el desplazamiento, por esta razón se deben corregir de alguna manera estos registros.

3.6.3.5. *Procesamiento del registro sísmico*

Con el fin de mejorar la calidad de estos registros obtenidos el registro sísmico se lo procesa a través de tres etapas principales

a) Eliminación de tendencia lineal de la aceleración

Primero se revisa si el registro en aceleración presenta una inclinación general a lo largo del tiempo. Idealmente, la señal de aceleración como la de velocidad y desplazamiento deben oscilar alrededor del cero. Sin embargo, en varios casos puede generar que tenga una ligera pendiente por efectos del sensor, es importante detectar esto puesto que por más pequeño que sea esta deriva al integrar dos veces esto hasta el desplazamiento estos errores terminan siendo muy grandes. Para corregir esto primero se traza una recta ajustada a toda la señal de la aceleración la cual tiene la siguiente forma

$$\hat{a}(t) = c_1 t + c_0$$

Donde

- t es el tiempo
- c_1 es la pendiente de la recta
- c_0 es la ordenada al origen de la recta

Con esta lineal de tendencia obtenida se resta del registro original cada uno de sus puntos en el tiempo

$$a_{corre}(t) = a_{orig}(t) - \hat{a}(t)$$

Este procedimiento equivale a que si en el registro de la señal de aceleración se observa que esta tiene un tendencia a inclinarse, por más mínima y pequeña que sea, se traza una recta promedia a todos los puntos y se la resta a todos los puntos para eliminar esto y hacer que esta señal vuelva a oscilar alrededor de una línea mas razonable.

b) Filtrado de pasa banda

Con la tendencia lineal eliminada por completo del registro de aceleración se procede a filtrar la señal, el objetivo de filtrar una señal sísmica es debido a que esta puede tener componentes no deseadas en sus frecuencias

- Frecuencias demasiado bajas que normalmente se relacionan con las derivas que generan los equipos de medición, es decir después de un movimiento no regresan al nivel 0 y cargan con ese error en su registro y por la calibración de las misma.
- Frecuencias demasiado altas que normalmente son parte del ruido electrónico de todos estos equipos que se utilizan

Con el fin de eliminar estos restos que ensucian la señal se utiliza un filtro Butterworth de tipo pasa banda de cuarto orden. Básicamente el tipo de filtro pasa banda lo que hace es conservar las frecuencias de un registro que se delimitan dentro de un rango y las que no entran en este rango se las eliminan. En ISO-LATE el rango utilizando para este filtrado es el siguiente

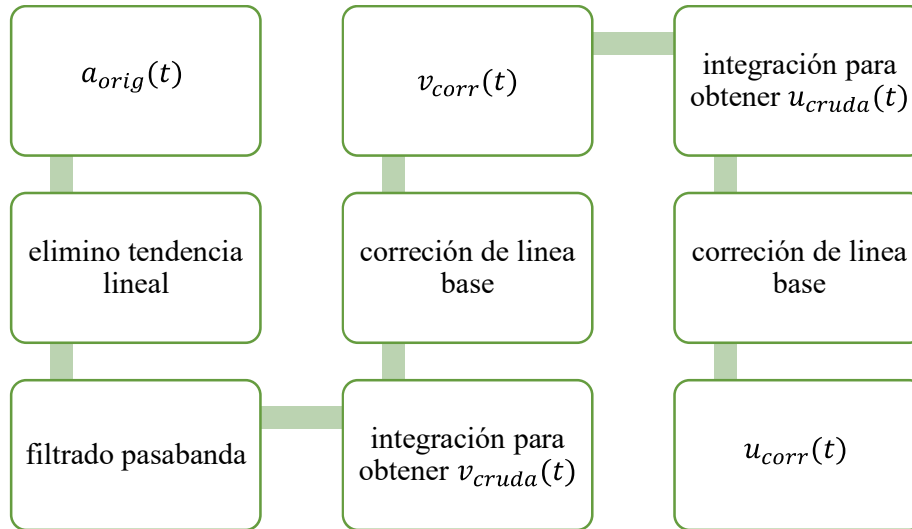
$$0.10 \text{ Hz} \leq f \leq 25.0 \text{ Hz}$$

Ahora bien porque este rango y no más o menos, en un registro de aceleración hay 3 tipos de registros que se mezcla entre sí, la señal sísmica real, el ruido del instrumentos y los errores de la línea base, como mi limite son las frecuencias de 0.10 Hz lo cual es equivalente a 10s en período que son frecuencias que normalmente no intervienen en el registro sísmico y más altos de estos y en las frecuencias de 25 Hz que es un periodo equivalente de 0.04 segundos que como también se sabe no corresponde a valores manejados normalmente en ingeniería civil pero si son comunes e ruido electrónico, vibraciones de sensores y otros relacionados

c) Corrección de línea base

Para realizar este proceso se utiliza la misma regresión lineal que en la etapa de eliminación de línea de tendencia con regresión lineal, pero en este caso se ajusta un polinomio a la línea que se quiere corregir, este polinomio puede tener distintos grados pero para el presente trabajo se utiliza un polinomio cuadrático el cual una vez se obtiene se resta del registro para obtener el registro corregido de línea base

Cabe aclarar que si el usuario no activa la corrección y filtrado utiliza el registro real y crudo tanto para aceleración, velocidad y desplazamiento y si lo activa tiene los 3 registro listos. El proceso de esta limpieza de registro es el siguiente:



No se debería usar señales sin corregir y filtrar porque los pequeños errores en la aceleración así sean mínimos se amplifican al integrar y llegan a no tener sentido en el análisis dinámico

3.6.3.6. Cálculo del espectro de respuesta del registro

Con el registro en aceleración definido sea filtrado y corregido o no se toma este para obtener del mismo el espectro de respuesta en aceleraciones con el objetivo de comparar de manera coherente la demanda dinámica del registro sísmico utilizado con espectro objetivo definido por lo normativa, en este caso la NEC-24.

El espectro de respuesta básicamente representa la respuesta máxima de un sistema estructural de un grado de libertad sometido a una aceleración de terreno con un valor dado de amortiguamiento, utilizando varios valores de períodos

El proceso consiste en resolver la ecuación dinámica de un sistema de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -ma_g(t)$$

Donde:

- m es la masa del sistema estructural
- c es el amortiguamiento viscosos equivalente utilizando en el sistema
- k es la rigidez del sistema estructural
- $a_g(t)$ es la aceleración del terreno o el registro en aceleración
- $u(t)$ es el desplazamiento relativo del oscilador o sistema de lgdl.

Además, se calcula la frecuencia angular del sistema para un período dato con la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Asumiendo que el sistema tiene una masa unitario, la rigidez y el amortiguamiento se obtienen de la siguiente manera:

$$k = \omega^2$$

$$c = 2\xi\omega$$

Sabiendo que se tiene los valores de la frecuencia angular ω , de la rigidez k y del amortiguamiento c debido a que se tiene el periodo T como dato así como el coeficiente de amortiguamiento critico ξ se debe resolver únicamente la ecuación diferencia ordinaria de segundo orden y para realizar este proceso se utiliza el método de Newmark con los siguientes parámetros

$$\beta = \frac{1}{4} \quad \gamma = \frac{1}{2}$$

Correspondiente al método de aceleración promedio constante también conocido como método de Newmark padre el cual es un método de integración paso a paso. En este método el desplazamiento y la velocidad se expresan en función de la aceleraciones del paso actual (valor de análisis en el instante de tiempo) y del paso siguiente (siguiente valor de aceleración). Las ecuaciones clásicas de este método son:

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_t + \beta \ddot{u}_{t+\Delta t} \right]$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_t + \gamma \ddot{u}_{t+\Delta t}]$$

Estas ecuaciones permiten actualizar de forma progresiva la respuesta del sistema en cada intervalo de tiempo del acelerograma, como se puede ver este proceso e repite para todos los instantes de tiempo del registro por lo que esto genera una alta carga computacional al resolver y más aún cuando los registros son largos y tienen intervalos de tiempo más pequeños, con el fin de entender de mejor manera este método se va a realizar a mano el procedimiento, supongamos que tenemos un registro muy pequeño de aceleración.

$t(s)$	a_g
0.00	0.20
0.10	0.50
0.20	-0.30

Primero se obtiene el paso del tiempo del registro que se está utilizando

$$\Delta_t = 0.10 \text{ s}$$

Asumimos las siguientes propiedades para el sistema estructural

$$T = 1.0 \text{ s} \quad \xi = 5 \% = 0.05$$

Se calcula las propiedades del sistema de frecuencia angular

$$\omega = \frac{2\pi}{1} = 6.283 \text{ rad/s}$$

Masa del sistema

$$m = 1.0$$

Rigidez

$$k = m\omega^2$$

$$k = 1 \cdot (6.283)^2$$

$$k = 39.48$$

Amortiguamiento

$$c = 2\xi m\omega$$

$$c = 2(0.05)(1)(6.283)$$

$$c = 0.628$$

Como un sistema antes de iniciar esta en reposo se asume lo siguiente

$$u_0 = 0$$

$$\dot{u}_0 = 0$$

$$\ddot{u}_0 = 0$$

Finalmente se definen los parámetros de estabilidad para el método de Newmark

$$\beta = \frac{1}{4} \quad \gamma = \frac{1}{2}$$

Análisis del primer paso de tiempo de $t = 0$ a $t = 0.1$

$$a_g = 0.50$$

Usando la ecuación dinámica en este instante de tiempo:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -ma_g(t)$$

$$\ddot{u}_1 + 0.628\dot{u}_1 + 39.48u_1 = -0.50$$

Primero se usa la ecuación de desplazamiento de Newmark

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t\dot{u}_t + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_t + \beta \ddot{u}_{t+\Delta t} \right]$$

$$u_1 = 0 + (0.10 \cdot 0) + (0.10)^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \right) (0) + \frac{1}{4} \ddot{u}_1 \right]$$

$$u_1 = 0.01 \left[\frac{1}{4} \ddot{u}_1 \right] = 0.0025\ddot{u}_1$$

$$u_1 = 0.0025\ddot{u}_1$$

Ahora se resuelve la ecuación de la velocidad

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \Delta t[(1 - \gamma)\ddot{u}_t + \gamma\ddot{u}_{t+\Delta t}]$$

$$\dot{u}_1 = 0 + 0.10 \left[\left(1 - \frac{1}{2}\right) 0 + \frac{1}{2} \ddot{u}_1 \right]$$

$$\dot{u}_1 = 0.10 \left[\frac{1}{2} \ddot{u}_1 \right]$$

$$\dot{u}_1 = 0.05 \ddot{u}_1$$

Con estos valores obtenidos se reemplaza los valores en la ecuación dinámica

$$\ddot{u}_1 + 0.628 \dot{u}_1 + 39.48 u_1 = -0.50$$

$$\ddot{u}_1 + 0.628(0.05 \ddot{u}_1) + 39.48(0.0025 \ddot{u}_1) = -0.50$$

$$\ddot{u}_1 + 0.0314 \ddot{u}_1 + 0.0987 \ddot{u}_1 = -0.50$$

$$1.1301 \ddot{u}_1 = -0.50$$

$$\ddot{u}_1 = -0.4424 \text{ m/s}^2$$

Con este valor obtenido de la respuesta en aceleración se obtiene el desplazamiento y la velocidad

$$u_1 = 0.0025 \ddot{u}_1 = -0.001106 \text{ m}$$

$$\dot{u}_1 = 0.05 \ddot{u}_1 = -0.02212 \text{ m/s}$$

De la misma forma sería para el paso de $t = 0.1$ a $t = 0.2$ donde se arma primera la ecuación de la dinámica para este instante

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -ma_g(t)$$

$$\ddot{u}_2 + 0.628 \dot{u}_2 + 39.48 u_2 = 0.30$$

Y de aquí se repite el proceso para cada uno de los instantes del tiempo

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_t + \beta \ddot{u}_{t+\Delta t} \right]$$

$$u_2 = -0.001106 + (0.10 \cdot -0.02212) + (0.10)^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \right) (-0.4424) + \frac{1}{4} \ddot{u}_2 \right]$$

$$u_2 = -0.004425 + 0.0025\ddot{u}_2$$

También la velocidad

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \Delta t[(1-\gamma)\ddot{u}_t + \gamma\ddot{u}_{t+\Delta t}]$$

$$\dot{u}_2 = -0.02212 + 0.10 \left[\left(1 - \frac{1}{2}\right)(-0.4424) + \frac{1}{2}\ddot{u}_2 \right]$$

$$\dot{u}_2 = -0.4424 + 0.05\ddot{u}_2$$

Se reemplaza los valores en la ecuación dinámica

$$\ddot{u}_2 + 0.628\dot{u}_2 + 39.48u_2 = 0.30$$

$$\ddot{u}_2 + 0.628(-0.4424 + 0.05\ddot{u}_2) + 39.48(-0.004425 + 0.0025\ddot{u}_2) = 0.30$$

$$\ddot{u}_2 - 0.0278 + 0.0314\ddot{u}_2 - 0.1747 + 0.0987\ddot{u}_2 = 0.30$$

$$1.1301\ddot{u}_2 = 0.5025$$

$$\ddot{u}_2 = 0.4446 \text{ m/s}^2$$

Con este valor obtenido de la respuesta en aceleración se obtiene el desplazamiento y la velocidad

$$u_2 = -0.004425 + 0.0025\ddot{u}_2 = -0.00331 \text{ m}$$

$$\dot{u}_2 = -0.4424 + 0.05\ddot{u}_2 = -0.02195 \text{ m/s}$$

Finalmente se va realizando esto con los cientos o miles de puntos del registro sísmico y se van guardando estos valores

Tiempo	u (m)	$\dot{u}$ (m/s)	$\ddot{u}$ (m/s ²)
0.0	0.00000	0.00000	0.00000
0.1	-0.00111	-0.02210	-0.44200
0.2	-0.00331	-0.02195	0.44460

Ahora bien este proceso es el método de beta de Newmark el cual permite resolver la ecuación de la dinámica de una estructura frente a un evento o registro sísmico y obtener la respuesta de ese sistema frente a ese registro de aceleraciones, ahora lo que

buscamos es obtener el espectro de respuesta para esto se obtiene el máximo desplazamiento relativo absoluto de todos los desplazamientos que han obtenido sean los que sea, para el ejemplo como tenemos únicamente 3 valores el máximo absoluto sería

$$u_{max} = 0.00331 \text{ m}$$

Con este único valor de miles de valor se obtiene la pseudoaceleración espectral de la siguiente manera

$$S_a(T) = \omega^2 \cdot u_{max}$$

$$S_a(T) = (6.283 \text{ rad/s})^2 \cdot 0.00331 \text{ m}$$

$$S_a(T) = 0.13066 \text{ m/s}^2$$

Normalmente los espectros de respuesta se utilizan en función de la gravedad g por lo cual se hace lo siguiente

$$S_{a,g}(T) = \frac{0.13066 \text{ m/s}^2}{9.8066 \text{ m/s}^2}$$

$$S_{a,g}(T) = 0.01331 \text{ g}$$

Este valor obtenido sería un solo punto de toda la curva del espectro de respuesta únicamente para cuando el período analizado equivale a 1 segundo. Este proceso se repite para periodos desde 0 hasta 5 segundos y con un paso de tiempo pequeño para obtener el espectro necesario.

3.6.3.7. Escalamiento del registro al espectro objetivo

Una vez obtenido el espectro de respuesta del registro sísmico utilizando es necesario que se verifique la intensidad de el mismo, esta debe ser compatible con el nivel de demanda sísmica que se está utilizando en el espectro de la norma y poder comparar de manera adecuada los métodos de tiempo historia y el modal espectral, es decir que tenga consistencia con las condiciones de diseño de sitio y propiedades dinámicas de la estructura analizada.

Para realizar el escalamiento se utiliza la comparación entre dos espectros el uno es el espectro normativo calculado anteriormente con la Normativa Ecuatoriana de la

Construcción NEC 24 el cual es el objetivo de escalado y es el espectro elástico y el espectro de respuesta del registro sísmico que se esta utilizando

Para poder escalar el registro se utiliza un rango de períodos para el escalamiento, este escalamiento no se realiza en todo el espectro si no únicamente en los periodos relevantes de la estructura, el valor de periodo de referencia es el periodo fundamental de la estructura de base fija, a partir de este valor se obtiene el rango de escalamiento de la siguiente manera:

$$T_{min} = 0.2 \cdot T_{1fix}$$

$$T_{min} = 1.5 \cdot T_{1fix}$$

Este rango sería en donde la estructura presenta mayor sensibilidad en el análisis dinámico por ese motivo se utiliza el escalado.

Con este rango se determina un factor de escala para corregir el registro sísmico que se esta utilizando con el procedimiento que se detalla a continuación. Supongamos que hemos calculado el espectro objetivo de la NEC24 y además tenemos el espectro del registro sísmico que vamos a escalar

Período T (s)	$S_{a,reg}(T)$ (g)	$S_{a,obj}(T)$ (g)
0.5	0.40	0.55
1.0	0.50	0.70
1.5	0.30	0.45

El facto de escala se obtiene a través del método de ajuste por mínimos cuadrados de la siguiente manera:

$$SF = \frac{\sum S_{a,obj}(T_i) S_{a,reg}(T_i)}{\sum S_{a,reg}^2(T_i)}$$

$$SF = \frac{(0.55 \times 0.40) + (0.70 \times 0.50) + (0.45 \times 0.30)}{(0.40)^2 + (0.50)^2 + (0.30)^2}$$

$$SF = \frac{0.22 + 0.35 + 0.135}{0.16 + 0.25 + 0.09}$$

$$SF = \frac{0.705}{0.50} \approx 1.41$$

De esta manera se calcula con los puntos del registro de interés el factor de escala para el registro sísmico donde finalmente se debe aplicar este factor de escala en el registro sin escalar lo cual se hace multiplicando todas las aceleraciones del registro en cuestión por el factor de escala obtenido

$$a_{g,esc}(t) = SF \times a_g(t)$$

Siguiendo el ejemplo anterior vamos a ejemplificar como seria escalar los valores del registro sísmico

Período T (s)	$S_{a,reg}(T)$ (g)	$S_{a,reg,esc}(T)$ (g)
0.5	0.40	0.56
1.0	0.50	0.71
1.5	0.30	0.42

De esta manera queda escalado y listo el registro que se va a utilizar al espectro objetivo que se usa en el análisis modal

3.6.4 FORMULACIÓN DEL SISTEMA AISLADO Y DISEÑO DEL AISLADOR LRB

3.6.4.1. Análisis modal previo del sistema fijo

Previo al diseño del aislador que se va a utilizar en el sistema se debe realizar el análisis modal del sistema estructural con base fija previamente condensado. Este proceso es necesario puesto que el diseño del aislador necesita los datos resultantes de esto para poder ser diseñado y obtener las propiedades del mismo, en este punto se utilizan las matrices de rigidez condensada del modelo fijo K_c y la matriz de masas condensada M_c , las cuales se obtuvieron anteriormente, estas matrices se describen mediante la ecuación matricial de movimiento

$$M_c \ddot{u}(t) + K_c \dot{u}(t) = 0$$

Esta ecuación se la resuelve de la siguiente manera:

$$u(t) = \phi e^{-i\omega t}$$

De donde se tiene que ϕ es el vector que guarda las formas modales y ω es la frecuencia angular del sistema y con esta solución en la ecuación anterior se tiene lo siguiente:

$$(K_c - \omega^2 M_c)\phi = 0$$

Esta expresión se la resuelve mediante la resolución de autovalores y auto vectores para obtener las frecuencias naturales y las formas nodales respectivamente, este proceso al ser bastante tedioso en matrices de gran tamaño se lo resuelve por medio de cálculo de un computador

Del resultado de los autovalores se obtiene las frecuencias naturales al cuadrado de las cuales se obtiene su raíz para obtener las frecuencias naturales del sistema y finalmente con estos valores se puede obtener los periodos naturales de vibración de la estructura de la siguiente forma

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}$$

Además del vector de formas nodales que se obtiene de los auto vectores. Con el fin de facilitar su uso en el análisis dinámico estos vectores se los normalizan respecto a la masa del sistema de modo que cada modo cumpla lo siguiente:

$$\phi_i^T M_c \phi_i = 1$$

De todo este análisis el resultado principalmente usado en el diseño del aislador de base es el período fundamental del sistema fijo el cual se usa como referencia para ver la efectividad del aislamiento sísmico

3.6.4.2. Definición de los parámetros de diseño del aislador

El diseño del aislador utiliza el período fundamental de la estructura fija con el fin de comparar que este siendo efectivo, esto puesto que cuando se aísla la base de una estructura su periodo fundamental aumenta significativamente además se utilizan otros valores que se ejemplifican a continuación

T_{1-fix} : El período fundamental de la estructura de base fija para comprobar la efectividad de los aisladores conforme aumente su periodo

S_{DS} : Es la aceleración espectral en la meseta se la obtuvo en el bloque del espectro de diseño en base a la Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC24

S_{D1} : Es la aceleración espectral para un período de 1 segundo que se la obtuvo en el bloque del espectro de diseño en base a la Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC24

M : La masa total que tiene la super estructura lo cual se obtiene de la suma de la diagonal de la matriz condensada de masas, este valor es importante puesto que interviene directamente en el cálculo de la rigidez efectiva requerida del sistema de aislamiento

N : Es el número de aisladores que estarán ubicados en la base de la estructura, básicamente es el mismo número de columnas que existen en la estructura desde la base

3.6.4.3. *Procedimiento de diseño automático y por período objetivo*

El proceso de diseño del aislador implementado en la aplicación determina propiedades mecánicas equivalentes de los aisladores de goma con núcleo de acero mediante dos modalidades, una automática y otra por medio de un período objetivo. El proceso se explica de manera clara y ejemplificada para el diseño de cada uno de los métodos a continuación del presente trabajo, así como la obtención de las propiedades mecánicas equivalentes utilizadas para el sistema las cuales son las siguientes:

- Rigidez efectiva
- Amortiguamiento viscoso
- Rigidez inicial elástica
- Fuerza de fluencia F_y
- Relación de rigidez r

Para el diseño automático se sigue el siguiente proceso propuesto por (Páez Carlos, 2023), el mismo que viene del propuesto del código ASCE 7-22:

1.- Se obtienen los datos necesarios para el diseño como lo son:

W_T : Peso total de la carga muerta en la estructura o sistema de análisis

W_{col} : Peso total de la carga muerta en la columna que se está analizando

W_{ais} : Peso de 1 aislador

g : Aceleración de la gravedad en mm/s^2 , con un valor de 9810

N° : Número de columnas o aisladores que se van a tomar en cuenta

k_{LRB} : Rigidez de los aisladores LRB

2.- Se diseña el diámetro del núcleo de plomo, se toma en cuenta que la norma ASCE 7 exige que la fuerza característica del sistema no sea menor que un valor que depende del peso y desplazamiento de diseño y típicamente este es del 5% del peso total

$$Q_{d\ total} = \sum Q_d$$

$$\frac{Q_{d\ total}}{W_T} = 0.05$$

$$0.05 = \frac{N^\circ \times Q_d}{W_T}$$

$$0.05 = \frac{N^\circ \times A_L \sigma_L}{W_T}$$

$$0.05 = \frac{N^\circ \times \frac{\pi D_L^2}{4} \times \sigma_L}{W_T}$$

$$D_L = \sqrt{\frac{0.05 \times W_T \times 4}{N^\circ \times \pi \times \sigma_L}}$$

3.- Se redondea el diámetro obtenido del núcleo, este debe ser redondeado a múltiplo cercano tomando en cuenta que los núcleos de plomo suelen tener medidas con incrementos de 20 mm. (Páez Carlos, 2023) Con este valor asumido se recalcula el valor de la fuerza característica del sistema:

$$Q_{d\ total} = N^\circ \times Q_d$$

$$Q_{d\ total} = N^\circ \times A_L \sigma_L$$

$$Q_{d\ total} = N^{\circ} \times \frac{\pi D_L^2}{4} \times \sigma_L$$

4.- Se obtiene el diámetro externo de los aisladores de tipo LRB

$$D_B = 4D_L$$

5.- Así mismo se obtiene la altura de capas de caucho la cual debe ser mayor o igual al diámetro interno del núcleo de plomo

$$T_r = D_L$$

6.- Con estos datos obtenidos se puede obtener la rigidez post elástica o la rigidez post fluencia del aislador, de la siguiente forma

$$k_d = f_L \frac{GA_r}{T_r}$$

7.- El módulo de corte es una propiedad del caucho que lo indica cada fabricante, pero por practicidad se va a utilizar un valor típico de

$$G = 0.45 \frac{N}{mm^2}$$

8.-Se obtiene la rigidez post fluencia de todo el sistema en conjunto

$$k_{d\ total} = N^{\circ} \times f_L \frac{GA_r}{T_r}$$

$$k_{d\ total} = N^{\circ} \times f_L \frac{G \times \frac{\pi(D_B^2 - D_L^2)}{4}}{T_r}$$

9.- Se penaliza con un factor de reducción, conocido como límite inferior a la fuerza característica del sistema y de la rigidez post fluencia

$$Q_{d\ total\ LB} = 0.85 \times Q_{d\ total}$$

$$k_{d\ total\ LB} = 0.85 \times k_{d\ total}$$

10.- Se determina la rigidez efectiva y el amortiguamiento efectivo de todo el sistema de aislamiento por un proceso iterativo, empezando con el cálculo del desplazamiento máximo

$$D_M = \frac{A_n}{\omega_n^2} = \frac{S_{DS}}{\frac{2\pi^2}{T}}$$

11.- Se obtiene la rigidez efectiva de la primera iteración

$$k_M = k_{d \text{ total } LB} + \frac{Q_{d \text{ total } LB}}{D_M}$$

12.- Se obtiene el período efectivo del sistema aislado (Se debe verificar que este período desde la primera iteración salga mayor que el del sistema analizado para que tenga sentido)

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W_T}{k_M g}}$$

13.- Se calcula el amortiguamiento efectivo en donde Y se toma un buen valor para iniciar la aproximación de 25 mm

$$\beta_M = \frac{2Q_{d \text{ total } LB}(D_M - Y)}{\pi k_M D_M^2}$$

14.- Con este valor obtenido del amortiguamiento efectivo β_M , se utiliza la tabla 17.5-1 de la norma ASCE 7-22 para interpolar y obtener el valor del factor de amortiguamiento B_M

Tabla 8

Factor de amortiguamiento B_M

Amortiguamiento efectivo β_M	Factor B_M
≤ 2	0.80
5	1.00
10	1.20
20	1.50
30	1.70
40	1.90
≥ 50	2.00

Nota. Tomado de tabla 17.5-1 de (American Society of Civil Engineers, 2022)

Para obtener el valor específico para el caso se debe realizar una interpolación lineal como se ve a continuación

$$B_M = (x - x_1) \times \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} + y_1$$

15.- Se verifica el desplazamiento máximo antes calculado con los valores calculados

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M}$$

Con este último valor calculado del desplazamiento máximo nuevamente se inicia el proceso desde el punto 10 y así sucesivamente hasta que el valor inicial del desplazamiento en el punto 10 sea casi el mismo que el del punto 15 y con todos estos valores se obtienen los valores finales de las propiedades, se obtiene la rigidez efectiva de un solo aislador

$$k_{eff\ 1} = \frac{k_{d\ total\ LB}}{N^\circ} + \frac{\frac{Q_{d\ total\ LB}}{D_M}}{N^\circ}$$

$$k_{eff\ 1} = \frac{k_{d\ total\ LB} + \frac{Q_{d\ total\ LB}}{D_M}}{N^\circ}$$

Se obtiene el amortiguamiento efectivo, y hay que tomar en cuenta que no es lo mismo el factor de amortiguamiento “c” que el amortiguamiento efectivo “ $\zeta = \beta_M$ ”

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{k \times \frac{W}{g}}}$$

$$c = \zeta \times 2\sqrt{k \times \frac{W}{g}}$$

$$c = 2\beta_M \sqrt{k \times \frac{W}{g}}$$

Se calculan las propiedades no lineales para un solo aislador de la siguiente manera:

$$Stiffness \text{ (Rigidez del nucleo de plomo)} = \frac{\frac{\pi \times D_L^2}{4} \times \sigma_L}{Y}$$

$$Yield \text{ Strength (Resistencia a la fluencia)} = \frac{\pi \times D_L^2}{4} \times \sigma_L$$

$$Post \text{ Yield Stiffness Ratio} = \frac{f_L \frac{GA_r}{T_r}}{Stiffness} = \frac{f_L \frac{G \times \frac{\pi(D_B^2 - D_L^2)}{4}}{T_r}}{Stiffness}$$

Como se puede observar de esta manera es el proceso que se ha incluido en el programa para que diseñe de manera automática el aislador de base más óptimo que se va a utilizar en el sistema de análisis que se especifique de inicio.

3.6.4.4. Formulación de la matriz de rigidez del sistema aislado

Para el modelo aislado se procede no de manera simplificada si no que se arma nuevamente toda la matriz de cada elemento y adicional a esto se elimina los empotramientos en base pero se incluye elementos que aumentan los grados de libertad, un grado de libertad de giro por cada nodo donde va un aislador en base y además de esto un grado de libertad de desplazamiento lateral que es el mismo en todos los nodos de aislador, con este nuevo mapeo y elementos se arma nuevamente la matriz de rigidez global y se condensa de exactamente la misma forma que se lo realizó en el punto 3.6.2 donde se indica como se obtienen la rigidez global, condensada que es el mismo proceso

3.6.5 ANÁLISIS DINÁMICO LINEAL MEDIANTE INTEGRACIÓN PASO A PASO DE NEWMARK

En esta etapa se realiza el análisis dinámico lineal de la estructura utilizando el método de integración paso a paso de Newmark-β. Este procedimiento permite obtener la respuesta temporal de la estructura cuando se somete a un registro sísmico en aceleración.

A diferencia del cálculo del espectro de respuesta del registro sísmico, donde el método se aplicó a un sistema de un grado de libertad, en este caso el procedimiento se aplica al modelo estructural condensado de múltiples grados de libertad. De esta manera se puede obtener la respuesta dinámica de cada nivel de la estructura tanto para el caso de base fija como para el caso con aislamiento sísmico.

3.6.5.1. Formulación de la matriz de rigidez del sistema aislado

La ecuación dinámica de la estructura se realiza mediante la ecuación matricial del movimiento

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = P(t)$$

De las cuales ya tenemos las matrices de masas condensadas y rigideces condensadas tanto del sistema fijo como del sistema aislado, además el vector de fuerzas equivalentes del sismo se lo puede expresar de la siguiente manera:

$$P(t) = -Mr a_g(t)$$

Para poder resolver este sistema hace falta la matriz de amortiguamiento del sistema

3.6.5.2. Matriz de amortiguamiento del sistema aislado

Para obtener la disipación de energía del sistema estructural se utiliza la metodología de amortiguamiento clásico de Rayleigh que se expresa de la siguiente manera

$$C = \alpha M + \beta K$$

De donde los valores de α y β son coeficiente que se calculan a partir de los dos primeros períodos de cada sistema estructural y de un coeficiente de amortiguamiento para cada modo (1ro y 2do)

Básicamente se toma que se puede obtener el amortiguamiento equivalente para un modo de un sistema de la siguiente manera:

$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right)$$

Donde el valor de ζ_i es el coeficiente del modo i y ω_i es la frecuencia angular del modo i . Utilizando los dos primeros modos con un amortiguamiento de 0.05 o 5% y con los dos primeros periodos obteniendo sus frecuencias angulares como sigue

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i}$$

De esta manera se obtiene 2 ecuaciones con 2 incógnitas las cuales son los coeficientes de α y β que se resuelven de este sistema de ecuaciones. Con estos valores se realiza la matriz de amortiguamiento tanto para el caso fijo

$$C_{fix} = \alpha_{fix}M_{fix} + \beta_{fix}K_{fix}$$

Y también para el caso aislado

$$C_{ais} = \alpha_{ais}M_{ais} + \beta_{ais}K_{ais}$$

Además para el caso aislado se agrega el amortiguamiento viscoso equivalente del sistema de aislamiento en el grado de libertad que corresponde a la base aislada que siempre es el elemento (1,1)

$$C_{ais}(1, 1) = C_{ais}(1, 1) + Nc_{1ais}$$

Donde N es el número de aisladores que van en la base del sistema estructural y c_{1ais} es el amortiguamiento equivalente viscoso de 1 solo aislador que se obtuvo de la propiedades del aislador anteriormente.

3.6.5.3. Respuesta de beta de Newmark para varios grados de libertad

Este procedimiento básicamente funciona igual que se lo explico de manera simplificada y para un solo grado de libertad en el punto 3.6.3.6, la diferencia es que en cada instante de tiempo no voy a tener un solo valor como ya lo tenia en ese ejemplo si no que por cada instante de tiempo se obtendría un vector de respuestas en aceleración, velocidad y desplazamiento que tiene el tamaño de los N grados de libertad que se estén obteniendo las respuestas. Cuando el proceso culmina no se tiene vectores si no matrices completas de cada una de las respuesta que tienen la siguiente estructura

$$u \rightarrow \text{matriz}(n_{gl}, n_{tiempos})$$

Es decir que si tengo un total de 10 grados de libertad y un registro sísmico que tiene 2000 pasos de tiempo voy a tener al final una matriz de (10 x 2000) por cada respuesta total obtenida

Un punto importante es que cuando se tiene varios pisos se obtienen las respuestas en desplazamiento, velocidad y aceleración relativas al movimiento del terreno pero para una correcta evaluación se debe usar cada una en cuestión de sus objetivos por ejemplo los desplazamientos relativos son útiles para poder ver la deformación del edificio pero las aceleraciones si son importantes que sean absolutas para poder evaluar distintas variables y se lo realiza de la siguiente manera:

$$\ddot{u}_{abs}(t) = \ddot{u}_{rel}(t) + a_g(t)$$

Que básicamente es la suma de la respuesta obtenida con Newmark con el registro sísmico para cada instante de tiempo

3.6.5.4. Obtención del pico de aceleración en los pisos

Este valor es básicamente el valor máximo absoluto en aceleración del vector de respuestas en aceleración, este valor es útil para comparar puesto que de un sistema fijo a un aislado este valor baja mucho a pesar de que aumenta el desplazamiento en por el aislador.

3.6.6 FORMULACIÓN NO LINEAL DEL AISLADOR Y OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA HISTERÉTICA

En esta etapa se formula el comportamiento no lineal del sistema de aislamiento para representar de manera más realista la respuesta del aislador tipo LRB ante la acción sísmica. A diferencia del análisis lineal equivalente realizado anteriormente, en este caso el aislador ya no se representa únicamente mediante una rigidez efectiva y un amortiguamiento equivalente, sino mediante un modelo bilineal con memoria histerética.

Este procedimiento permite obtener directamente la relación fuerza-desplazamiento del aislador a lo largo del tiempo y, con ello, construir el ciclo histérico real del sistema.

3.6.6.1. Modelo bilineal del aislador

El aislador tiene un modelo bilineal que se basa principalmente en 3 propiedades:

- Rigidez inicial k_0
- Rigidez postfluencia k_p
- Fuerza de fluencia F_y

A partir de estas propiedades se calcula el desplazamiento de fluencia

$$u_y = \frac{F_y}{k_0}$$

Este valor define el punto exacto en donde el aislador no se comporta de una forma elástica inicial y entra en postfluencia

3.6.6.2. Variable interna y memoria de histéresis y fuerza histerética

Para representar la memoria de la histéresis se utiliza una variable interna conocida como u_e , la cual es la parte elástica que limita el desplazamiento. Para cada paso de tiempo primero se obtiene un valor de prueba

$$u_e^{prueba} = u_e^{anterior} + \Delta u$$

De donde $\Delta u = u_0 - u_0^{anterior}$, luego esta variable interna se limita al rango de la fluencia del aislador:

$$u_e = \max(-u_y, \min(u_e^{prueba}, u_y))$$

Con todo esto se permite que el modelo recuerde y sepa si ya está el aislador en fluencia o la dirección de esta fluencia. Además con estas variables obtenidas se obtiene la fuerza histerética del aislador de la siguiente forma

$$F_{hyst} = k_p u_0 + (k_0 - k_p) u_e$$

De esta expresión se puede reproducir el comportamiento bilineal del aislador con memoria y así mismo la rigidez tangente instantánea se obtiene de la siguiente forma

$$k_t = k_p + (k_0 - k_p) \frac{du_e}{du}$$

Para entender mejor esta parte se realiza un ejemplo a continuación. Supongamos que un aislador de base tiene las siguientes propiedades

$$k_0 = 100 \text{ Tf}/m$$

$$k_p = 20 \text{ Tf}/m$$

$$F_y = 5 \text{ Tf}$$

Primero se calcula el desplazamiento de fluencia

$$u_y = \frac{F_y}{k_0} = \frac{5}{100} = 0.05 \text{ m}$$

Suponiendo que inicia el ciclo de histéresis el paso cero asume que el aislador no se mueve porque esta estático por tal motivo se sabe que

$$u_0^{(0)} = 0.00 \text{ m}$$

$$u_{0e}^{(0)} = 0.00 \text{ m}$$

En este instante, como no hay desplazamiento, la fuerza de histéresis también es nula

$$F_{hyst} = 20(0.00) + (100 - 20)(0.00) = 0.00 \text{ Tf}$$

Vamos al siguiente paso donde suponemos que el desplazamiento ahora tiene el siguiente valor

$$u_0^{(1)} = 0.08 \text{ m}$$

Se obtiene el incremento de desplazamiento

$$\Delta_u = u_0^{(1)} - u_0^{(0)} = 0.08 - 0.00 = 0.08 \text{ m}$$

Se obtiene el primer estado de prueba de desplazamiento

$$u_e^{prueba} = u_e^{(0)} + \Delta u = 0.00 + 0.08 = 0.08 \text{ m}$$

Pero como se sabe el desplazamiento de fluencia tiene el siguiente valor

$$u_y = 0.05 \text{ m}$$

Como la variable no puede super este límite de desplazamiento se corrige con lo siguiente:

$$u_e^{(1)} = \max(-u_y, \min(u_e^{prueba}, u_y)) = \max(-0.05, \min(0.08, 0.05)) = 0.05 \text{ m}$$

Finalmente, con la corrección lista se obtiene la fuerza de histéresis para este paso

$$F_{hyst}^{(1)} = k_p u_0^{(1)} + (k_0 - k_p) u_e^{(1)}$$

$$F_{hyst}^{(1)} = 20(0.08) + (100 - 20)(0.05)$$

$$F_{hyst}^{(1)} = 1.60 + 4.00 = 5.60 \text{ Tf}$$

Con este procedimiento se va generando una tabla de datos de la siguiente estructura

Paso	$u_0(\text{m})$	$\Delta_u(\text{m})$	$u_e^{prueba}(\text{m})$	$u_e(\text{m})$	$F_{hyst}(\text{Tf})$
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.08	0.08	0.08	0.05	5.60

Finalmente, con los valores de u_0 y los valores de F_{hyst} , se puede graficar el lazo de histéresis del modelo sin embargo no se requiere graficar un modelo estático del modelo bilineal con un solo ciclo completo si no mas bien realizar este grafico resolviendo la ecuación dinámica para instante de tiempo de un registro sísmico.

3.6.6.3. Ecuación dinámica no lineal para el sistema aislado

Con la definición no lineal del aislador clara se utiliza la ecuación de la dinámica de la siguiente forma:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + F_{ais}(t)e_0 = P(t)$$

Donde $F_{ais}(t)$ es la fuerza total del aislador compuesta por una parte histerética y otra viscosa

$$F_{ais}(t) = F_{hyst} + c_{ais}\dot{u}_0$$

Donde F_{hyst} es la fuerza no lineal bilineal que se obtiene para cada instante de tiempo como se ejemplifico anteriormente, c_{ais} es el amortiguamiento viscoso equivalente del aisladores y $\dot{u}_0$ la velocidad del grado de libertad de la base

3.6.7 OBTENCIÓN DE CORTANTES POR PISO

3.6.13.1. Mediante análisis modal espectral

Para la obtención de los cortantes por este método se calcula fuerza modal equivalente asociada a cada modo de vibración de la siguiente manera

$$F_r = \Gamma_r M \phi_r S_{a,r}$$

Donde:

- Γ_r : es el factor de participación modal del modo que se está analizando
- M : es la matriz de masas del sistema analizado
- ϕ_r : es el vector modal del modo que se está analizando
- $S_{a,r}$: es la aceleración espectral correspondiente al periodo del modo analizado

Además, el factor de participación modal, que es el único valor que esta pendiente por calcular se obtiene de la siguiente manera:

$$\Gamma_r = \frac{\phi_r^T M r}{\phi_r^T M \phi_r}$$

Donde r es el vector de influencia sísmica que para este caso como todos los grados de libertad se mueven para un mismo sentido es igual a una matriz de tamaño $(n \times 1)$, donde n es el número de pisos de la estructura. Una vez obtenidas todas las fuerzas modales se obtiene los cortantes acumulados por piso con la siguiente expresión

$$V_{r,k} = \sum_{i=k}^n F_{r,i}$$

De esta manera se obtiene un vector de cortantes por piso como se ejemplifica a continuación, suponiendo las fuerzas de cada modo

$$F_r = \begin{bmatrix} 40 \\ 30 \\ 20 \\ 10 \end{bmatrix}$$

Entonces a partir de esto se obtienen los cortantes modales

$$V_{r,1} = 40 + 30 + 20 + 10 = 100$$

$$V_{r,2} = 30 + 20 + 10 = 60$$

$$V_{r,3} = 20 + 10 = 30$$

$$V_{r,4} = 10$$

Dando el siguiente resultado de cortantes acumulados

$$V_r = \begin{bmatrix} 100 \\ 60 \\ 30 \\ 10 \end{bmatrix}$$

Finalmente se hace una combinación de los cortantes de todos los modos mediante SRSS

$$V_k = \sqrt{\sum_{r=1}^m V_{r,k}^2}$$

Para entender esta parte supongamos que tengo un total de 3 modos de la siguiente manera

$$V_{r1} = \begin{bmatrix} 100 \\ 60 \\ 30 \\ 10 \end{bmatrix}$$

$$V_{r2} = \begin{bmatrix} 20 \\ 15 \\ 8 \\ 3 \end{bmatrix}$$

$$V_{r3} = \begin{bmatrix} 10 \\ 7 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Con esto se puede realizar la combinación de la siguiente manera

$$V_1 = \sqrt{100^2 + 20^2 + 10^2} = 102.46$$

$$V_1 = \sqrt{60^2 + 15^2 + 7^2} = 62.24$$

$$V_1 = \sqrt{30^2 + 8^2 + 4^2} = 31.30$$

$$V_1 = \sqrt{10^2 + 3^2 + 2^2} = 10.63$$

De lo que finalmente se tiene el vector de los cortantes por cada piso

$$V = \begin{bmatrix} 102.46 \\ 62.24 \\ 31.30 \\ 10.63 \end{bmatrix} Tonf$$

3.6.13.2. *Mediante análisis tiempo historia*

En este método el cortante se obtiene por las fuerzas inerciales que se generan en el instante de tiempo analizado. Para cada instante de tiempo la fuerza inercial se la obtiene de la siguiente manera

$$F_i(t) = m_i a_i(t)$$

Donde m_i es la masas del piso numero i y $a_i(t)$ es la aceleración absoluta del piso numero i , finalmente igual que en el otro método se acumulan las fuerzas inerciales desde el nivel i hacia arriba

3.6.8 **OBTENCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES**

De la misma forma tiene dos metodologías de análisis que se utilizan como en los cortantes

3.6.8.1. *Mediante análisis modal espectral*

Para los desplazamientos mediante análisis modal se utiliza la siguiente expresión

$$q_r = \frac{\Gamma_r S_{a,r}}{\omega_r^2}$$

Con este valor que se obtiene para cada modo se calcula el vector de desplazamientos modales para cada modo con

$$u_r = \phi_r q_r$$

Una vez obtenidos los vectores de desplazamientos de cada uno de los modos igual que en los cortantes se realizan las combinaciones de los mismos por pisos con SRSS

$$u_k = \sqrt{\sum_{r=1}^m u_{r,k}^2}$$

3.6.8.2. *Mediante análisis tiempo historia*

En el análisis tiempo historia los desplazamientos se obtiene directo del proceso de integración de múltiples grados de libertad con el paso a paso de registro usado mediante Newmark

3.6.9 **OBTENCIÓN DE DERIVAS DE ENTREPISO**

Las derivas por entrepiso representan la deformación relativa entre dos niveles consecutivos de la estructura durante un evento sísmico. Este parámetro es uno de los indicadores más importantes del desempeño estructural, ya que permite evaluar el nivel de deformación que experimentan los elementos estructurales y no estructurales.

En este bloque, las derivas se obtienen directamente a partir de los desplazamientos laterales previamente calculados, tanto para el análisis modal espectral como para el análisis tiempo historia.

La deriva de cada piso se obtiene de la siguiente manera

$$\theta_i = \frac{|u_i - u_{i-1}|}{h_i - h_{i-1}}$$

Donde

- u_i es el desplazamiento lateral del nivel superior del entrepiso
- u_{i-1} es el desplazamiento lateral del nivel inferior
- h_i altura del nivel superior
- h_{i-1} altura del nivel inferior

El resultado de esto es adimensional que normalmente se expresa en porcentaje

3.7 POLÍTICA DE USO DE LA APLICACIÓN

El software desarrollado denominado ISO-LATE, así como su código fuente, archivos, documentación y recursos asociados, son de autoría del desarrollador de la presente investigación y se encuentran disponibles públicamente en el repositorio de GitHub correspondiente.

El acceso al código fuente y a los archivos del proyecto es de libre disponibilidad con fines académicos, educativos y de investigación, permitiendo su revisión, análisis y uso como referencia para trabajos relacionados con el análisis estructural y la simulación sísmica de estructuras.

Sin embargo, cualquier utilización total o parcial del código, metodologías implementadas o recursos del proyecto deberá realizarse citando la autoría correspondiente del desarrollo del software ISO-LATE, así como la referencia a la presente investigación cuando corresponda. El repositorio oficial del proyecto se encuentra disponible en el siguiente enlace:

<https://github.com/dierafgue/ISO-LATE>

Es importante mencionar que algunos de los códigos implementados dentro de la aplicación han sido desarrollados siguiendo metodologías y procedimientos descritos en bibliografía especializada, particularmente en textos de Análisis Sísmico de Anil K. Chopra, así como en recursos técnicos y académicos compartidos por el MSc. Ing. Carlos Andrés Celi Sánchez y el PhD. MSc. Ing. José Poveda.

De igual manera, parte de la lógica de implementación del análisis estructural y sísmico se fundamenta en los conocimientos adquiridos durante las clases de Análisis Sísmico dictadas por el Ing. Juan Fernando Quiroz Alonso.

Adicionalmente, varios de los códigos implementados dentro de la aplicación fueron revisados, optimizados y depurados con el apoyo de herramientas de inteligencia artificial, particularmente mediante el uso de ChatGPT desarrollado por OpenAI, el cual fue utilizado como herramienta de asistencia para mejorar la estructura de programación, optimización de algoritmos y revisión de errores dentro del desarrollo del software.

Esta política tiene como objetivo promover la difusión del conocimiento, la reproducibilidad de los resultados y el uso responsable del software desarrollado en el presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Como se explicó anteriormente, la aplicación ISO-LATE realiza el análisis para estructuras en 2D, por tal motivo se va a utilizar una estructura de 9 pisos y 4 vanos. El primer piso tendrá una altura de entrepiso de 3.00 metros y los demás pisos tendrán 2.80 metros, además los vanos tendrán una longitud de 4.50 metros.

Es importante aclarar que el programa puede utilizar n pisos para su análisis y n vanos, sin embargo, ISO-LATE se ha limitado al uso de 20 pisos y 6 vanos, principalmente por el gasto de cálculo del mismo, ya que al ser alojado en servicios en línea gratuitos este es más lento que en un procesador propio. Además, para optimizar el tamaño de los gráficos se ha tomado esta decisión.

En tema de materiales se utilizará un hormigón de 240 kg/cm², para de este obtener el módulo de elasticidad, el cual se va a calcular con la fórmula indicada en la normativa ACI 318-19.

$$E_c = 15100\sqrt{f'_c}$$

$$E_c = 15100\sqrt{240}$$

$$E_c = 233928.1941 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

$$E_c = 2339281.941 \text{ [Tonf/m}^2\text{]}$$

El peso específico del hormigón para los elementos estructurales, el cual sirve para poder calcular el peso y por lo tanto la masa, será el siguiente:

$$\gamma = 2.4028 \text{ [Tonf/m}^3\text{]}$$

Se utilizará una carga adicional de 2 Tonf/m como ejemplo didáctico.

4.1.1 GEOMETRÍA Y CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL

Se ha realizado un predimensionamiento rápido para los elementos estructurales. Primero para las vigas de la estructura, sabiendo que se ha destinado una luz entre vanos de 4.50 metros, se tiene lo siguiente:

$$h_{viga} = \frac{L}{10} = \frac{4.50}{10} = 45 \text{ cm} \approx 50 \text{ cm}$$

$$b_{viga} = 30 \text{ cm}$$

Por tal motivo se utiliza una sección de vigas de 30 x 50 centímetros.

Ahora, sabiendo que las vigas tienen un ancho de 30 centímetros y conociendo que las columnas mínimas según normativa que se pueden utilizar son de 30 x 30 centímetros, se utilizarán columnas de 40 x 40 centímetros de sección.

4.1.2 PROPIEDADES DE MASA Y RIGIDEZ DEL SISTEMA

Para generar las propiedades de masa, o mejor dicho armar la matriz de masas concentradas en una por nivel de piso, se utilizan los elementos estructurales, el peso específico del material y los nudos (para evitar conteos de peso). Además, se distribuye el peso de la mitad de cada piso a su punto medio, es decir, se lo considera como peso colaborante por piso.

De esta manera se llega a obtener los valores en unidades de masa ingenieril, como lo sería:

$$[Tf \cdot s^2/m]$$

Para la rigidez del sistema se utiliza la matriz de rigidez de cada elemento completo con la siguiente estructura:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} AE/L & 0 & 0 & -AE/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -AE/L & 0 & 0 & AE/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix}$$

Como se puede ver, esta matriz es el modelo que ignora por completo las deformaciones por corte en cada elemento, y de esta manera se llega a tener la rigidez y cada grado de libertad para armar la matriz global.

Es importante aclarar que la aplicación ISO-LATE modela pórticos en 2D asumiendo que existe un diafragma rígido por nivel, lo cual concentra los

desplazamientos horizontales en un solo grado de libertad, así como las masas de cada nodo en un punto específico.

Por tal motivo, el modelo tiene:

- 1 GDL horizontal (U_x) por cada nivel
- 2 GDL por nodo (U_y y θ)

De esta manera se genera la matriz de rigidez global, la cual posteriormente se condensa hasta poder llegar únicamente a 1 GDL (U_x) por cada piso, que es el comportamiento que se desea analizar.

Es importante aclarar que de esta forma se busca condensar un modelo equivalente tipo “péndulo invertido”, sin perder la información proveniente de un modelo estructural más completo.

Con todas estas propiedades y definiciones claras se procede a modelar este pórtico 2D en cada uno de los programas para poder comparar datos y diferencias entre ISO-LATE y un programa de carácter profesional y altamente reconocido como el software comercial que se va a utilizar.

4.2 MODELACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL EN ISO-LATE

Se modela el pórtico en base a lo anteriormente definido en la interfaz de ISO-LATE, lo cual se puede ver a continuación.

Figura 14

Ingreso de datos en la aplicación ISO-LATE

ISO-LATE

EN ES

General structural model parameters

Define geometry, sections and material properties for the base model.

Geometry

Number of stories: 9
Number of bays: 4
Allowed ranges: stories 1-20 | bays 1-6

Bay length [m]: 4.50
1st story height [m]: 3.00
Typical story height [m]: 2.80

Section properties

☐ Advanced mode

Basic mode (dimensions in cm)

Column
Column width [cm]: 40.00
Column depth [cm]: 40.00

Beam
Beam width [cm]: 30.00
Beam depth [cm]: 50.00

Material and loads

Elastic modulus E [Tf/m²]: 2339281.94
Unit weight [Tf/m³]: 2.4028

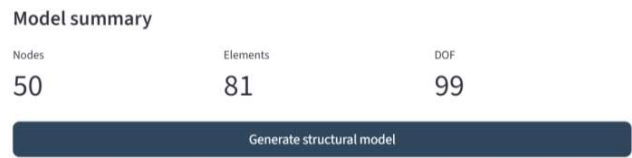
Loads
Additional dead load [Tf/m]: 2.00
Damping C (%): 5.00

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.2.1 IDEALIZACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

Como anteriormente se indicó, el programa utiliza un modelo con diafragmas rígidos por piso y además de esto solo tiene dos grados de libertad por nodo “Uy” y “θ”, por tal motivo se genera el modelo estructural en la aplicación con los siguientes datos:

Figura 15
Resumen de datos en modelo estructural

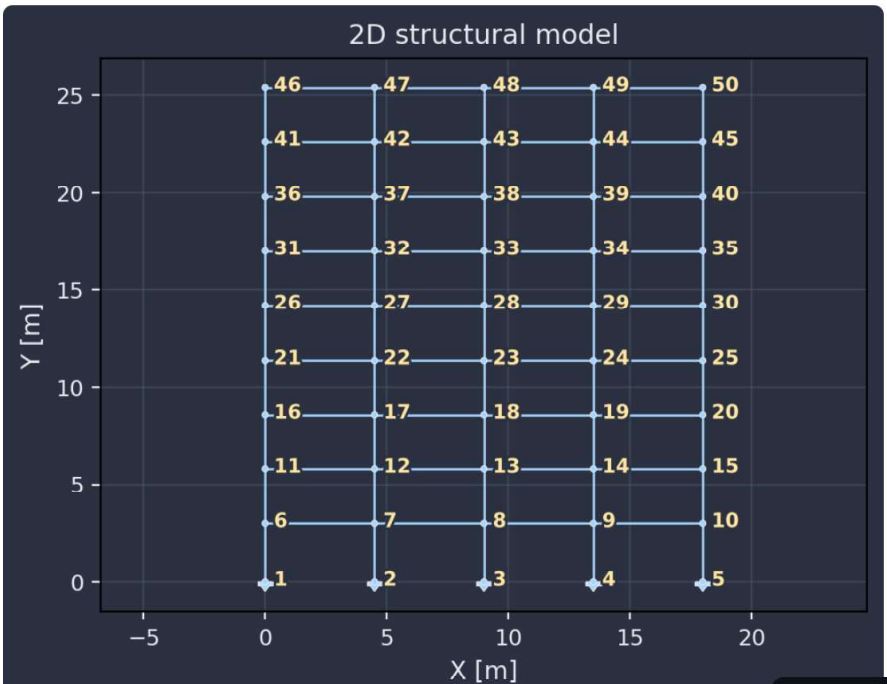


Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

La aplicación indica que se tiene un total de 50 nodos en la estructura, lo cual es correcto. Como se indicó anteriormente, son 9 pisos y 4 vanos, lo cual da un total de 5 elementos verticales por piso.

Por tal motivo se tiene 5 nodos por piso, y como existen 9 pisos más el nivel de base, se tiene un total de 10 niveles, lo que da como resultado 50 nodos en total.

Figura 16
Modelo 2D de la estructura - ISO-LATE



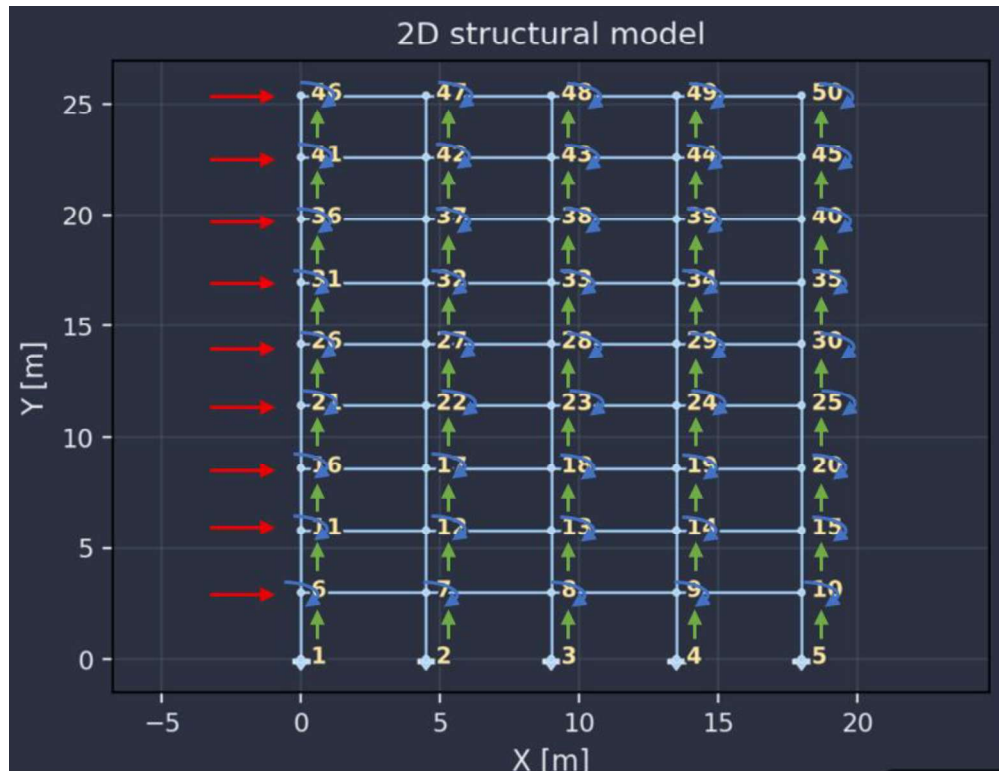
Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Además de esto aparecen 81 elementos estructurales, como se puede observar en el diagrama 2D mostrado a continuación.

Asimismo, los grados de libertad serían los indicados en el siguiente esquema, que dan un total de 99 GDL.

Figura 17

Grados de libertad de estructuras en ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Como se observa:

- en color rojo los desplazamientos horizontales “Ux” por cada nivel,
- en verde los desplazamientos verticales “Uy”,
- en azul las rotaciones “θ”.

Esto da el total de grados de libertad que el programa indica en su reporte.

Por tal motivo se puede verificar que está correctamente contabilizado el número de elementos para el proceso de ISO-LATE. Además, se verifica la matriz global de la estructura, la cual tiene una dimensión de 99×99 , lo cual coincide con el número de

grados de libertad de la estructura, además de cumplir con la simetría característica de una matriz de rigidez.

Figura 18
Matriz global de estructura - ISO-LATE

Dimensión: (99, 99)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
730.057	-13640.128	0	0	0	0	0	0	0	
-13640.128	27280.256	-13640.128	0	0	0	0	0	0	
0	-13640.128	27280.256	-13640.128	0	0	0	0	0	
0	0	-13640.128	27280.256	-13640.128	0	0	0	0	
0	0	0	-13640.128	27280.256	-13640.128	0	0	0	
0	0	0	0	-13640.128	27280.256	-13640.128	0	0	
0	0	0	0	0	-13640.128	27280.256	-13640.128	0	

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Así mismo se tiene la matriz de rigidez ya condensada con el número de grados de libertad horizontales, para tener únicamente el modelo equivalente tipo “péndulo invertido”, y de la misma forma la matriz de masas, ambas con una dimensión de 9×9 , como se puede ver a continuación.

Figura 19
Matriz condensada - ISO-LATE

Dimensión: (9, 9)

0	1	2	3	4	5	6	7	8
22141.898	-13310.091	2534.242	-334.967	47.458	-6.931	1.741	-3.317	14.663
-13310.091	22120.576	-13302.339	2530.355	-334.083	47.078	-6.485	-1.715	13.041
2534.242	-13302.339	22118.274	-13301.636	2530.129	-334.169	47.488	-9.861	14.481
-334.967	2530.355	-13301.636	22118.023	-13301.644	2529.965	-333.63	43.397	8.259
47.458	-334.083	2530.129	-13301.644	22117.964	-13301.673	2529.915	-334.213	52.279
-6.931	47.078	-334.169	2529.965	-13301.673	22117.209	-13298.202	2507.107	-261.453
1.741	-6.485	47.488	-333.63	2529.915	-13298.202	22099.401	-13178.106	2137.783
-3.317	-1.715	-9.861	43.397	-334.213	2507.107	-13178.106	21229.211	-10251.179
14.663	13.041	14.481	8.259	52.279	-261.453	2137.783	-10251.179	8265.7

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Figura 20
Matriz de masas - ISO-LATE

0	1	2	3	4	5	6	7	8
4.8422	0	0	0	0	0	0	0	0
0	4.8226	0	0	0	0	0	0	0
0	0	4.8226	0	0	0	0	0	0
0	0	0	4.8226	0	0	0	0	0
0	0	0	0	4.8226	0	0	0	0
0	0	0	0	0	4.8226	0	0	0
0	0	0	0	0	0	4.8226	0	0
0	0	0	0	0	0	0	4.8226	0
0	0	0	0	0	0	0	0	4.8226
0	0	0	0	0	0	0	0	4.5481

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.2.2 PROPIEDADES DE RIGIDEZ DEL SISTEMA

Se verifica la rigidez de cada piso mediante la rigidez en paralelo de los elementos verticales por nivel. Se realiza el ejemplo para la primera planta para ejemplificar lo que realiza ISO-LATE.

$$I_{col} = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.40^4}{12} = 0.0021333 \text{ m}^4$$

$$K_{1er\ piso} = \frac{12EI}{L^3} \cdot N^{\circ} = \frac{12 \cdot 2339281.941 \cdot 0.0021333}{3.0^3} \cdot 5 = 11089.92 \text{ [Tf/m]}$$

Como se puede ver a continuación, **ISO-LATE** realiza este cálculo automáticamente para que el usuario pueda comprobar esta rigidez, y de esta manera se obtiene la siguiente tabla.

Figura 21
Comprobación rápida de rigideces en piso ISO-LATE

	Story	k_model	k_aprox	ratio
0	1	8831.8075	11089.9292	0.796
1	2	13310.0906	13640.1279	0.976
2	3	13302.3394	13640.1279	0.975
3	4	13301.6359	13640.1279	0.975
4	5	13301.6436	13640.1279	0.975
5	6	13301.6734	13640.1279	0.975
6	7	13298.2018	13640.1279	0.975
7	8	13178.1055	13640.1279	0.966
8	9	10251.1786	13640.1279	0.752

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con estos detalles el programa genera el modelo estructural tanto para el sistema fijo como para el sistema aislado, para posteriormente realizar los análisis correspondientes con los esquemas que se pueden observar a continuación.

Figura 22

Modelos de péndulo invertido para estructura fija y para estructura aislada



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

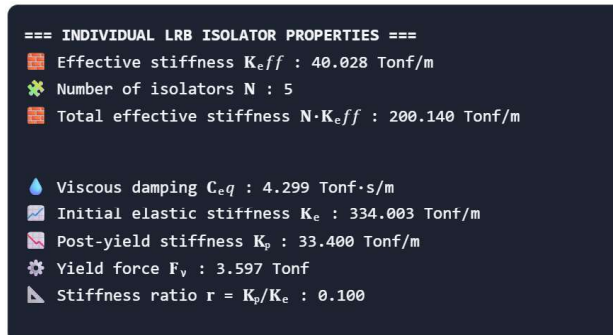
4.2.3 PROPIEDADES DE AISLADOR DE BASE

En cuanto al cálculo de las propiedades óptimas que serán utilizadas en los aisladores de base para el modelo estructural seleccionado, se sigue el proceso estipulado en el punto 2.10.1, el cual sigue los lineamientos de la normativa ASCE 7.

Este proceso se utiliza dentro del programa de manera iterativa, tomando datos de la estructura como base y algunas asunciones iniciales para poder diseñar automáticamente las propiedades más adecuadas para el aislador de base.

Figura 23

Propiedades ca aislador ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

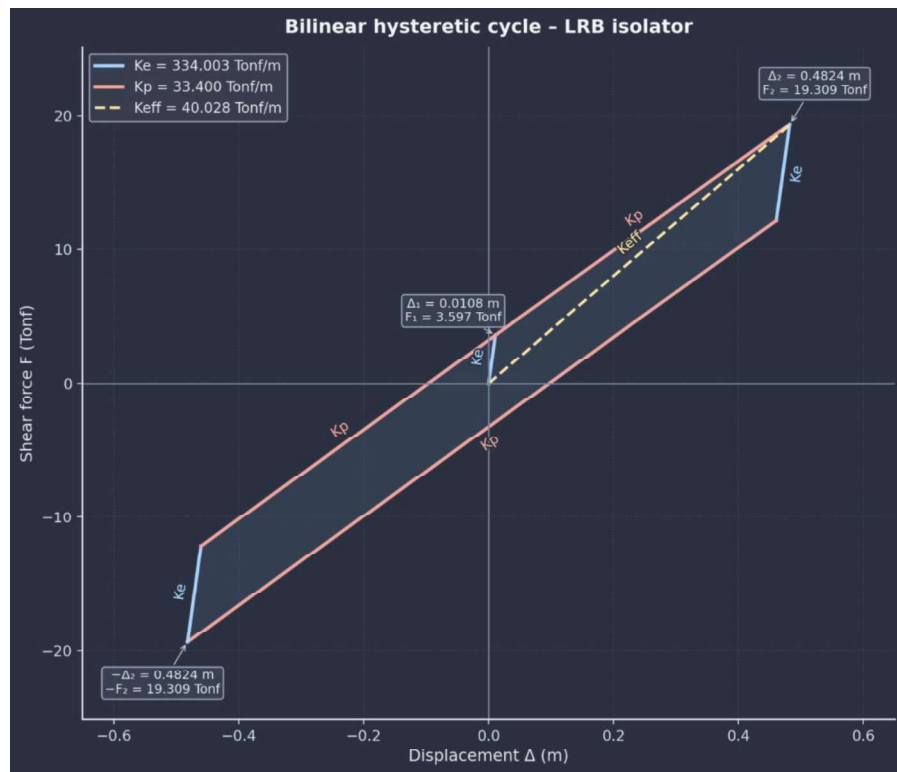
Con las propiedades obtenidas del proceso mencionado se genera el modelo de histéresis del aislador (para un aislador equivalente), en donde se pueden identificar las siguientes propiedades:

- $K_e \rightarrow$ rigidez del núcleo de plomo
- $K_p \rightarrow$ rigidez del caucho
- $K_{eff} \rightarrow$ rigidez efectiva del sistema

Estas propiedades permiten definir el comportamiento bilineal del aislador. Además, el área interna del ciclo de histéresis representa la energía disipada durante el movimiento sísmico.

Figura 24

Modelo de histéresis bilineal para aislador - ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.2.4 REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTRO NEC24

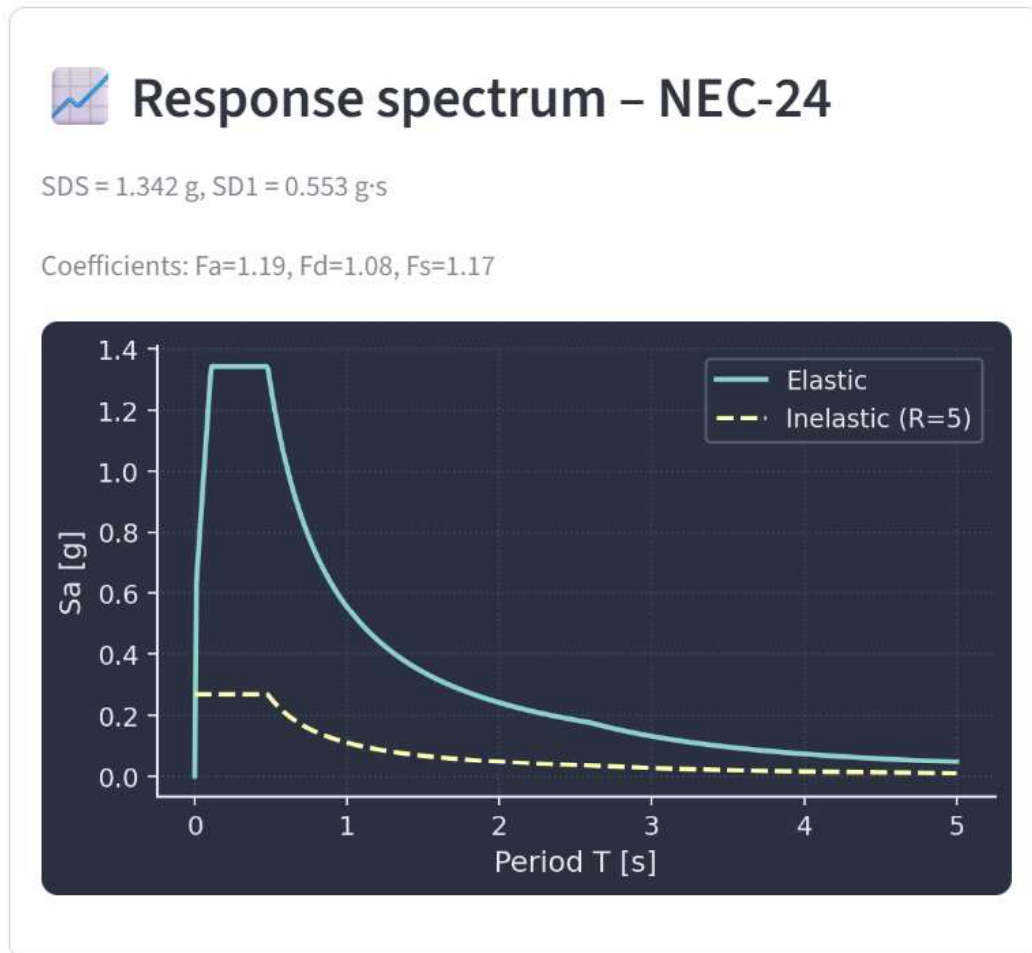
La estructura está implantada en un lugar que tiene un coeficiente de intensidad sísmica $z = 0.47$ en un suelo tipo C.

Además, el tipo de estructura corresponde a una estructura de importancia I, ubicada en la zona sísmica IV, con un factor de reducción de resistencia $R = 5$.

Con estos datos se elabora el espectro de diseño según la NEC-24, el cual será utilizado para el análisis modal espectral de la estructura.

Figura 25

Espectro de diseño NEC24 - ISO-LATE

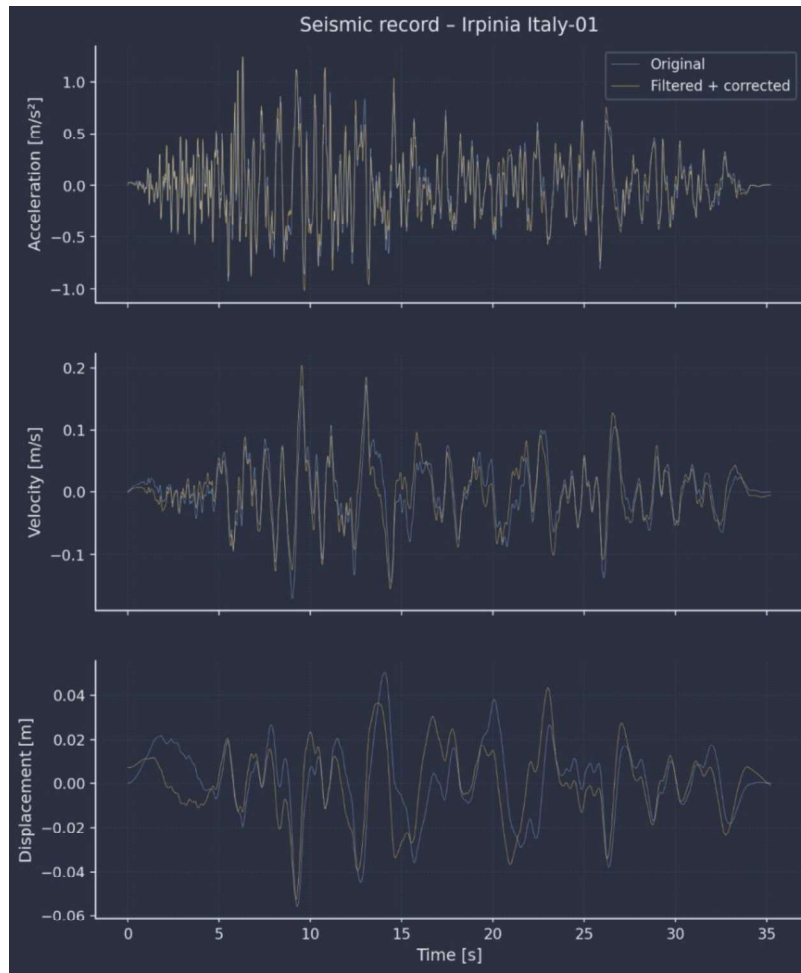


Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Además, para el análisis tiempo-historia lineal se debe utilizar un registro sísmico real. Para este caso se utilizará un registro proveniente de la base de datos del PEER, específicamente del terremoto de Irpinia de 1980.

Este registro se filtra para eliminar frecuencias contaminadas y además se corrige la línea base, eliminando las derivas que pueden aparecer debido a errores de medición en los equipos acelerográficos.

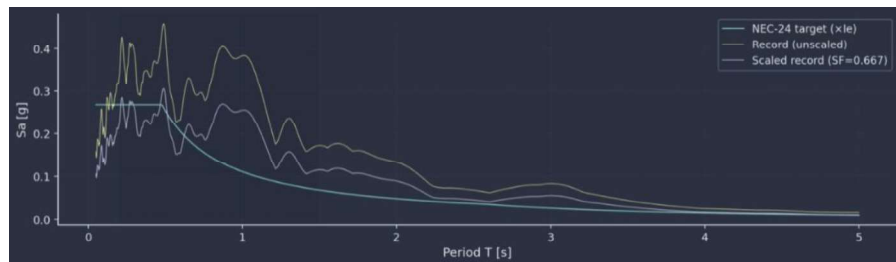
Figura 26
Carga y corrección de registros sísmicos - ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con esto definido se puede escalar el espectro del registro sísmico calculado para períodos de hasta 5 segundos, teniendo como objetivo ajustarlo al espectro inelástico de la NEC-24.

Figura 27
Escalado de registro sísmico - ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con estos detalles se tienen listos los datos necesarios para poder compararlos con el software de cálculo profesional, y para poder modelarlos e ingresarlos de una manera más sencilla, permitiendo verificar la precisión de la aplicación ISO-LATE.

4.3 MODELACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL EN SOFTWARE COMERCIAL

Para el modelado del sistema estructural en el software comercial se sigue el siguiente procedimiento, el cual va adaptado para poder comparar de la manera más fiel modelos muy parecidos entre los dos programas.

4.3.1 DEFINICIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

Se ingresan los datos anteriormente definidos para el modelo estructural, como son distancias, alturas y número de vanos y pisos para cada uno de los elementos utilizados.

Figura 28
Ingreso de datos en software comercial

The screenshot shows a software interface for defining structural model dimensions. It is divided into three main sections:

- Grid Dimensions (Plan):** This section has two radio buttons:
 - Uniform Grid Spacing:** Selected. It includes input fields for:
 - Number of Grid Lines in X Direction: 5
 - Number of Grid Lines in Y Direction: 1
 - Spacing of Grids in X Direction: 4.5 m
 - Spacing of Grids in Y Direction: 1 m
 - Specify Grid Labeling Options: Grid Labels...
 - Custom Grid Spacing:** Unselected. It includes a button: Specify Data for Grid Lines Edit Grid Data...
- Story Dimensions:** This section has two radio buttons:
 - Simple Story Data:** Selected. It includes input fields for:
 - Number of Stories: 9
 - Typical Story Height: 2.8 m
 - Bottom Story Height: 3 m
 - Custom Story Data:** Unselected. It includes a button: Specify Custom Story Data Edit Story Data...
- Add Structural Objects:** This section shows a row of eight icons representing different structural elements:
 - Blank
 - Grid Only
 - Steel Deck
 - Staggered Truss
 - Flat Slab
 - Flat Slab with Perimeter Beams
 - Waffle Slab
 - Two Way or Ribbed Slab

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Una vez definido el sistema de coordenadas que se utilizará para el modelo estructural, como primer paso se define el material anteriormente establecido, obteniéndose lo siguiente:

Figura 29
Ingreso de materiales en el software comercial

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con el material listo y definido se pueden empezar a definir los elementos tipo frame necesarios para elementos verticales (columnas) y elementos horizontales (vigas), como se puede observar a continuación.

Figura 30
Definición de columnas en software comercial

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Figura 31
Definición de vigas en software comercial

General Data

Property Name: VIG

Material: 240 kN/cm²

Notional Size Data: Modify/Show Notional Size...

Display Color: Change...

Notes: Modify/Show Notes...

Shape

Section Shape: Concrete Rectangular

Section Property Source

Source: User Defined

Section Dimensions

Depth: 0.5 m

Width: 0.3 m

Property Modifiers

Modify/Show Modifiers...
 Currently User Specified

Reinforcement

Modify/Show Rebar...

Show Section Properties...

☐ Include Automatic Rigid Zone Area Over Column

OK
 Cancel

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Además, se aclara que, como en ISO-LATE se utilizan matrices sin considerar las deformaciones por corte, se debe hacer lo mismo en el software comercial para poder tener coherencia al comparar los datos. Por tal motivo, tanto para vigas como para columnas se modifican las propiedades de las secciones a fin de dejar sin efecto la deformación por corte, como se puede ver a continuación.

Figura 32
Modificación de propiedades de corte en software comercial

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

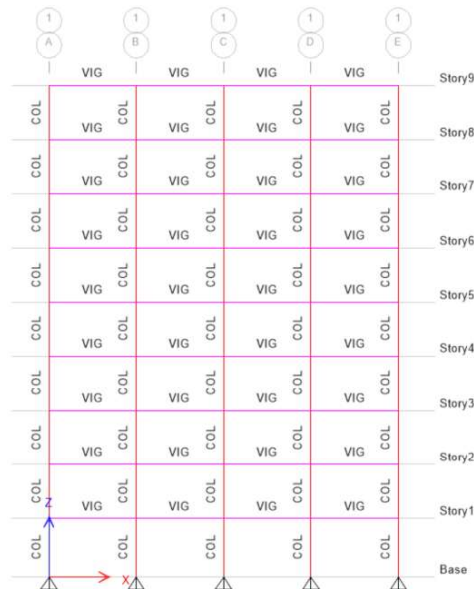
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	0
Shear Area in 3 direction	0
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	1
Moment of Inertia about 3 axis	1
Mass	1
Weight	1

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con todo esto definido se dibuja y estructura el modelo 2D de la estructura que se va a analizar.

Figura 33

Modelo estructural en software comercial

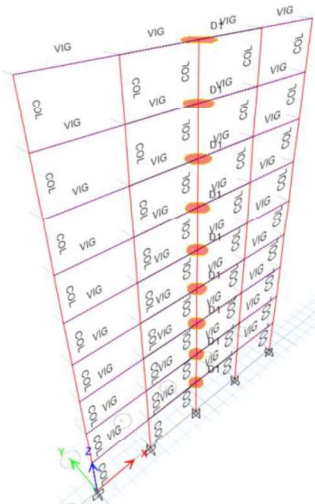


Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Posteriormente se asignan diafragmas rígidos en cada uno de los niveles y además los nodos de la base se empotran, puesto que por defecto el programa los asigna como apoyos simples.

Figura 34

Asignación de diafragmas y condiciones de apoyo en software comercial



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con esto asignado se tiene una estructura equivalente a la utilizada en ISO-LATE. Finalmente se asigna la carga lineal en las vigas, tal como se lo hizo en la aplicación.

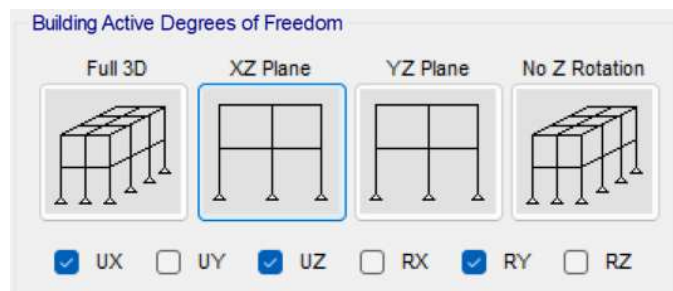
Figura 35
Asignación de carga distribuida en software comercial



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Un último punto importante es indicar al programa que se va a realizar un análisis en 2D, es decir, que solo existen grados de libertad posibles en sentido X y Z, restringiendo los demás grados de libertad del modelo.

Figura 36
Configuración del análisis en 2D



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

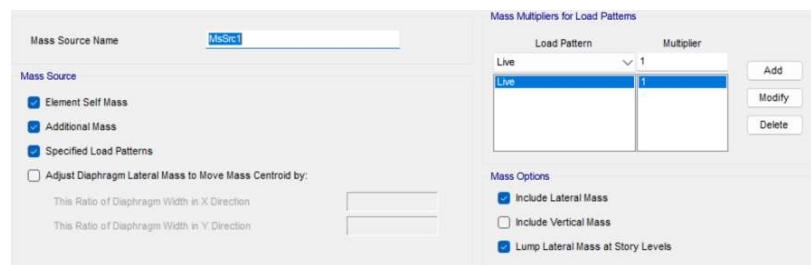
4.3.2 DEFINICIÓN DE MASAS

Para establecer la masa que va a entrar en el cálculo y análisis modal de la estructura se debe tomar en cuenta que sean las mismas definiciones y concepciones utilizadas en la aplicación ISO-LATE.

Como se definió anteriormente, la carga de 2 Tonf/m se agregó en los elementos horizontales de vigas como carga distribuida, pero como otro tipo de patrón de carga. De esta manera se definen en el software las fuentes de masa que se van a utilizar.

Figura 37

Definición de fuentes de masa en software comercial



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

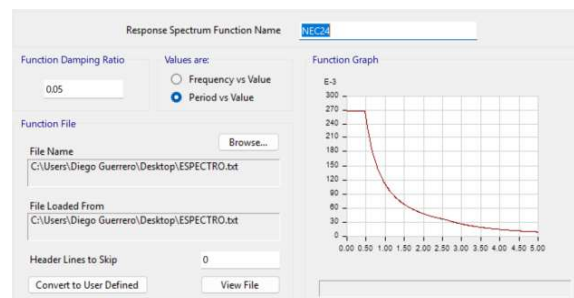
4.3.3 DEFINICIÓN DEL ESPECTRO NEC24

El espectro generado utilizando la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-24) y los parámetros anteriormente definidos se ingresa de igual forma como archivo de datos en el software comercial.

Para esto se ha utilizado la herramienta de descarga de datos de la aplicación ISO-LATE, lo que permite mantener exactamente los mismos valores del espectro utilizado en la aplicación.

Figura 38

Ingreso del espectro NEC-24 en software comercial



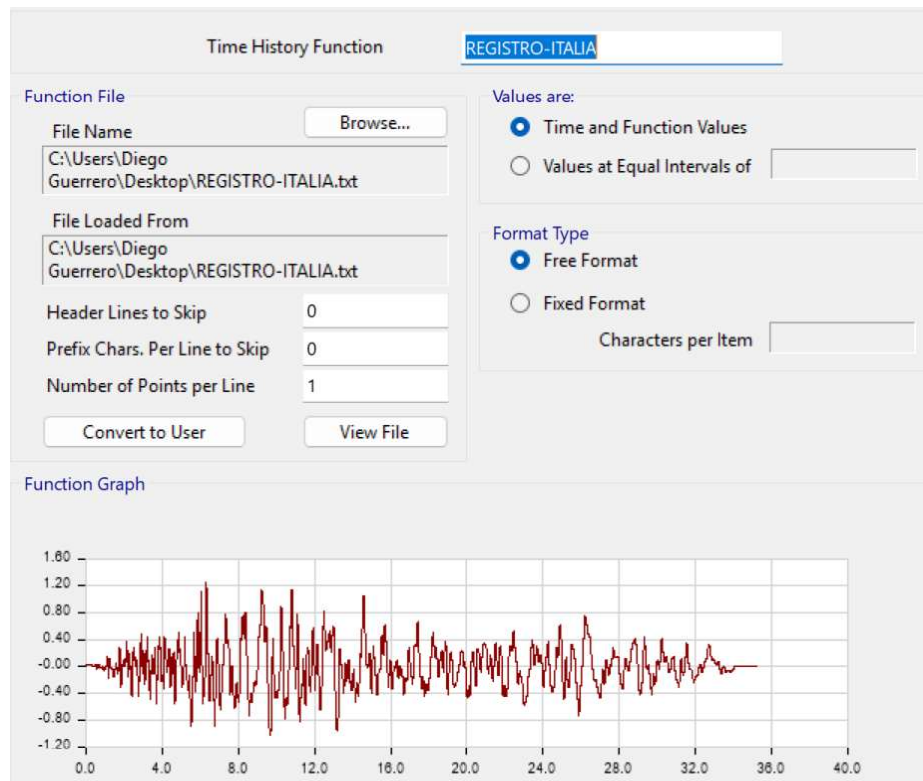
Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.3.4 DEFINICIÓN DE REGISTRO SÍSMICO

De la misma manera se ingresa en el software comercial el registro sísmico a utilizar, debidamente filtrado y corregido. El registro se ha ingresado utilizando la herramienta de descarga de datos de la aplicación ISO-LATE.

Figura 39

Ingreso del registro sísmico en software comercial



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.3.5 DEFINICIÓN DE ELEMENTOS TIPO LINK

Los elementos tipo link en el software comercial se definen utilizando las propiedades obtenidas en el diseño del aislador tipo LRB de la aplicación ISO-LATE.

Para esto se ingresan los mismos datos obtenidos, tomando en cuenta que se lo va a diseñar como un aislador de caucho, en donde:

- la dirección U1 (axial) se deja empotrada,
- la dirección U2 es la que se utilizará para el análisis en la dirección X del pórtico,
- la dirección U3 y las rotaciones no se activan.

Figura 40
Definición de propiedades del aislador en software comercial

General

Link Property Name

LRB

P-Delta Parameters

Modify/Show...

Link Type

Rubber Isolator

Acceptance Criteria

Modify/Show...

Link Property Notes

Modify/Show Notes...

None specified

Total Mass and Weight

Mass

0

tonf-s²/m

Rotational Inertia 1

0

tonf-m-s²

Weight

0

tonf

Rotational Inertia 2

0

tonf-m-s²

Rotational Inertia 3

0

tonf-m-s²

Factors for Line and Area Springs

Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property

1

m

Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property

1

m²

Directional Properties

Direction

Fixed

NonLinear

Properties

☒ U1

☒

☐

Modify/Show for U1...

☒ U2

☐

☒

Modify/Show for U2...

☐ U3

☐

☐

Modify/Show for U3...

☐ R1

☐

☐

Modify/Show for R1...

☐ R2

☐

☐

Modify/Show for R2...

☐ R3

☐

☐

Modify/Show for R3...

Fix All

Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases

Effective Stiffness from Zero, Else Nonlinear

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping

Initial Stiffness (K0)

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor

1

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Como se puede observar, se ingresan en el software exactamente las mismas propiedades del modelo bilineal diseñado en ISO-LATE.

Figura 41
Definición de propiedades no lineales del aislador en software comercial

Identification

Property Name

LRB

Direction

U2

Type

Rubber Isolator

NonLinear

Yes

Linear Properties

Effective Stiffness

40.028

tonf/m

Effective Damping

4.299

tonf-s/m

Shear Deformation Location

Distance from End-J

0

m

Nonlinear Properties

Stiffness

334.003

tonf/m

Yield Strength

3.597

tonf

Post Yield Stiffness Ratio

0.1

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.3.6 PARÁMETROS DE ANÁLISIS UTILIZADOS

Para poder realizar una comparativa consistente con los métodos de análisis utilizados en ISO-LATE, se crean algunos casos de carga para que estos tengan coherencia de análisis.

Para el análisis modal espectral se define un caso de carga de este tipo, en donde la aceleración utilizada corresponde al espectro de respuesta cargado de la NEC-24. Este espectro, al estar en función de la gravedad, se debe multiplicar por un factor de escala de 9.81 m/s^2 para que las unidades sean consistentes.

Además, se recalca que no se debe dividir para 5, puesto que el espectro ya se ha obtenido directamente desde ISO-LATE como espectro inelástico.

Figura 42

Caso de carga modal espectral en software comercial

The screenshot shows a software interface for defining a modal spectral load case. It is organized into three main sections:

- General:** Contains fields for 'Load Case Name' (RSA), 'Load Case Type' (Response Spectrum), 'Mass Source' (Previous (MsSrc1)), and 'Analysis Model' (Default). There are 'Design...' and 'Notes...' buttons.
- Loads Applied:** Contains a table with columns 'Load Type', 'Load Name', 'Function', and 'Scale Factor'. The table has one row: Acceleration, U1, NEC24, 9.8067. There are 'Add', 'Delete', and 'Advanced' (checkbox) buttons.
- Other Parameters:** Contains fields for 'Modal Load Case' (Modal), 'Modal Combination Method' (SRSS), 'Include Rigid Response' (checkbox), 'Rigid Frequency, f1', 'Rigid Frequency, f2', 'Periodic + Rigid Type', 'Earthquake Duration, td', 'Directional Combination Type' (SRSS), 'Absolute Directional Combination Scale Factor', 'Modal Damping' (Constant at 0.05), and 'Diaphragm Eccentricity' (0 for All Diaphragms). There are 'Modify/Show...' buttons for the last two fields.

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Además, se crea un caso de carga de tipo tiempo-historia lineal, el cual servirá para analizar las respuestas en el tiempo del registro sísmico y otras comparaciones que utilizarán como base este tipo de análisis.

Es importante aclarar que ISO-LATE utiliza integración directa mediante el método β de Newmark, por lo que se selecciona el mismo método en el software comercial para mantener consistencia en los resultados.

De igual manera, el amortiguamiento del sistema se define mediante amortiguamiento de Rayleigh, calculando los coeficientes α y β a partir de los dos primeros períodos del sistema y del amortiguamiento utilizado.

Finalmente se carga la aceleración del registro sísmico del evento de Italia, el cual ya se encuentra corregido y filtrado, pero al estar expresado en función de la gravedad se debe aplicar nuevamente el factor de aceleración correspondiente.

Nota: Es importante aclarar que este caso de carga cambia los coeficientes de amortiguamiento en el análisis tiempo-historia tanto para la estructura de base fija como para la estructura con base aislada.

Figura 43
Caso de carga tiempo historia fija en software comercial

General

Load Case Name

THA-FIG

Design...

Load Case Type/Subtype

Time History

Linear Direct Integration

Notes...

Mass Source

MsSrc1

Analysis Model

Default

P-Delta/Nonlinear Stiffness

☒ Use Preset P-Delta Settings

None

Modify/Show...

☐ Use Nonlinear Case (Loads at End of Case NOT Included)

Nonlinear Case

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	REGISTRO-ITALIA	1

Add

Delete

☐ Advanced

Other Parameters

Number of Output Time Steps

14672

Output Time Step Size

0.0024

sec

Damping

Mass: 0.4286; Stiff: 0.0043; Modal: No

Modify/Show...

Time Integration

Newmark

Modify/Show...

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Figura 44
Caso de carga tiempo historia aislado en software comercial

General

Load Case Name

THA-AIS

Design...

Load Case Type/Subtype

Time History

Linear Direct Integration

Notes...

Mass Source

MsSrc1

Analysis Model

Default

P-Delta/Nonlinear Stiffness

☒ Use Preset P-Delta Settings

None

Modify/Show...

☐ Use Nonlinear Case (Loads at End of Case NOT Included)

Nonlinear Case

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	REGISTRO-ITALIA	1

AddDelete

☐ Advanced

Other Parameters

Number of Output Time Steps

14672

Output Time Step Size

0.0024

sec

Damping

Mass: 0.1681; Stiff: 0.0072; Modal: No

Modify/Show...

Time Integration

Newmark

Modify/Show...

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con todos estos datos ingresados se puede verificar que existe consistencia con la configuración utilizada en ISO-LATE, por lo tanto, el modelo se encuentra correctamente definido en el software comercial y se puede realizar una comparación clara y confiable entre ambos programas.

Figura 45
Coeficientes de Rayleigh – ISO-LATE

FIXED				ISOLATED			
α	β	ζ	Duration	α	β	ζ	Duration
4.286e-01	4.342e-03	0.050	35.21	1.681e-01	7.180e-03	0.050	35.21
↑ 1/s	↑ s		↑ s	↑ 1/s	↑ s		↑ s
Download Excel data				Download Excel data			

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.4 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DINAMICAS DEL SISTEMA

Con todos los parámetros listos y definidos anteriormente para que tanto los modelos de ISO-LATE como los modelos en el software comercial se puedan comparar, se procede a verificar los resultados de ambos programas y compararlos entre sí con el fin de observar cuál es el error que tiene ISO-LATE frente a programas profesionales.

4.4.1 COMPARACIÓN DE PERÍODOS Y FRECUENCIAS

Se han obtenido los períodos y frecuencias de ambos programas para compararlos entre sí de manera ilustrativa en la siguiente tabla para el modelo de base fija.

Tabla 9
Modelo de base fija - Análisis modal

MODO	Frecuencias (Hz)		% error	Períodos (s)		% error
	ISO-LATE	Software		ISO-LATE	Software	
1	0.90621	0.90621	0	1.1035	1.1035	0
2	2.75948	2.75949	0.00036	0.36239	0.36239	0
3	4.75298	4.75299	0.00021	0.21039	0.21039	0
4	6.84086	6.84087	0.00015	0.14618	0.14618	0
5	9.04142	9.04143	0.00011	0.1106	0.1106	0
6	11.27585	11.2759	0.00018	0.08869	0.08868	0.01128
7	13.41251	13.4125	0.00015	0.07456	0.07456	0
8	15.23366	15.2337	0.00013	0.06564	0.06564	0
9	16.4818	16.4818	0.00012	0.06067	0.06067	0

Nota. Tomado de (Guerrero Diego, 2025)

Como se puede ver, tanto los períodos como las frecuencias, las cuales son dependientes entre sí, en ambos programas son prácticamente iguales. Existen errores muy pequeños que prácticamente pueden atribuirse a errores de redondeo, ya que se están utilizando únicamente cinco decimales en cada uno de los valores.

El máximo error, como se puede observar, se presenta en el período del modo 6, con un error aproximado del 0.01%, lo cual es totalmente aceptable para el rango de precisión utilizado en la aplicación. Por lo tanto, se puede considerar que los resultados obtenidos por ISO-LATE son consistentes con los obtenidos en el software comercial.

Ahora, en cuanto a la estructura aislada, se tiene la siguiente tabla.

Tabla 10*Modelo de base aislada - Análisis modal*

MODO	Frecuencias (Hz)		% error	Períodos (s)		% error
	ISO-LATE	Software		ISO-LATE	Software	
1	0.3112	0.3112	0	3.21337	3.21338	0.00031
2	1.9056	1.9056	0	0.52477	0.52477	0
3	3.87863	3.87863	0	0.25782	0.25782	0
4	5.95456	5.95457	0.00017	0.16794	0.16794	0
5	8.1527	8.15271	0.00012	0.12266	0.12266	0
6	10.4123	10.4123	0.00019	0.09604	0.09604	0
7	12.61418	12.6142	0.00024	0.07928	0.07928	0
8	14.54258	14.5426	0.00028	0.06876	0.06876	0
9	15.95239	15.9524	0.00031	0.06269	0.06269	0
10	16.70904	16.7091	0.00024	0.05985	0.05985	0

Nota. Tomado de (Guerrero Diego, 2025)

Del mismo modo, en este modelo aislado se obtienen resultados prácticamente iguales. Se puede observar que el error más grande es aproximadamente del 0.00031%, lo cual, como se puede apreciar, es prácticamente un error de redondeo.

Por lo tanto, también se puede considerar aceptable este nivel de error, observándose que ISO-LATE presenta resultados prácticamente iguales a los obtenidos en un software comercial, obviamente dentro de las limitaciones propias de la aplicación.

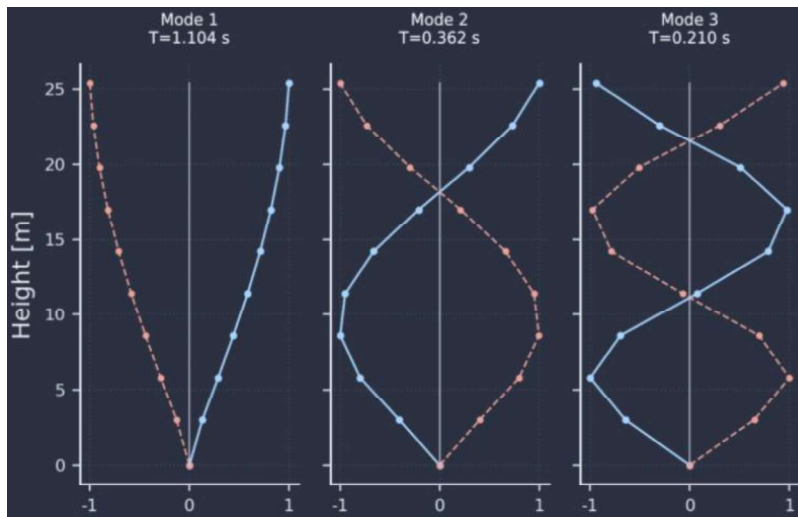
4.4.2 COMPARACIÓN DE FORMAS MODALES

Las formas modales, por facilidad de comparación, se analizarán únicamente para los tres primeros modos, comparando los resultados entre ISO-LATE y el software comercial.

La aplicación ISO-LATE indica las formas modales conjuntamente con los períodos anteriormente calculados de la siguiente forma para el sistema de base fija.

Figura 46

Formas modales del modelo de base fija en ISO-LATE

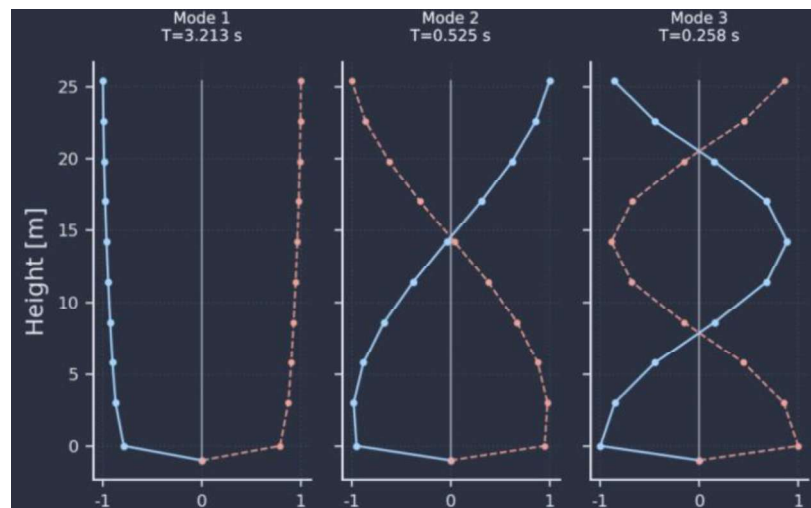


Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Para el sistema de base aislada se presentan de la siguiente forma. Es importante recordar que los modos están normalizados, de tal manera que los desplazamientos no sobrepasen la unidad.

Figura 47

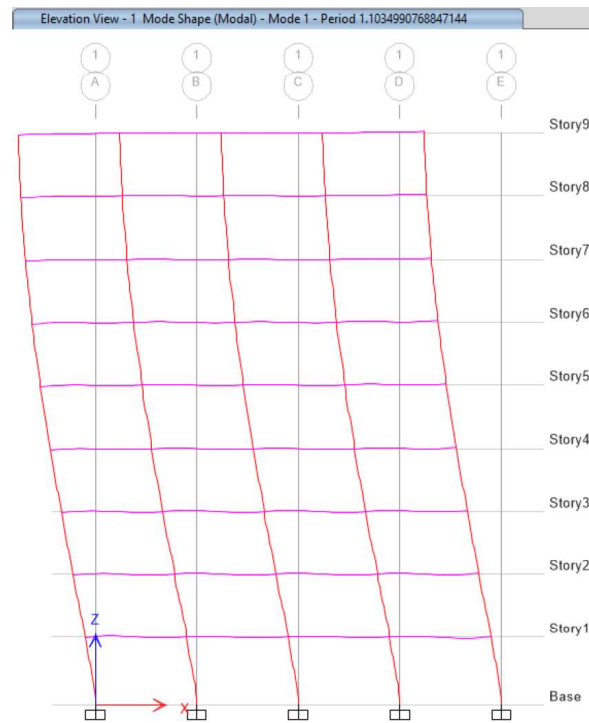
Formas modales del modelo aislado en ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

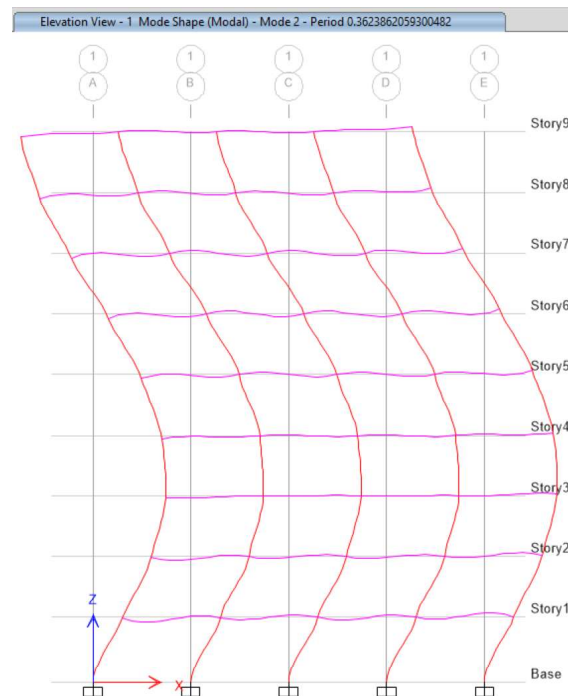
Así mismo se tienen los modos obtenidos en el software comercial para la estructura de base fija, los cuales, como se puede observar, presentan un comportamiento prácticamente igual al obtenido en la aplicación.

Figura 48
Modo 1 – software comercial



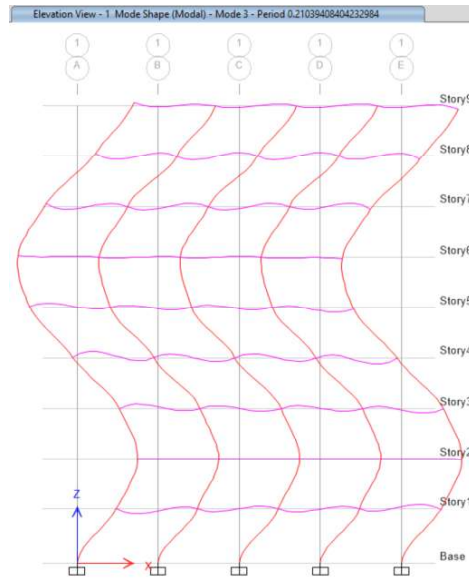
Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Figura 49
Modo 2 – software comercial



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

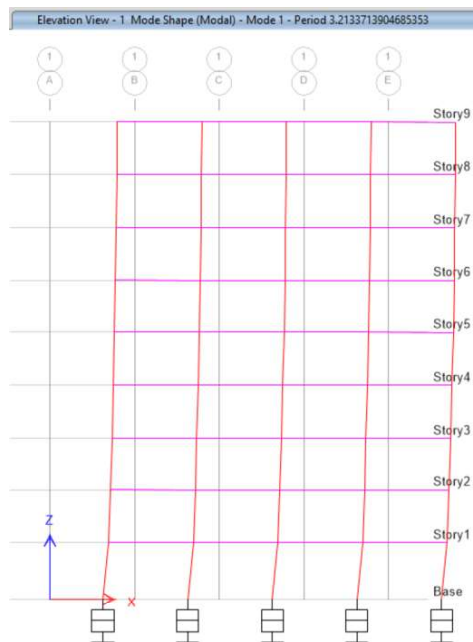
Figura 50
Modo 3 – software comercial



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

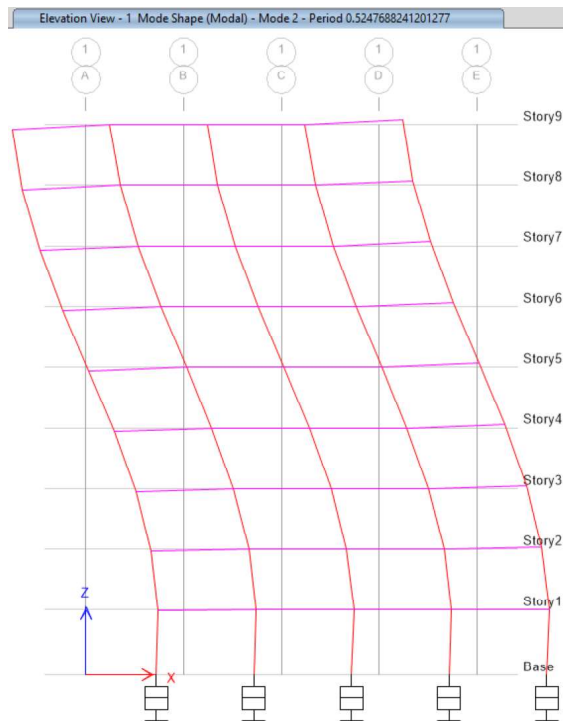
Finalmente se comparan los modos correspondientes al modelo con base aislada, en donde también se puede observar que presentan prácticamente el mismo comportamiento que los obtenidos en ISO-LATE.

Figura 51
Modo 1 – modelo aislado



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Figura 52
Modo 2 – modelo aislado



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Figura 53
Modo 3 – modelo aislado



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Esto demuestra que la formulación matricial implementada en ISO-LATE reproduce correctamente el comportamiento dinámico del sistema estructural, obteniendo resultados equivalentes a los generados por el software comercial utilizado como referencia.

4.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE ANALISIS MODAL ESPECTRAL

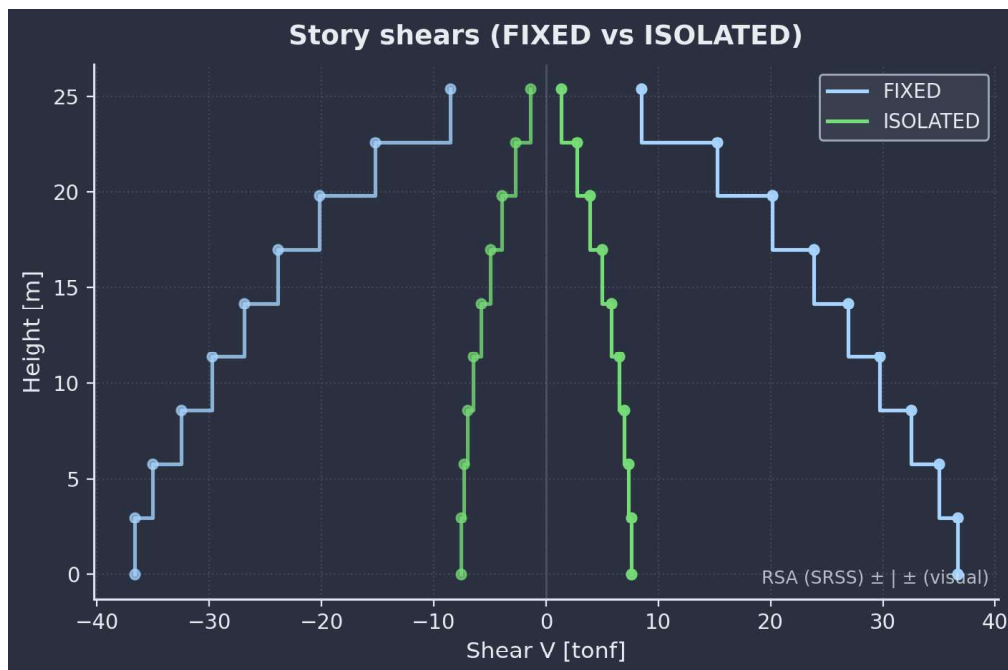
Para comparar los resultados mediante el análisis modal espectral entre los dos programas, se utilizan los datos que se obtienen de ISO-LATE, así como la extracción de tablas del software comercial, y se comparan sus diferencias para poder validar la aplicación desarrollada.

4.5.1 COMPARACIÓN DE CORTANTES POR PISO

Para comparar los cortantes obtenidos en cada uno de los programas, de igual manera se extraen los datos numéricos para comparar el error que tiene ISO-LATE.

Figura 54

Cortantes por piso – Modal espectral – ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Con los datos obtenidos y analizando de igual manera el error porcentual entre cada valor de cortante de piso, se tienen los siguientes resultados.

Tabla 11
Cortantes por piso – análisis modal espectral

Nº	H (m)	MODELO DE BASE FIJA			MODELO DE BASE AISLADA		
		ISO-LATE Vmax (tonf)	S.C. Vmax (tonf)	ERROR (%)	ISO-LATE Vmax (tonf)	S.C. Vmax (tonf)	ERROR (%)
1	3	36.629049	36.629	0.00	7.594359	7.2778	4.35
2	5.8	35.028131	35.0281	0.00	7.337224	6.5475	12.06
3	8.6	32.513512	32.5135	0.00	6.985858	5.8461	19.50
4	11.4	29.731417	29.7314	0.00	6.491967	5.1575	25.87
5	14.2	26.91074	26.9107	0.00	5.818539	4.4547	30.62
6	17	23.876534	23.8765	0.00	4.966584	3.708	33.94
7	19.8	20.170304	20.1703	0.00	3.925272	2.8921	35.72
8	22.6	15.226774	15.2267	0.00	2.718593	1.9904	36.59
9	25.4	8.514027	8.514	0.00	1.367535	1.0012	36.59

Nota. Tomado de (Guerrero Diego, 2025)

Como se puede ver, el modelo de base fija en ISO-LATE es prácticamente idéntico a los cortantes obtenidos por este mismo procedimiento de análisis dentro de un software comercial o profesional.

En el caso del sistema con aislamiento sísmico, los cortantes por piso obtenidos mediante análisis modal espectral en ISO-LATE presentan una diferencia respecto a los resultados obtenidos en un software comercial de análisis estructural. Sin embargo, al revisar los parámetros dinámicos del modelo se observa que los períodos, las formas modales y la participación modal del sistema son prácticamente iguales entre ambos modelos, lo que indica que el comportamiento dinámico general está bien representado.

La diferencia en los cortantes obtenidos mediante RSA se debe principalmente a que el método modal espectral asume que los modos de vibración están desacoplados, lo cual funciona bien en estructuras de base fija. Sin embargo, en sistemas con aislamiento sísmico, el amortiguamiento del sistema no siempre cumple esta condición, ya que el comportamiento del aislador y de la superestructura es diferente. Esto genera lo que se conoce como amortiguamiento no clásico, donde los modos de vibración pueden presentar cierto nivel de acoplamiento.

Debido a esto, el método RSA se convierte en una aproximación modal del comportamiento estructural, por lo que los cortantes obtenidos pueden presentar

diferencias respecto a los resultados calculados por el software comercial, que utiliza sus propios procedimientos internos para la linealización del sistema de aislamiento.

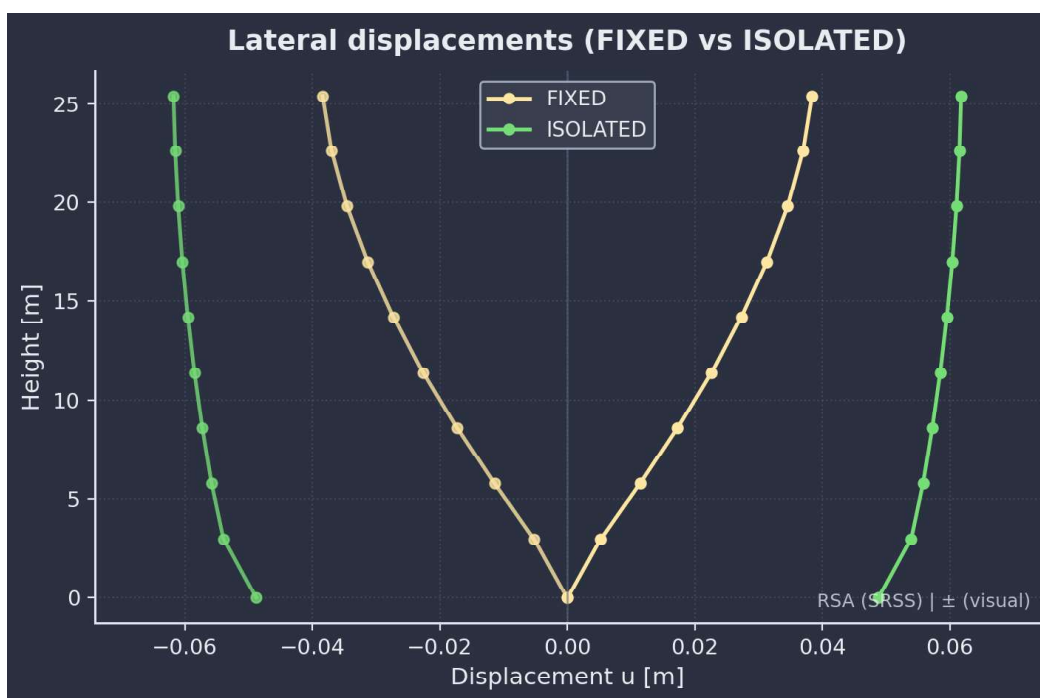
Por esta razón, la diferencia observada en los cortantes RSA del sistema aislado se interpreta como una limitación propia del método modal espectral cuando se aplica a estructuras con aislamiento sísmico. Sin embargo, el resultado todavía presenta una aproximación razonable respecto al software comercial, con errores máximos del 37%.

4.5.2 COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS LATERALES

Se analizan los desplazamientos laterales de la estructura siguiendo la misma lógica que los cortantes del punto anterior.

Figura 55

Desplazamientos por piso – Modal espectral – ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

En cuanto a los desplazamientos basados en el análisis modal espectral, se presenta el mismo problema de análisis y resultados que tienen los cortantes en el modelo aislado de ISO-LATE frente a un software comercial. La justificación de este error es la misma que se ha indicado en el punto 4.5.1, llegando a un error máximo y prácticamente constante de 33.40%.

Además de esto, el modelo de base fija es prácticamente igual entre los dos programas, como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 12
Desplazamientos por piso – análisis modal espectral

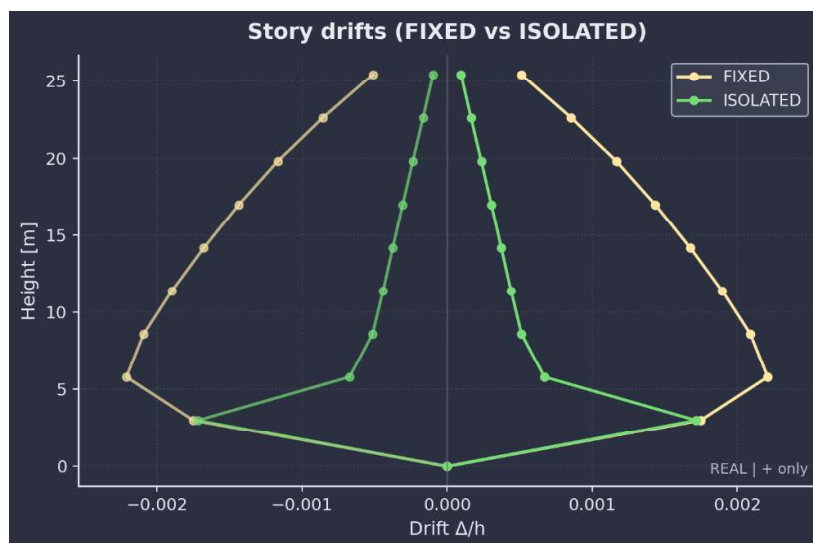
N°	H (m)	MODELO DE BASE FIJA			MODELO DE BASE AISLADA		
		ISO-LATE ux (m)	S.C. ux (m)	ERROR (%)	ISO-LATE ux (m)	S.C. ux (m)	ERROR (%)
0	1	0	0	0.00	0.048784	0.036572	33.39
1	3	0.005243	0.005243	0.00	0.053936	0.040435	33.39
2	5.8	0.011433	0.011433	0.00	0.055818	0.041845	33.39
3	8.6	0.017289	0.017289	0.00	0.057256	0.042922	33.40
4	11.4	0.0226	0.0226	0.00	0.058491	0.043847	33.40
5	14.2	0.027294	0.027294	0.00	0.059538	0.044632	33.40
6	17	0.031314	0.031314	0.00	0.060395	0.045275	33.40
7	19.8	0.034582	0.034582	0.00	0.061056	0.045771	33.39
8	22.6	0.036978	0.036978	0.00	0.061519	0.046118	33.39
9	25.4	0.038407	0.038407	0.00	0.061787	0.04632	33.39

Nota. Tomado de (Guerrero Diego, 2025)

4.5.3 COMPARACIÓN DE DERIVAS DE PISO

Las derivas de piso presentan el mismo error que tienen los desplazamientos en el punto anterior, debido a que estas toman los valores calculados de los desplazamientos para realizar su gráfica y poder comparar las derivas finales de piso.

Figura 56
Derivas por piso – Modal espectral – ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

4.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA

Una vez vista la limitación del método modal espectral en los modelos de base aislada, se aclara que, como indican distintas bibliografías, cuando se tiene aislamiento de base es más eficiente y adecuado realizar el análisis de estos sistemas utilizando procesos de tiempo-historia, para poder evaluar de mejor manera el comportamiento en cada instante de tiempo del aislador y por ende de la estructura aislada.

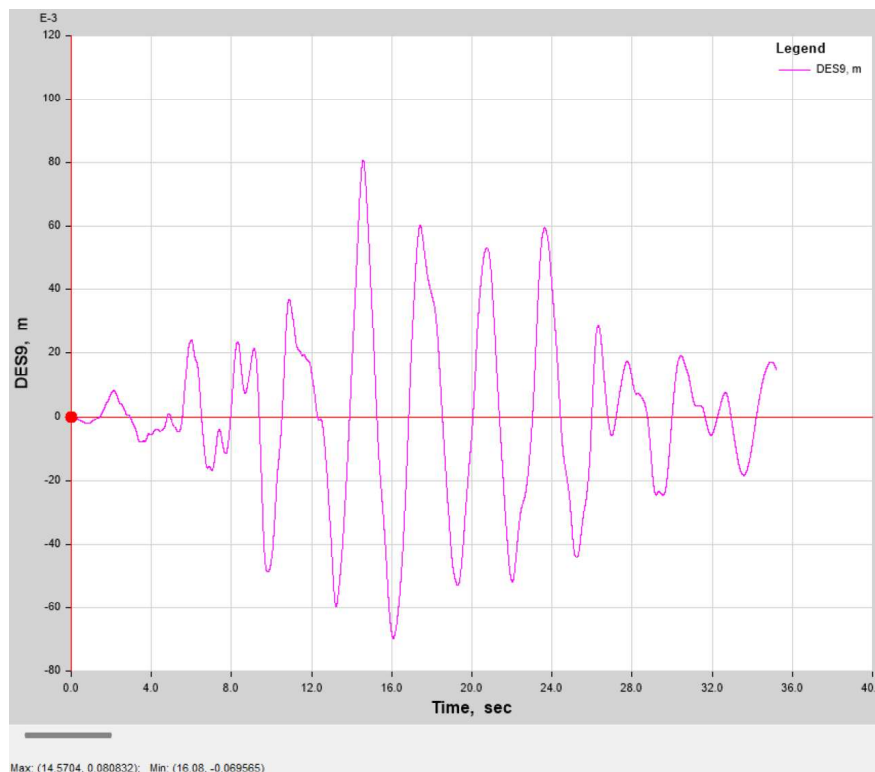
4.6.1 COMPARACIÓN DE RESPUESTAS DINÁMICAS

Para comparar con coherencia y de manera clara las respuestas tanto del modelo fijo como del modelo aislado que se obtienen en ambos programas, se exportan los datos a Excel de ambos programas. Sin embargo, una comparativa gráfica no es lo único que se debería hacer.

De manera gráfica se va a comparar la respuesta en desplazamiento del último piso ($N+25.40$) del modelo con aisladores de base, como se muestra a continuación.

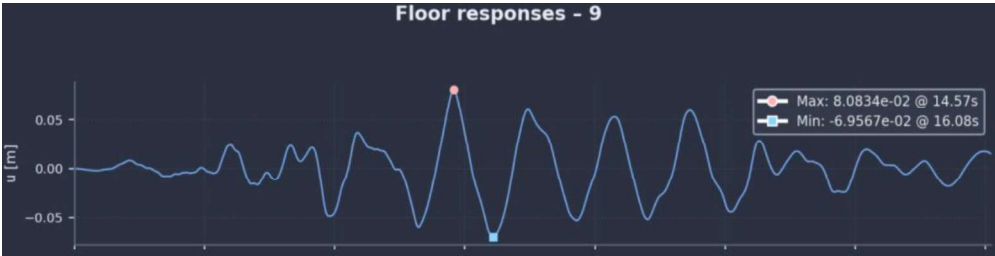
Figura 57

Respuesta dinámica en software comercial



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Figura 58
Respuesta dinámica en ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Como se puede ver a simple vista, la tendencia es igual y los puntos máximos y mínimos de la respuesta prácticamente coinciden de forma exacta en ambos programas.

Pero para un análisis más adecuado y con los niveles anteriormente mencionados, se realiza con los datos de ambos programas un análisis para encontrar los valores máximos absolutos de cada respuesta y comparar entre sí dichos valores.

Tabla 13
Comparativo de respuestas dinámicas

		MODELO FIJO			MODELO AISLADO		
		ISO-LATE	S.C.	% ERROR	ISO-LATE	S.C.	% ERROR
BASE	u (m)	-	-	-	0.06226	0.06237	0.18
	v (m/s)	-	-	-	0.13716	0.13700	0.11
	a (m/s ²)	-	-	-	0.72358	0.72360	0.00
NIVEL 1	u (m)	0.01175	0.01175	0.00	0.06902	0.06914	0.18
	v (m/s)	0.05894	0.05900	0.11	0.15320	0.15300	0.13
	a (m/s ²)	0.56027	0.56030	0.01	0.83901	0.83910	0.01
NIVEL 9	u (m)	0.08231	0.08231	0.00	0.08069	0.08083	0.17
	v (m/s)	0.51771	0.51800	0.06	0.18698	0.18700	0.01
	a (m/s ²)	3.17130	3.17130	0.00	1.09075	1.09080	0.00

Nota. Tomado de (Guerrero Diego, 2025)

Se han utilizado los valores máximos absolutos por simplicidad y además porque en diseño estructural normalmente estos son los valores que rigen el diseño. Por ende, se ha calculado el error relativo de los máximos absolutos del programa ISO-LATE frente al programa comercial de la siguiente forma:

$$\% \text{ error} = \frac{res_{ISO-LATE} - res_{S.C.}}{res_{S.C.}} \times 100$$

De esta forma se puede observar que para el modelo fijo la diferencia máxima que tiene ISO-LATE es de 0.11%, lo cual representa prácticamente los mismos valores, y por ende queda validado el análisis fijo.

De la misma forma, en el modelo aislado se tiene un error máximo de 0.18%, lo cual también justifica y valida la precisión de la aplicación.

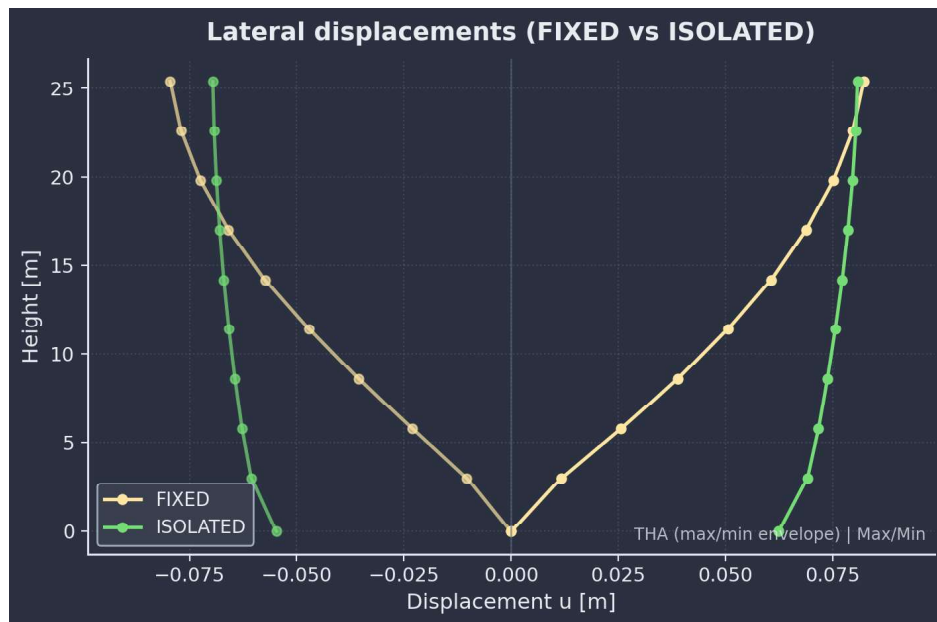
Esto confirma la correcta implementación de las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, así como del procedimiento de integración temporal mediante Newmark- β en la aplicación desarrollada

4.6.2 COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS

En cuanto a los desplazamientos obtenidos utilizando el proceso de tiempo-historia, se puede ver que al usar un registro de aceleraciones se tienen varios valores a lo largo del tiempo, y lo más adecuado en este tipo de análisis es obtener los valores máximos y mínimos como valores críticos.

Figura 59

Desplazamientos por piso – Tiempo historia – ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

De la misma forma, para validar y verificar el programa ISO-LATE se lo compara con un software comercial, obteniendo lo siguiente.

Figura 60
Comparación de desplazamientos máximos

DESPLAZAMIENTO - ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA													
N°	H (m)	MODELO DE BASE FIJA						MODELO DE BASE AISLADA					
		ISO-LATE (m)		S.C. (m)		ERROR (%)		ISO-LATE (m)		S.C. (m)		ERROR (%)	
		ux max	ux min	ux max	ux min	ux max	ux min	ux max	ux min	ux max	ux min	ux max	ux min
0	1.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.0623	-0.0549	0.0624	-0.0547	0.18	0.24
1	3.00	0.0118	-0.0103	0.0118	-0.0103	0.04	0.04	0.0690	-0.0607	0.0691	-0.0606	0.18	0.25
2	5.80	0.0257	-0.0230	0.0257	-0.0230	0.05	0.07	0.0716	-0.0629	0.0717	-0.0627	0.18	0.25
3	8.60	0.0388	-0.0355	0.0388	-0.0355	0.04	0.05	0.0737	-0.0645	0.0717	-0.0644	2.71	0.24
4	11.40	0.0506	-0.0471	0.0506	-0.0471	0.04	0.05	0.0755	-0.0660	0.0756	-0.0658	0.18	0.25
5	14.20	0.0607	-0.0574	0.0606	-0.0574	0.04	0.05	0.0771	-0.0672	0.0772	-0.0670	0.18	0.25
6	17.00	0.0689	-0.0659	0.0688	-0.0659	0.04	0.04	0.0785	-0.0681	0.0786	-0.0680	0.18	0.25
7	19.80	0.0752	-0.0724	0.0752	-0.0725	0.04	0.04	0.0795	-0.0689	0.0796	-0.0687	0.17	0.24
8	22.60	0.0797	-0.0769	0.0797	-0.0770	0.04	0.04	0.0803	-0.0694	0.0804	-0.0693	0.17	0.25
9	25.40	0.0823	-0.0795	0.0823	-0.0795	0.04	0.05	0.0807	-0.0697	0.0808	-0.0696	0.17	0.24

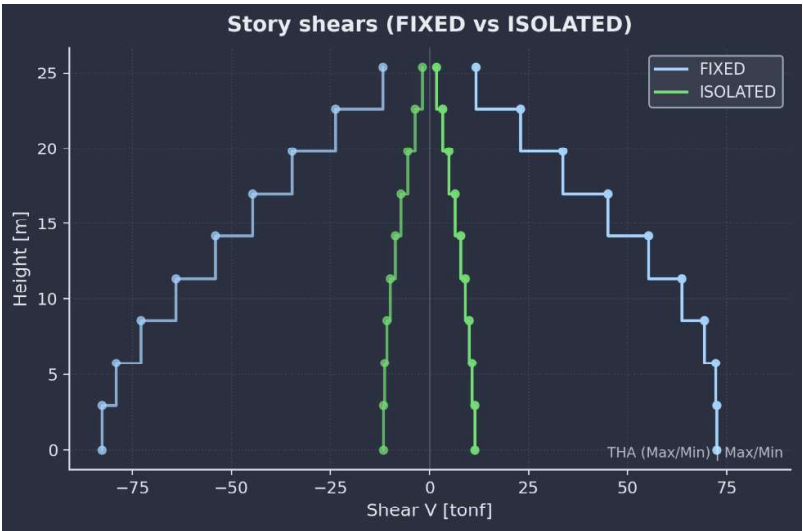
Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

De manera clara se observa que la diferencia en porcentaje de error entre ambos programas, en el caso más crítico, es de un 2%, por tal motivo se asume que la diferencia es mínima y se puede utilizar ISO-LATE con un nivel adecuado de confiabilidad.

4.6.3 COMPARACIÓN DE CORTANTES MÁXIMOS POR PISO

Los cortantes de cada nivel de la misma manera se analizan tomando en cuenta que, al ser un análisis tiempo-historia, se van a tener valores máximos y mínimos a lo largo de todo el análisis temporal, por lo que los valores positivos no son simétricos con los valores negativos.

Figura 61
Desplazamientos por piso – Tiempo historia – ISO-LATE



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Se analizan los valores de diferencia de cortantes entre cada programa en la siguiente tabla.

Figura 62
Comparación de cortantes máximos por piso

CORTANTES POR PISO - ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA													
N°	H (m)	MODELO DE BASE FIJA						MODELO DE BASE AISLADA					
		ISO-LATE (tonf)		S.C. (tonf)		ERROR (%)		ISO-LATE (tonf)		S.C. (tonf)		ERROR (%)	
		Vmax	Vmin	Vmax	Vmin	Vmin	Vmax	Vmax	Vmin	Vmax	Vmin	Vmin	Vmax
1	3	72.4269	-82.7749	71.2740	-81.9523	1.62	1.00	11.3184	-11.7363	11.3389	-13.2003	0.18	11.09
2	5.8	72.1213	-79.2279	71.4024	-78.4811	1.01	0.95	10.6580	-11.3900	10.3120	-12.2235	3.36	6.82
3	8.6	69.1901	-72.8581	68.8380	-72.2274	0.51	0.87	9.9399	-10.8016	9.4392	-11.1550	5.30	3.17
4	11.4	63.5067	-64.0591	63.4296	-63.7023	0.12	0.56	9.0113	-9.9149	8.5487	-9.9390	5.41	0.24
5	14.2	55.2199	-54.0890	55.3509	-54.4499	0.24	0.66	7.8185	-8.7257	7.4845	-8.5599	4.46	1.94
6	17	44.9163	-44.7141	45.1956	-45.5147	0.62	1.76	6.4039	-7.2665	6.2461	-7.0396	2.53	3.22
7	19.8	33.5230	-34.8297	33.9066	-35.6350	1.13	2.26	4.8334	-5.5943	4.8430	-5.4011	0.20	3.58
8	22.6	22.8479	-23.7965	22.8364	-24.4350	0.05	2.61	3.2991	-3.7699	3.2914	-3.6550	0.23	3.14
9	25.4	11.6013	-11.8192	11.4759	-12.1766	1.09	2.93	1.6413	-1.8530	1.6289	-1.8090	0.76	2.43

Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Como se ve en los resultados, el error que maneja de diferencia el análisis tiempo-historia es del 6.82% como caso crítico, por tal motivo se aceptan como validados los cortantes en tiempo-historia de ISO-LATE.

4.7 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO CON AISLAMIENTO SÍSMICO

Como se ha visto en los datos anteriores, de manera rápida una misma estructura aislada frente a su versión de base fija presenta varias diferencias. Con la ayuda de ISO-LATE se puede observar claramente el cambio de ciertas propiedades en una estructura común, las cuales se van a analizar con mayor profundidad a continuación.

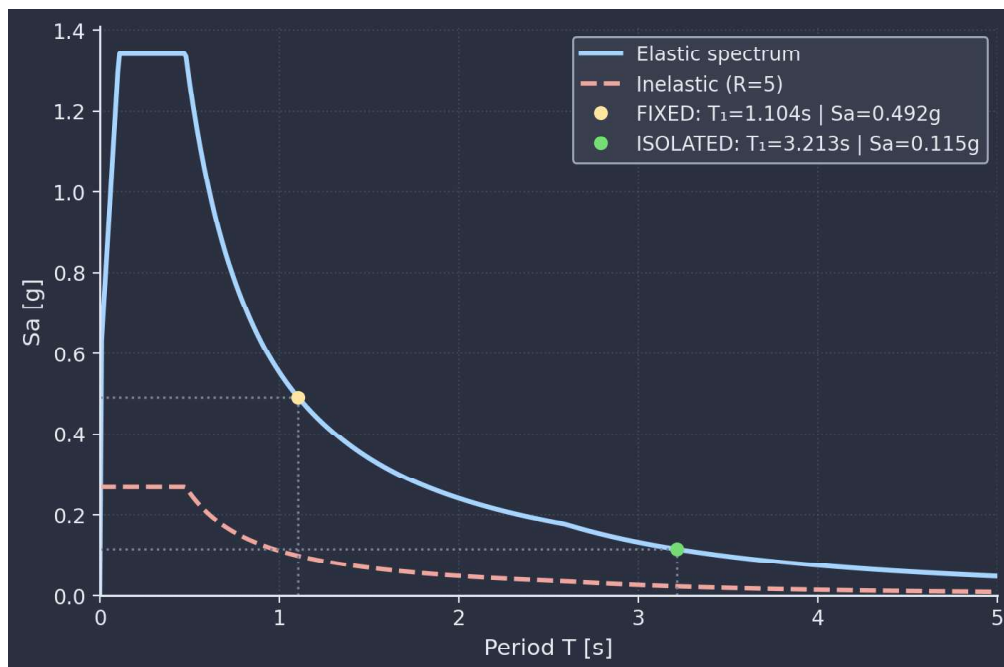
4.7.1 VARIACIÓN DEL PERIODO FUNDAMENTAL DEL SISTEMA

Es bien sabido que cuando se aísla una estructura, uno de sus objetivos principales es aumentar el período fundamental del sistema. Sin embargo, muchas veces no se entiende claramente por qué esto es importante. Con ISO-LATE el usuario puede identificar varias ventajas del aislamiento de base.

Una base importante que va de la mano con el período de la estructura es la aceleración a la que una estructura se ve sometida según la normativa, en este caso la NEC-24.

Figura 63

Espectro NEC24 con periodos de ambas estructuras



Tomado de: (Guerrero Diego, 2025)

Las estructuras, por lo general, se encuentran ubicadas desde la meseta en adelante del espectro normativo, y ese es el punto importante del aislamiento. Como se puede ver para el ejemplo que se está siguiendo, al aumentar el período de la estructura se tiene una reducción de la aceleración de diseño de 0.49g a 0.11g, lo cual es realmente significativo.

Además, como se vio en los puntos anteriores, los cortantes y derivas de una estructura aislada se reducen significativamente. Esto se debe al “desacople” de la estructura con el suelo, por lo que los elementos estructurales se ven sometidos a menores demandas sísmicas. Esto brinda mayor seguridad y vida útil a la estructura, lo cual es altamente importante.

4.7.2 REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS EN LA SUPERESTRUCTURA

En el apartado 4.5 se pudo de ver de manera clara en un análisis tiempo historia las diferencias de un sistema fijo vs uno aislado, este punto es altamente importante debido a que muchas veces los eventos sísmicos son altamente impredecibles y a mas de esto pueden llegar a picos de aceleración por sobre los espectros de diseño lo cual puede destruir en segundos la edificación o en otros casos dejar inservible la estructura, no hay un colapso pero la estructura debe ser derrocada porque a llegado a su limite.

Esto no significa que al tener aisladores de base una estructura, la misma se deba diseñar de tal forma que por la reducción de demandas sea menos competente, la lógica de una estructura aislada debe ser diseñar como que la misma va a ser fija y esta ya definida y lista aislarla

4.8 DIFERENCIAS ENTRE ISO-LATE Y EL SOFTWARE COMERCIAL

ISO-LATE no es un software enfocado en el diseño estructural, ni tampoco pretende ser una herramienta directa para la construcción o dimensionamiento de estructuras aisladas. Además, su limitación principal es que únicamente analiza estructuras de varios grados de libertad en 2D.

Tomando en cuenta estas limitaciones, se puede analizar de manera clara que, en el ámbito académico, la aplicación presenta resultados muy cercanos a los obtenidos en un software comercial. La aplicación permite analizar estructuras y simplifica muchos procesos que, en programas profesionales, pueden incluir más variables y resultar más complejos de interpretar.

ISO-LATE, al ser una herramienta gratuita, permite acceder fácilmente al análisis estructural y comprender de manera más clara, tanto numérica como gráficamente, por qué aislar una estructura puede mejorar su comportamiento sísmico, así como identificar cuáles son las variables estructurales principales que se ven afectadas por el uso de un aislador de base.

4.9 VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA

La aplicación, como se ha visto en los puntos anteriores, se encuentra debidamente validada mediante comparaciones con software comercial. Se realizaron distintos ejercicios de comparación en 10 estructuras con diferentes configuraciones, obteniendo resultados consistentes entre ambos programas.

Estas comparaciones muestran que ISO-LATE presenta resultados muy cercanos a los obtenidos en software profesional, lo cual permite tener un nivel adecuado de confianza en la aplicación desarrollada, especialmente para fines académicos y de análisis comparativo del comportamiento estructural.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El hecho de que una estructura sea aislada en su base no implica que, al reducir ciertas demandas estructurales, esta deba diseñarse con secciones menos competentes o con menores requisitos constructivos. El uso de aisladores debe implementarse en una estructura una vez que esta ha sido correctamente diseñada para funcionar adecuadamente como una estructura de base fija. Posteriormente, por razones de seguridad, durabilidad o importancia estructural, se puede incorporar el aislamiento sísmico sin reducir las capacidades estructurales previamente diseñadas.

El análisis modal espectral es muy útil para estructuras de cualquier tipo. Sin embargo, cuando se analiza una estructura con aislamiento sísmico, este método puede presentar limitaciones debido al acoplamiento modal que aparece en este tipo de sistemas. Al existir un modo adicional asociado al aislador, pueden generarse discrepancias en el análisis debido al amortiguamiento no clásico de estas estructuras. Por esta razón, el método más adecuado para evaluar estructuras con aislamiento sísmico es el análisis tiempo-historia, tanto en su versión lineal como no lineal.

Los aisladores de base pueden idealizarse como elementos lineales en ciertos modelos de análisis, sin embargo, por naturaleza su comportamiento es no lineal, ya que su rigidez puede variar dependiendo del nivel de deformación y de las condiciones de carga generadas durante un evento sísmico.

Muchas veces a los estudiantes de ingeniería el aislamiento sísmico les genera interés, pero no logran comprender completamente su funcionamiento más allá de la idea de que actúa como un “amortiguador”. Es importante que existan herramientas que permitan visualizar y comprender de manera numérica y gráfica el funcionamiento del aislamiento sísmico, mostrando claramente qué variables estructurales se modifican cuando se incorpora un aislador de base.

Una estructura aislada generalmente aumenta su período fundamental. Sin embargo, si una estructura es muy rígida o presenta un período muy bajo que se encuentra antes de la meseta del espectro, el aumento del período podría generar incrementos en las

aceleraciones espectrales que afectan a la estructura. Este efecto puede observarse con mayor claridad cuando se analiza la estructura frente a registros sísmicos reales.

Un ciclo de histéresis representa el comportamiento de disipación de energía de un sistema. El área contenida dentro del ciclo representa la energía disipada durante el movimiento sísmico. Además, los distintos tamaños de los ciclos representan las diferentes intensidades del movimiento sísmico a lo largo del tiempo. Los ciclos no son perfectamente simétricos, lo cual es normal, ya que el aislador frente a un evento real no carga y descarga de manera completamente lineal. Los cambios de rigidez entre el núcleo de plomo y el caucho van alternando dependiendo de las demandas sísmicas.

En un aislador se debe verificar que, dentro de su ciclo de histéresis, la pendiente del comportamiento no cambie significativamente. Los ciclos pueden variar en tamaño o presentar cierta asimetría, pero la pendiente debe mantenerse relativamente constante, ya que esto forma parte del principio de funcionamiento del disipador. Si la pendiente cambiara significativamente, podría ser un indicio de que el aislador ha sobrepasado su deformación de diseño, lo cual no debe suceder.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda que en futuras versiones de ISO-LATE se implemente la posibilidad de realizar análisis en 3D, lo cual permitiría analizar estructuras con mayor complejidad geométrica y considerar efectos adicionales como torsión o irregularidades en planta.

También sería recomendable implementar dentro de la aplicación modelos no lineales más completos para los aisladores, permitiendo simular con mayor precisión el comportamiento real de distintos tipos de aisladores como LRB, HDRB o FPS, incluyendo variaciones de rigidez y amortiguamiento dependiendo del nivel de deformación.

Se recomienda además que la aplicación pueda incluir más opciones de registros sísmicos, ya sea mediante una base de datos interna o conectándose a bases de datos públicas como PEER, lo cual permitiría realizar comparaciones con distintos tipos de movimientos sísmicos.

Otra mejora importante sería implementar procesos automáticos de escalamiento de registros sísmicos, permitiendo que el usuario pueda ajustar de manera directa los registros a los espectros de diseño definidos por distintas normativas.

También sería recomendable incluir dentro de la aplicación herramientas adicionales de visualización de resultados, tales como gráficos dinámicos de respuesta, animaciones del movimiento estructural o comparaciones entre distintos escenarios de análisis.

De igual manera se podría ampliar la aplicación para que permita comparar distintos tipos de sistemas estructurales, no solo pórticos, sino también muros estructurales u otros sistemas resistentes que puedan ser relevantes dentro del análisis sísmico.

Finalmente, se recomienda que la aplicación continúe desarrollándose como una herramienta académica y didáctica, que permita a estudiantes y profesionales comprender de mejor manera los principios del análisis estructural dinámico y del aislamiento sísmico, facilitando la interpretación de resultados mediante representaciones numéricas y gráficas.

CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

Alejandro, S., & Fluxà, G. (2013). *TRABAJO FIN DE MÁSTER*.

American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*.

Apolo Ángel, & Esquivel Jaime. (2024). *Análisis de aisladores y disipadores sísmicos en un edificio de 5 plantas en la ciudad de Cuenca, sector Yumuncay*. Universidad Politécnica Salesiana.

Attal Mike. (2026, febrero 19). *Pandas : La biblioteca de Python dedicada a la Data Science*. <https://liora.io/es/pandas-python>

Axisa François. (2005). Vibration modes of straight beams and modal analysis methods. En *Modelling of Mechanical Systems* (Vol. 2, Número C, pp. 188–258). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S1874-7051\(05\)80006-4](https://doi.org/10.1016/S1874-7051(05)80006-4)

Building-Use Lead Rubber Bearing, LRB - OILES CORPORATION. (s. f.). Recuperado 30 de noviembre de 2025, de https://www.oiles.co.jp/en/products/damping_isolation/building/lrb/

Carabalí Darío. (2020). *Análisis modal espectral mediante el uso de vectores Ritz aplicados a una estructura*. Escuela Politécnica Nacional.

Caswell Thomas. (2025). *Matplotlib: visualización con Python*. <https://matplotlib.org/>

Celi Carlos. (2025). *Structural Engineering: Dynamics, Seismic Solution, and AI Integration*.

Chopra Anil. (2014). *Dinámica de estructuras* (Murrieta Jesús, Trad.; Cuarta). Pearson.

Constantinou Michael, Aguiar Roberto, Morales Enrique, & Caiza Pablo. (2016, noviembre 1). *Desempeño del Aislador FPT8833/12-12/8-5 en el Análisis Sísmico del Centro de Investigaciones y de Postgrado de la UFA-ESPE*. https://www.researchgate.net/publication/291830324_DESEMPENO_DE_AISLA_DOR_FPT883312-12-8-5_EN_EL_ANALISIS_SISMICO_DEL_CENTRO_DE_INVESTIGACIONES_Y

_DE_POST_GRADO_DE_LA_UFA-ESPE_BEARING_FPT883312-128-
5_SEISMIC_PERFORMANCE_IN_THE_RESEARCH_AND_POSGRADE_CE
NTE

Guerrero Diego. (2025). *Desarrollo de una aplicación interactiva para el análisis simplificado de sistemas de aislamiento de base en estructuras*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Guzmán, M., Guzmán, R., & Gonzales, F. (2017). *Dinámica Estructural Aplicaciones Usando Matlab* (Guzmán Miguel, Ed.; Primera).
<https://miguelraul13579.wixsite.com/misitio>

Hibbeler, R. C. (2012). *Análisis Estructural, 8va Edición* (Cruz Luís, Ed.; Octava). Pearson.

Krawinkler, H., & Gupta, A. (1998). Deformation and Ductility Demands in Steel Moment Frame Structures. *Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS'97)*, 167–178. <https://doi.org/10.1016/B978-008043320-2/50016-2>

Merced Alex. (2024, septiembre 22). *Profundice en las aplicaciones de datos con Streamlit - Comunidad DEV*. <https://dev.to/alexmercedcoder/deep-dive-into-data-apps-with-streamlit-3e40>

Oropeza Sarahi. (2025). *Obtención de la rigidez lateral en edificaciones irregulares en planta, con diafragma rígido, para disminuir la excentricidad estática*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Páez Carlos. (2023). *Aisladores Elastoméricos* (pp. 1–20).

PEER Ground Motion Database - PEER Center. (s. f.). Recuperado 25 de marzo de 2026, de https://ngawest2.berkeley.edu/spectras/new?sourceDb_flag=1

Peligro sísmico y diseño sismorresistente NEC-SE-DS -2024, 1 (2024).

Rojas, B. (2024). *Cálculo estructural de una edificación con aislamiento sísmico en el centro histórico de la ciudad de Cuenca*.

Sánchez, A. (2022, mayo 12). *La librería Numpy | Aprende con Alf*.
<https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/numpy/>

Soto Gerardo, & Vente Rodrigo. (2021). *Reducción del desplazamiento relativo de la base en estructuras con aisladores sísmicos mediante el concepto de transmisibilidad relativa*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.