



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA  
PROBABILIDAD DE FALLA DE UN VIADUCTO  
ELEVADO PARA TRENES DE PASAJEROS SUJETO A  
SISMOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

P R E S E N T A:

JOSÉ FRANCISCO GARCÍA ZAMORA

TUTOR ACADÉMICO:

DR. DAVID JOAQUÍN DELGADO HERNÁNDEZ  
TOLUCA, MÉXICO

2026



## Resumen

El trabajo estudia el comportamiento de una pila de concreto de un viaducto elevado para trenes de pasajeros ante una condición extrema: la combinación de carga viva máxima, carga muerta y acción sísmica. Debido a la importancia que tiene este tipo de estructuras, considerando una región con actividad sísmica relevante, se busca conocer el riesgo de falla por flexo-compresión en uno de sus elementos principales. Para ello, se desarrolló un modelo estructural en SAP2000® y se analizaron distintos escenarios de carga. Finalmente, mediante redes bayesianas se realizó un análisis probabilístico que permitió evaluar la respuesta de la estructura ante este evento extraordinario.

Palabras clave: carga axial, carga viva, falla, flexo-compresión, modelo, momento flexionante, pila, red bayesiana, simulación, sismo, viaducto, carga muerta.

# Índice general

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                                 | <b>2</b>  |
| 1.1. Objetivo general . . . . .                                        | 2         |
| 1.2. Planteamiento del problema . . . . .                              | 3         |
| 1.3. Alcances . . . . .                                                | 3         |
| 1.4. Hipótesis . . . . .                                               | 3         |
| <b>2. Estado del arte</b>                                              | <b>4</b>  |
| <b>3. Metodología</b>                                                  | <b>6</b>  |
| <b>4. Caracterización del caso de estudio</b>                          | <b>7</b>  |
| 4.1. Selección de registros sísmicos . . . . .                         | 7         |
| 4.2. Configuración y especificaciones del tren de referencia . . . . . | 7         |
| 4.3. Viaducto elevado ferroviario . . . . .                            | 8         |
| 4.4. Configuración estructural de referencia . . . . .                 | 8         |
| <b>5. Modelado estructural</b>                                         | <b>9</b>  |
| 5.1. Estimación del peso del tren . . . . .                            | 9         |
| 5.2. Modelo estructural en SAP2000® . . . . .                          | 10        |
| 5.3. Descripción del modelo y condiciones de análisis . . . . .        | 10        |
| 5.4. Cargas consideradas en el modelo . . . . .                        | 12        |
| 5.5. Integración entre MATLAB® y SAP2000® . . . . .                    | 14        |
| <b>6. Redes bayesianas y análisis probabilístico</b>                   | <b>17</b> |
| 6.1. Inferencia, construcción y fundamentos de la red . . . . .        | 17        |
| <b>7. Discusión</b>                                                    | <b>21</b> |
| <b>8. Conclusiones</b>                                                 | <b>25</b> |
| <b>Referencias</b>                                                     | <b>26</b> |
| <b>Anexo</b>                                                           | <b>28</b> |
| ModificarPesosSAP.m . . . . .                                          | 28        |
| Analisis.m . . . . .                                                   | 31        |
| get_max_abs_forces_column.m . . . . .                                  | 36        |
| Run_simul.m . . . . .                                                  | 37        |



## Índice de figuras

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Unidad ferroviaria de pasajeros con ocupación máxima. . . . .                                            | 7  |
| 4.2. Detalles de la trabe y pila del viaducto elevado de referencia. . . . .                                  | 8  |
| 5.1. Cargas por eje del tren. . . . .                                                                         | 10 |
| 5.2. Modelo en SAP2000® de un tramo del viaducto elevado. . . . .                                             | 11 |
| 5.3. Ventanas de SAP2000® utilizadas para definir las propiedades de la trabe y la pila del viaducto. . . . . | 11 |
| 5.4. Casos de carga en el modelo de SAP2000®. . . . .                                                         | 12 |
| 5.5. Caso de carga del sismo y acelerograma. . . . .                                                          | 13 |
| 5.6. Líneas de aplicación de carga ferroviaria. . . . .                                                       | 13 |
| 5.7. Diagrama de flujo MATLAB®–SAP2000®. . . . .                                                              | 15 |
| 7.1. Redes bayesianas para los registros sísmicos considerados. . . . .                                       | 21 |
| 7.2. Curva de interacción para la pila de concreto. . . . .                                                   | 22 |
| 7.3. Superficies de probabilidad de falla en función de GF y W para la sección transversal reducida. . . . .  | 23 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Factores de carga para combinaciones de diseño según AASHTO LRFD (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004) . . . | 4  |
| 6.1. Variables del modelo de análisis. . . . .                                                                                                         | 19 |
| 7.1. Probabilidades de falla para la sección transversal reducida. . . . .                                                                             | 23 |

# 1. Introducción

En México el ferrocarril se remonta a 1837 (Bühler, 2022). En la década de 1990, los servicios de pasajeros quedaron limitados principalmente a rutas turísticas, pero en años recientes, ante los desafíos asociados a la movilidad urbana, la congestión vial y la sostenibilidad del transporte, el gobierno federal ha impulsado nuevamente proyectos ferroviarios de pasajeros como una alternativa para mejorar la conectividad y la eficiencia del transporte en las principales zonas metropolitanas del país (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, 2022).

El resurgimiento de los trenes de pasajeros busca crear una conectividad entre las regiones más pobladas, donde existe alta demanda de movilidad. En este sentido, un viaducto ferroviario es una estructura que puede usarse para salvar el terreno accidentado u obstáculos de la infraestructura urbana.

En México, un país donde la actividad sísmica es importante debido a la interacción entre las placas tectónicas, las fallas geológicas y la presencia del eje Neovolcánico, este fenómeno, en conjunto con la sobrepoblación, hace importante realizar este tipo de investigaciones.

El caso de un viaducto ferroviario para pasajeros es particularmente relevante, ya que los pasajeros tendrían que permanecer sobre el viaducto durante el sismo. Esta combinación de acciones sobre el viaducto podría modificar significativamente la respuesta estructural de la pila de concreto.

De acuerdo con Kim et al. (2011), la probabilidad de ocurrencia simultánea de un sismo y cargas vivas se puede estimar en 0.096 %; este cálculo contempla sismos moderados y poblaciones con alta densidad poblacional en China.

Para este propósito, herramientas como SAP2000® y MATLAB® permiten modelar escenarios sísmicos y de carga viva, mientras que metodologías probabilísticas, como las redes bayesianas, facilitan la estimación de probabilidades de falla considerando la incertidumbre inherente a estos fenómenos.

## 1.1. Objetivo general

Determinar los elementos mecánicos que actúan en una pila de concreto de un viaducto elevado para trenes de pasajeros debido a la acción de la carga muerta, la carga viva máxima y el sismo con el fin de evaluar la probabilidad de falla por estado límite mediante redes bayesianas.

## 1.2. Planteamiento del problema

La obra en estudio corresponde a un viaducto elevado para trenes de pasajeros, considerado como una infraestructura de importancia para la movilidad regional y la interconexión entre zonas urbanas densamente pobladas. Este tipo de transporte ferroviario de pasajeros puede contribuir a mejorar la movilidad, reducir tiempos de traslado y disminuir algunos impactos asociados al transporte carretero.

Los reglamentos y códigos para el diseño de puentes establecen combinaciones de acciones que consideran la ocurrencia simultánea de la acción sísmica y la carga viva bajo determinados criterios de combinación. Sin embargo, estas disposiciones no necesariamente permiten identificar el comportamiento estructural asociado con una condición en la que la carga viva alcance su valor máximo total y actúe simultáneamente con una excitación sísmica. Por ello, no se conoce con precisión cuál es el comportamiento de la estructura cuando estas acciones se presentan simultáneamente, debido a que tradicionalmente se considera que la probabilidad de ocurrencia conjunta es muy baja.

Sin embargo, en los últimos 110 años la población en México creció en un 833 %, lo que se traduce en un aumento de la demanda de movilidad y de la necesidad de interconexión entre zonas urbanas. Si bien predecir la ocurrencia de un sismo es difícil e impreciso, considerar una ocupación máxima en un sistema de transporte hace que el problema sea aún más complejo. Sin embargo, se puede inferir una tendencia al alza debido a la demanda de movilidad, lo que podría generar que los trenes permanezcan durante periodos más largos con una ocupación mayor. El análisis probabilístico mediante redes bayesianas permitirá evaluar este evento extraordinario y analizar la interacción entre las respuestas de la estructura. De esta forma, será posible determinar si la carga viva beneficia o perjudica el comportamiento de la estructura cuando se presenta un sismo y en qué medida lo hace.

## 1.3. Alcances

1. Estimar por medio de un modelo de probabilidad la ocurrencia de falla en una pila de un viaducto elevado para trenes de pasajeros.
2. Desarrollar una implementación sistemática y reproducible del modelo que permita su aplicación en estudios posteriores y como apoyo a la toma de decisiones

## 1.4. Hipótesis

La combinación de la carga muerta, carga viva máxima y la acción sísmica genera un efecto sobre una pila del viaducto elevado para trenes de pasajeros que incrementa en 20 % su probabilidad de falla por flexo-compresión.

## 2. Estado del arte

“A nivel mundial, aproximadamente el 4 % de los puentes construidos han presentado alguna falla y, de éstos, alrededor del 12 % han fallado por sobrecarga” Delgado et al. (2010). Sin embargo, la literatura relacionada con el efecto simultáneo de la acción sísmica y la carga viva en puentes es limitada. Las primeras especificaciones AASHTO LRFD consideraban ambas acciones de forma independiente (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1998). En la edición de 2004 se adicionaron combinaciones para eventos extremos. El sismo se considera junto con una fracción de la carga viva. Se multiplica por el factor de presencia  $\gamma_{EQ}$  que depende de las condiciones de tránsito, pero suele usarse con un valor de 0.50.

En la Tabla 2.1 se presentan los factores de carga establecidos por AASHTO LRFD para las diferentes combinaciones de diseño (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004). En particular, la combinación Evento Extremo I es la única que incorpora el sismo y la carga viva; sin embargo, la carga viva se multiplica por un factor que comúnmente se considera de 0.5.

| Combinación               | DC, DD, DW,<br>EH, EV, ES, EL | LL, IM,<br>CE, BR, PL, LS | WA          | WS   | WL   | FR          | TU/<br>CR/SH | TG            | SE            | Usar solo uno por vez |      |       |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------|------|------|-------------|--------------|---------------|---------------|-----------------------|------|-------|
|                           |                               |                           |             |      |      |             |              |               |               | EQ                    | IC   | CT/CV |
| Resistencia I             | $\gamma_P$                    | 1.75                      | 1.00        | —    | —    | 1.00        | 0.50/1.20    | $\gamma_{RG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                     | —    | —     |
| Resistencia II            | $\gamma_P$                    | 1.35                      | 1.00        | —    | —    | 1.00        | 0.50/1.20    | $\gamma_{RG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                     | —    | —     |
| Resistencia III           | $\gamma_P$                    | —                         | 1.00        | 1.40 | —    | 1.00        | 0.50/1.20    | $\gamma_{RG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                     | —    | —     |
| Resistencia IV            | $1.5\gamma_P$                 | —                         | 1.00        | —    | —    | 1.00        | 0.50/1.20    | —             | —             | —                     | —    | —     |
| Resistencia V             | $\gamma_P$                    | 1.35                      | 1.00        | 0.40 | 1.00 | 1.00        | 0.50/1.20    | $\gamma_{RG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                     | —    | —     |
| <b>Evento Extremo I</b>   | $\gamma_P$                    | $\gamma_{EQ}$             | <b>1.00</b> | —    | —    | <b>1.00</b> | —            | —             | —             | <b>1.00</b>           | —    | —     |
| Evento Extremo II         | $\gamma_P$                    | 0.50                      | 1.00        | —    | —    | 1.00        | —            | —             | —             | —                     | 1.00 | 1.00  |
| Servicio I                | 1.00                          | 1.00                      | 1.00        | 0.30 | 1.00 | 1.00        | 1.00/1.20    | $\gamma_{RG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                     | —    | —     |
| Servicio II               | 1.00                          | 1.30                      | 1.00        | —    | —    | 1.00        | 1.00/1.20    | —             | —             | —                     | —    | —     |
| Servicio III              | 1.00                          | 0.80                      | 1.00        | —    | —    | 1.00        | 1.00/1.20    | $\gamma_{RG}$ | $\gamma_{SE}$ | —                     | —    | —     |
| Servicio IV               | 1.00                          | —                         | 1.00        | 0.70 | —    | 1.00        | 1.00/1.20    | —             | 1.00          | —                     | —    | —     |
| Fatiga (solo LL, IM y CE) | —                             | 0.75                      | —           | —    | —    | —           | —            | —             | —             | —                     | —    | —     |

Nota. Factores de carga empleados para las combinaciones de diseño establecidas por AASHTO LRFD. Los símbolos  $\gamma_P$ ,  $\gamma_{RG}$ ,  $\gamma_{SE}$  y  $\gamma_{EQ}$  corresponden a los factores definidos por la especificación para cada efecto de carga.

Tabla 2.1: Factores de carga para combinaciones de diseño según AASHTO LRFD (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004)

BR = fuerza de frenado de los vehículos, CE = fuerza centrífuga de los vehículos, CR = fluencia lenta, CT = fuerza de colisión de un vehículo, CV = fuerza de colisión de una embarcación, EQ = sismo, FR = fricción, IC = carga de hielo, IM = incremento por carga vehicular dinámica, LL = sobrecarga vehicular, LS = sobrecarga viva, PL = sobrecarga peatonal, SE = asentamiento, SH = contracción, TG = gradiente de temperatura, TU = temperatura uniforme, WA = carga hidráulica y presión del flujo de agua, WL = viento sobre la sobrecarga, WS = viento sobre la estructura, EV = presión vertical del peso propio

del suelo de relleno, DD = fricción negativa (downdrag), DC = peso propio de los componentes estructurales y accesorios no estructurales, DW = peso propio de las superficies de rodamiento e instalaciones para servicios públicos, EH = empuje horizontal del suelo, EL = tensiones residuales acumuladas resultantes del proceso constructivo, incluyendo las fuerzas secundarias del postensado, ES = sobrecarga de suelo.

Wibowo et al. (2013) señalaron que la probabilidad de que un sismo de diseño coincida con una carga viva significativa es mayor en regiones urbanas con alta densidad de tráfico. Para sismos de baja intensidad, el incremento de la masa modifica las propiedades dinámicas de la estructura, lo que puede reducir la demanda sísmica. Sin embargo, conforme aumenta la intensidad del sismo, este efecto disminuye debido al predominio de las fuerzas de inercia, por lo que, bajo eventos sísmicos severos, la influencia de la carga viva sobre la respuesta estructural resulta poco significativa. Posteriormente, Wibowo et al. (2014) ampliaron esta investigación mediante un estudio paramétrico, concluyendo que las propiedades dinámicas de los vehículos influyen de manera significativa en la respuesta sísmica de los puentes. Kim et al. (2011) indican que el código de diseño de puentes carreteros de la Asociación Japonesa de Carreteras (JRA) no considera la carga viva en el diseño sísmico debido a la baja probabilidad de coincidencia entre sismos y tráfico intenso. Sin embargo, sus resultados muestran que para sismos moderados la respuesta sísmica puede amplificarse al considerar los vehículos como masa adicional, mientras que un modelo dinámico más realista tiende a reducir dicha respuesta, e indica que la probabilidad de ocurrencia del evento aumenta por los embotellamientos constantes y de mayor duración.

En sistemas ferroviarios, He et al. (2011) estudiaron la interacción dinámica puente-tren en la red Shinkansen de Japón y concluyeron que la respuesta sísmica depende tanto de las características estructurales del puente como de los movimientos del terreno y de los efectos dinámicos del tren. De forma similar, Du et al. (2012) demostraron que la variación espacial del movimiento sísmico afecta significativamente la respuesta dinámica de los sistemas puente-tren en líneas férreas de alta velocidad.

Sun et al. (2015) destacan que los códigos de diseño de China y Estados Unidos consideran por separado las cargas gravitacionales, vivas y sísmicas. Mediante un análisis probabilístico concluyeron que la elevada actividad sísmica presente en gran parte del territorio chino convierte a la acción sísmica en un factor determinante para el diseño de puentes.

Si bien los sismos de subducción pueden alcanzar magnitudes elevadas y presentar una duración prolongada, los sismos intraplaca pueden presentar características que resultan relevantes para el análisis de estructuras de periodo corto a intermedio, debido a su proximidad a la fuente sísmica y a su contenido de altas frecuencias, lo que puede generar aceleraciones elevadas y mayores demandas de fuerza. Por su parte, los sismos de subducción suelen presentar una mayor duración y un contenido significativo de bajas frecuencias, características que pueden influir de manera importante en la respuesta de estructuras flexibles y de periodo largo. Estas diferencias evidencian la necesidad de considerar las características propias de cada tipo de evento sísmico al evaluar la respuesta estructural de los puentes.

Finalmente, Montes-De-Oca y Delgado-Hernández (2017) proponen el uso de redes bayesianas como herramientas de apoyo para la evaluación estructural y la toma de decisiones relacionadas con la seguridad y gestión de puentes.

### 3. Metodología

La metodología de esta investigación se fundamenta en un enfoque cuantitativo y probabilístico para evaluar el comportamiento estructural de una pila de concreto del viaducto elevado para trenes de pasajeros bajo la acción combinada de carga viva máxima y sismo. El procedimiento integra modelado estructural, automatización de simulaciones y análisis probabilístico para estimar la probabilidad de falla por flexo-compresión.

El modelo estructural tridimensional se desarrolló en SAP2000®<sup>®</sup>, donde se definieron la geometría de la pila y trabe, las propiedades mecánicas de los materiales, las condiciones de apoyo, las cargas permanentes y la carga viva, así como los registros sísmicos seleccionados. MATLAB®<sup>®</sup> se utilizó para automatizar la modificación de las variables de entrada y el procesamiento de los resultados, mientras que UNINET™ se empleó para la creación de redes bayesianas.

La investigación inició con una revisión bibliográfica sobre el comportamiento de puentes y viaductos ante cargas gravitacionales y sísmicas, el análisis probabilístico y las redes bayesianas. Paralelamente, se recopiló información geométrica, estructural y ferroviaria necesaria para definir el modelo de referencia.

Para estudiar la respuesta de la pila se realizaron 1000 simulaciones para cada registro sísmico considerado, variando el factor de amplificación sísmica (Ground Factor, GF) y la carga viva ferroviaria (Weight, W).

El número de simulaciones se definió con base en el criterio presentado por Chavarría Álvarez (2022), que relaciona el número de iteraciones con el nivel de confianza y la imprecisión esperada. Aunque para un nivel de confianza del 95 % se recomiendan alrededor de 2500 simulaciones para alcanzar una imprecisión cercana a 0.007, se adoptaron 1000 simulaciones como un compromiso entre precisión estadística y tiempo de procesamiento.

Los resultados del modelo estructural se utilizaron posteriormente como base para la construcción de redes bayesianas, con el fin de relacionar la intensidad sísmica, la carga viva y la respuesta estructural y estimar la probabilidad de falla bajo los escenarios analizados.

## 4. Caracterización del caso de estudio

### 4.1. Selección de registros sísmicos

Con el objetivo de identificar los registros sísmicos con mayor potencial de afectación sobre la estructura, se seleccionaron eventos que, por sus características y consecuencias, representan algunos de los sismos de mayor impacto ocurridos en México. Adicionalmente, se consideró el sismo de Chile de 1960, por corresponder al evento de mayor magnitud registrado instrumentalmente a nivel mundial ( $M_w$  9.5), permitiendo evaluar el comportamiento de la estructura bajo un escenario sísmico extremo.

A partir de este criterio de selección, se identificaron los registros correspondientes al sismo de Chile de 1960 y a los sismos de México de 1985 y 2017. En particular, el sismo de 1985 ocasionó severos daños materiales y pérdidas humanas en la Ciudad de México, convirtiéndose en uno de los eventos más devastadores de la historia sísmica del país. Por su parte, el sismo de 2017 produjo movimientos de elevada intensidad en la región central de México.

### 4.2. Configuración y especificaciones del tren de referencia

El sistema ferroviario de referencia utiliza unidades eléctricas múltiples compuestas por cinco coches, con configuración Mc-M-M-M-Mc y una longitud total cercana a 100 m. Cada unidad tiene una capacidad máxima de 719 pasajeros. En la Figura 4.1 se presentan imágenes de unidades ferroviarias en las cuales se puede observar una ocupación elevada.



Figura 4.1: Unidad ferroviaria de pasajeros con ocupación máxima.

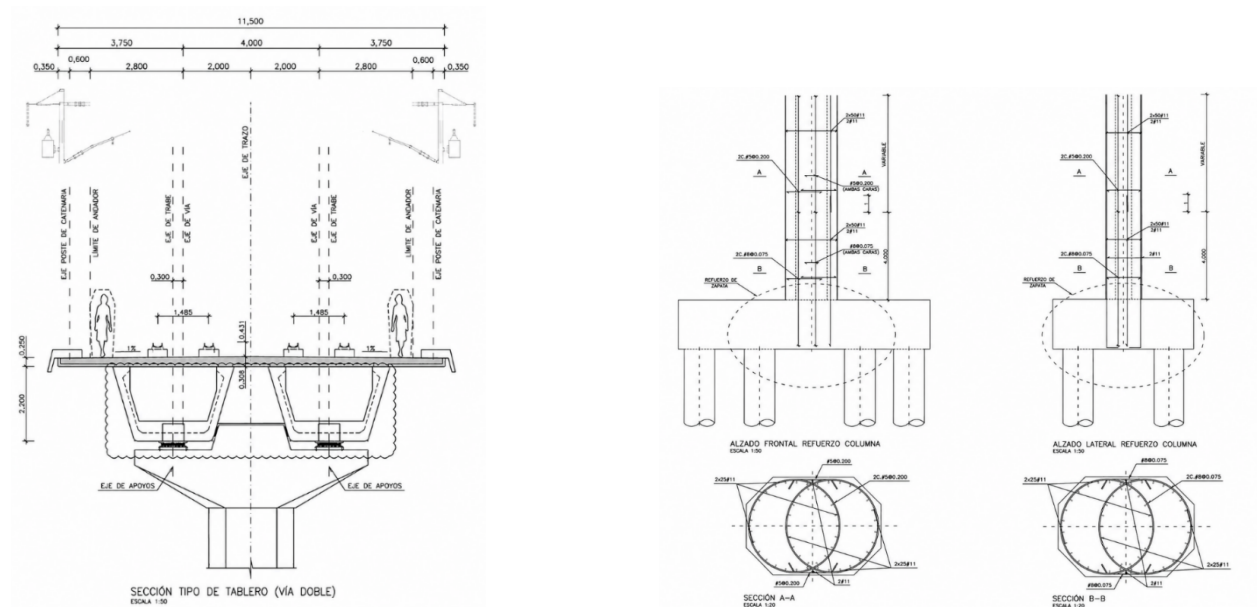
### 4.3. Viaducto elevado ferroviario

La estructura cuenta con un ancho de tablero de 11.50 m y un gálibo inferior mínimo de 5.50 m, lo que permite el paso sobre vialidades y otros obstáculos. Para su construcción se emplearon traveses isostáticos prefabricados con claros de 35 m y se consideró una pila de 8.9 m de altura.

### 4.4. Configuración estructural de referencia

Con base en la información recabada durante la investigación, se obtuvieron planos estructurales y constructivos que se utilizaron como base para el modelado. A partir de esta documentación se identificaron las características geométricas y mecánicas de los principales elementos del viaducto, incluidas sus dimensiones, secciones transversales, detalles de refuerzo, especificaciones de materiales y configuración estructural.

La documentación permitió definir las propiedades de las vigas prefabricadas tipo cajón, la pila, los capiteles y los demás elementos del sistema resistente. La Figura 4.2 muestra los principales detalles constructivos empleados como referencia.



(a) Sección doble de la estructura del viaducto elevado de referencia.

(b) Detalles de una pila del viaducto elevado de referencia.

Figura 4.2: Detalles de la trabe y pila del viaducto elevado de referencia.

## 5. Modelado estructural

### 5.1. Estimación del peso del tren

Para estimar el peso del tren de referencia se utilizaron como antecedentes el tren Renfe serie 121, con una longitud de 106.96 m y un peso de 225 t, y el tren Renfe serie 598, con una longitud de 75.93 m y un peso en vacío de 173 t. Mediante interpolación lineal se estimó el peso correspondiente a una longitud de 98.98 m.

$$T_{mex} = 173 + [(225 - 173)/(106.96 - 75.93)](98.98 - 75.93) = 211.62 \text{ t} \quad (1.1)$$

De acuerdo con la ficha técnica de Trenes Regionales y de Cercanías Civity, que utiliza trenes fabricados por Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF) (2026), los coches intermedios tienen una longitud aproximada de 16.2 m y los coches cabina de 21.5 m; estos últimos son aproximadamente 1.33 veces más largos. Considerando dos coches cabina y tres coches intermedios, se obtuvo la siguiente relación:

$$2(1.33C) + 3C = 98.98 \quad (1.2)$$

$$5.66C = 98.98 \quad (1.3)$$

$$C = 17.49 \text{ m} \quad (1.4)$$

$$1.33C = 23.26 \text{ m} \quad (1.5)$$

A partir del peso total estimado se determinó una carga lineal promedio de:

$$211.62/98.98 = 2.14 \text{ t/m} \quad (1.6)$$

Por consiguiente, el peso estimado de cada coche cabina vacío es:

$$W_{cab} = 23.26(2.14) = 49.73 \text{ t} \quad (1.7)$$

Mientras que el peso estimado de cada coche intermedio vacío resulta:

$$W_{int} = 17.49(2.14) = 37.39 \text{ t} \quad (1.8)$$

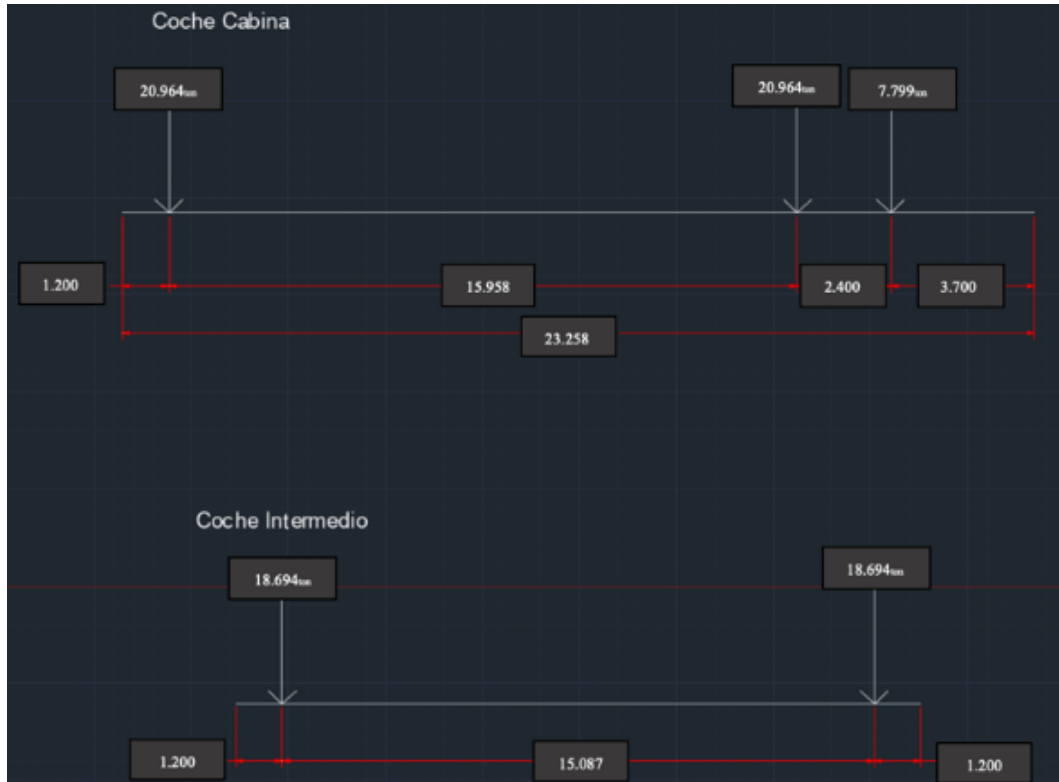


Figura 5.1: Cargas por eje del tren.

## 5.2. Modelo estructural en SAP2000®

Con base en los planos estructurales y en los datos geométricos de la trabe y pila se desarrolló en SAP2000® un modelo tridimensional del viaducto. El modelo permite incorporar las acciones actuantes y evaluar la condición de interés: carga muerta, carga viva máxima y acción sísmica. La Fig. 5.2 muestra el modelo utilizado como base de los análisis.

En el modelo se definieron las propiedades mecánicas de los materiales y la geometría de las trabes de la superestructura. Posteriormente se modeló la pila de concreto reforzado, cuya sección transversal es octagonal y tiene un área de  $39\,441.20\text{ cm}^2$ .

El refuerzo longitudinal está constituido por dos arreglos circulares con un total de 50 varillas No. 11, mientras que el confinamiento transversal se representa mediante estribos separados cada 20 cm. Los detalles geométricos y de refuerzo se muestran en la Figura 5.3.

## 5.3. Descripción del modelo y condiciones de análisis

La trayectoria de las acciones gravitacionales se idealiza como: carga permanente y carga ferroviaria  $\rightarrow$  trabes  $\rightarrow$  cabezal  $\rightarrow$  pila. En el caso sísmico, el movimiento del terreno genera fuerzas inerciales en la masa de la estructura, que se transmiten hacia la pila a través del tablero y el cabezal. Esta idealización permite evaluar la respuesta de la pila ante la combinación de carga viva máxima y excitación sísmica. La Figura 5.4 muestra los casos de carga utilizados para el modelado.

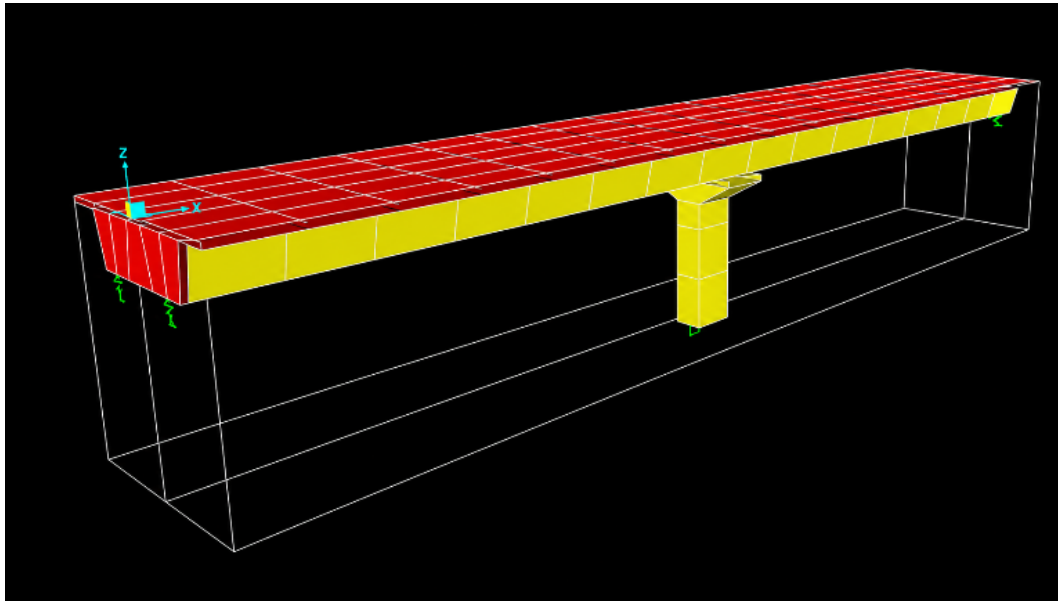
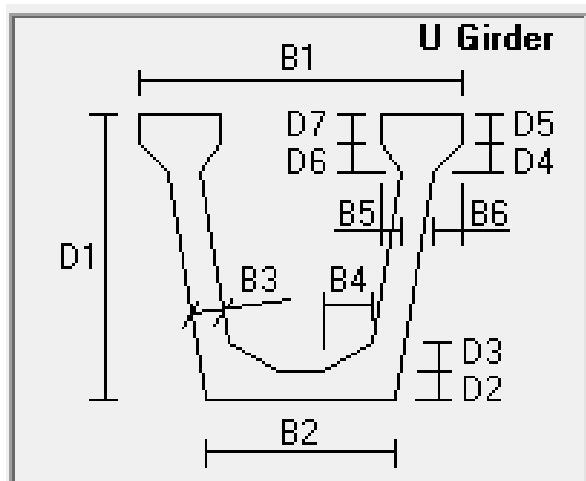
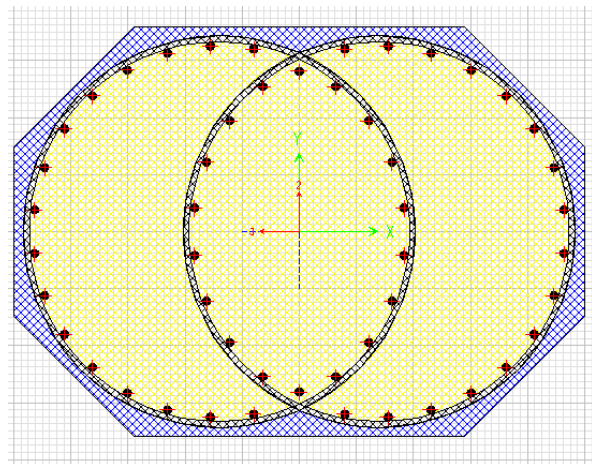


Figura 5.2: Modelo en SAP2000® de un tramo del viaducto elevado.



(a) Datos utilizados en SAP2000® para las traves.



(b) Modelo en SAP2000® de una Pila tipo del viaducto elevado

Figura 5.3: Ventanas de SAP2000® utilizadas para definir las propiedades de la trabe y la pila del viaducto.

| Load Cases     |                                      |
|----------------|--------------------------------------|
| Load Case Name | Load Case Type                       |
| DEAD           | Linear Static                        |
| MODAL          | Modal                                |
| TrenMovimiento | Moving Load                          |
| Baranda        | Linear Static                        |
| TrenLL         | Linear Multi-step Static             |
| Gravity        | Nonlinear Static                     |
| Prestress      | Linear Static                        |
| sismo_chile    | Nonlinear Direct Integration History |

Figura 5.4: Casos de carga en el modelo de SAP2000®.

#### 5.4. Cargas consideradas en el modelo

El análisis estructural considera distintos escenarios de demanda y la influencia de la no linealidad en la distribución de esfuerzos y deformaciones. La verificación de falla se realiza comparando las fuerzas internas obtenidas del modelo con las curvas de interacción carga axial–momento flexionante de la sección. Se considera que existe falla por flexo-compresión cuando la demanda supera la capacidad resistente definida por dichas curvas.

Para cada simulación, SAP2000® proporciona como principales variables de respuesta la carga axial  $P$ , las fuerzas cortantes  $V2$  y  $V3$ , los momentos flexionantes  $M2$  y  $M3$  y el momento torsionante  $MT$ . También se registran los desplazamientos  $U1$ ,  $U2$  y  $U3$  y los giros  $R1$ ,  $R2$  y  $R3$  del nodo ubicado en la unión entre la pila y el cabezal. Estas variables se procesan posteriormente mediante MATLAB® y forman parte de la red bayesiana.

El análisis sísmico parte de la definición de las propiedades dinámicas de la estructura mediante un análisis modal. La intensidad de la excitación se controla mediante el factor de amplificación  $GF$  (Ground Factor), el cual se modifica en la casilla del factor de escala mostrado en la Figura 5.5, mientras que el peso del tren se representa mediante  $W$  (Weight). La variación conjunta de  $GF$  y  $W$  permite estudiar la respuesta de la pila ante diferentes niveles de excitación y ocupación ferroviaria.

La acción sísmica se incorpora mediante registros de movimiento del terreno correspondientes a los sismos de México de 1985 (estación El Paraíso) y 2017 (estación Tacubaya) y de Chile de 1960. Los acelerogramas se escalan mediante factores de amplificación de 1, 2, 3 y 4 para generar escenarios hipotéticos de intensidad creciente. Estos factores representan

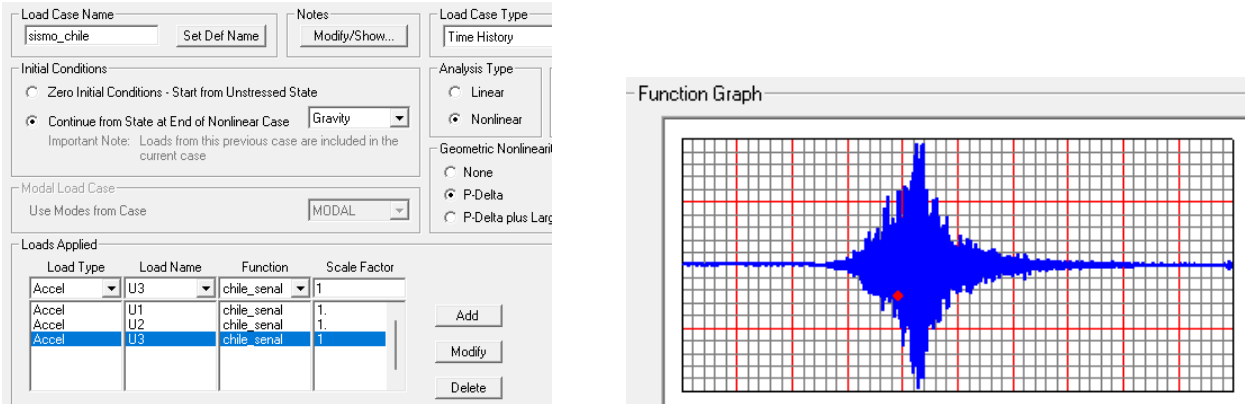


Figura 5.5: Caso de carga del sismo y acelerograma.

niveles de demanda para el análisis y no necesariamente eventos sísmicos específicos. De esta forma, la variable aleatoria  $GF$  asumió una distribución uniforme con valores enteros de 1 a 4 ( $GF \sim \mathcal{U}(1, 4)$ ).

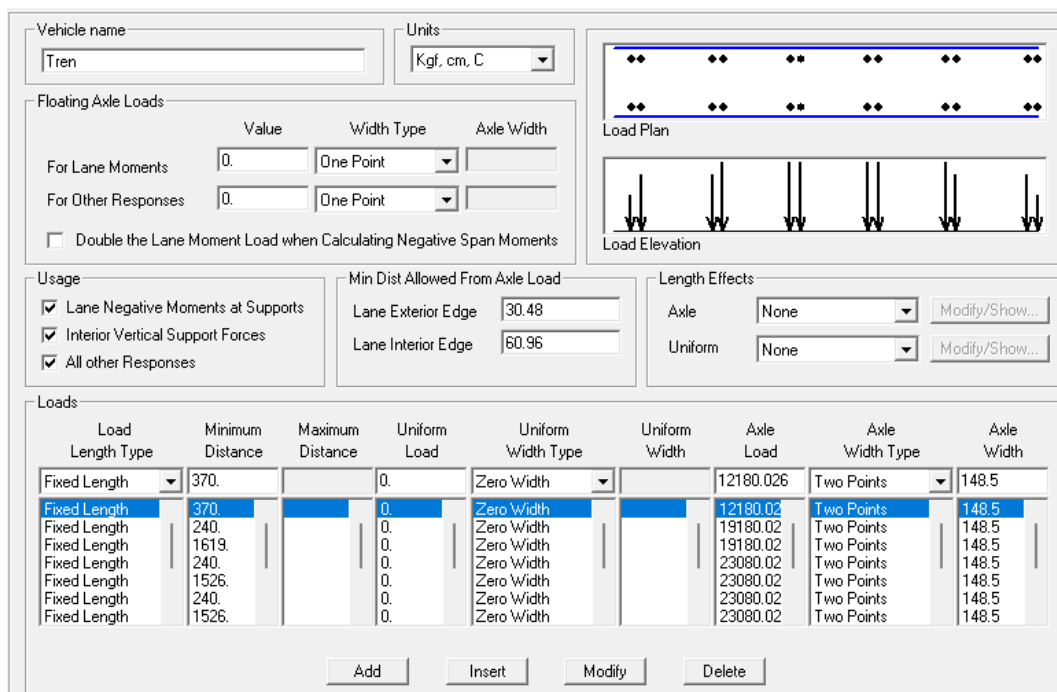


Figura 5.6: Líneas de aplicación de carga ferroviaria.

La carga viva ferroviaria representa el efecto de la ocupación del tren y constituye una de las variables principales de la investigación. Se incorpora mediante el patrón de carga correspondiente al tren mostrado en la Figura 5.6. Antes de cada simulación, MATLAB® modifica automáticamente la carga asociada con los 719 pasajeros. El peso individual se genera mediante una distribución normal con una media de 74 kg y una desviación estándar de 10 kg; así, cada simulación representa una condición diferente de ocupación y peso total del tren. Matemáticamente la distribución usada para la variable aleatoria  $W$  fue una normal

con media de 53000 kg y desviación estándar 7200 kg ( $W \sim \mathcal{N}(53000, 7200)$ ).

La carga muerta incluye el peso propio de los elementos estructurales, calculado por SAP2000® a partir de la geometría, sección y propiedades de los materiales, así como las cargas permanentes adicionales consideradas en el modelo. Entre ellas se encuentran los elementos complementarios representados mediante patrones específicos, como la carga de baranda.

Las trabes de la superestructura no se modelan como elementos en voladizo ni como elementos empotrados directamente al cabezal. En los puntos de apoyo se incorporan elementos Link correspondientes a dispositivos tipo bearing. Para el elemento BBRG1, las traslaciones U1, U2 y U3 se restringen mediante una rigidez muy elevada, mientras que las rotaciones R1, R2 y R3 permanecen libres. La conexión trabe-cabezal se idealiza, por tanto, como un apoyo con restricción traslacional y libertad rotacional; en la base de la pila se considera un apoyo empotrado.

La pila central recibe las acciones transmitidas por los apoyos correspondientes a los dos claros adyacentes. La trayectoria puede representarse como: trabe del claro izquierdo  $\rightarrow$  apoyo  $\rightarrow$  cabezal  $\rightarrow$  pila, y trabe del claro derecho  $\rightarrow$  apoyo  $\rightarrow$  cabezal  $\rightarrow$  pila. En una condición geométrica y de carga simétrica, ambas contribuciones pueden ser aproximadamente equivalentes; sin embargo, la pila no recibe permanentemente exactamente media trabe de cada lado. Bajo carga ferroviaria, las reacciones dependen de la posición y distribución de las cargas del tren.

En el modelo se identifican elementos Link de apoyo asociados con las trabes, entre ellos BBRG1-1, BBRG1-2, BFIXSS-1 y BFSFIX-2. Para BBRG1-1 y BBRG1-2, la rigidez de traslación en las tres direcciones es de  $1.019716 \times 10^{11}$  kgf/cm, por lo que su comportamiento es prácticamente rígido frente a las traslaciones, mientras que las rotaciones permanecen libres.

## 5.5. Integración entre MATLAB® y SAP2000®

Con el propósito de automatizar el análisis estructural y realizar las simulaciones de manera eficiente, se desarrollaron rutinas en MATLAB® que interactúan directamente con el modelo implementado en SAP2000® (Figura 5.7).

Estas rutinas modifican las condiciones de carga, ejecutan los análisis y almacenan los resultados para su posterior procesamiento estadístico y probabilístico.

La rutina *ModificarPesosSAP.m* implementa las variaciones definidas para cada escenario. A partir de los valores de GF y W, modifica la carga viva y la aceleración sísmica en el archivo base y genera una copia del modelo con las condiciones correspondientes a la simulación.

La rutina *Analisis.m* trabaja en conjunto con *get\_max\_abs\_forces\_column.m* procesa los resultados obtenidos de SAP2000®. Extrae los principales parámetros de respuesta estructural, incluidos los elementos mecánicos, desplazamientos y giros de la pila. Los valores máximos de cada simulación se almacenan en archivos con extensión .sae y se organizan para su análisis estadístico posterior.

El análisis no lineal permite estimar la respuesta de la estructura bajo los registros sísmicos considerados y sus diferentes niveles de intensidad. La evaluación de falla, sin embargo,

se mantiene independiente del algoritmo de plastificación del software y se realiza mediante la comparación de las solicitaciones con las curvas de interacción de la sección.

La rutina *Run\_simul.m* coordina el proceso completo: llama a *ModificarPesosSAP.m*, ejecuta el análisis estructural en SAP2000® y activa posteriormente la rutina *Analisis.m* para extraer y almacenar los resultados. Además, permite definir el número total de ciclos de simulación requeridos.

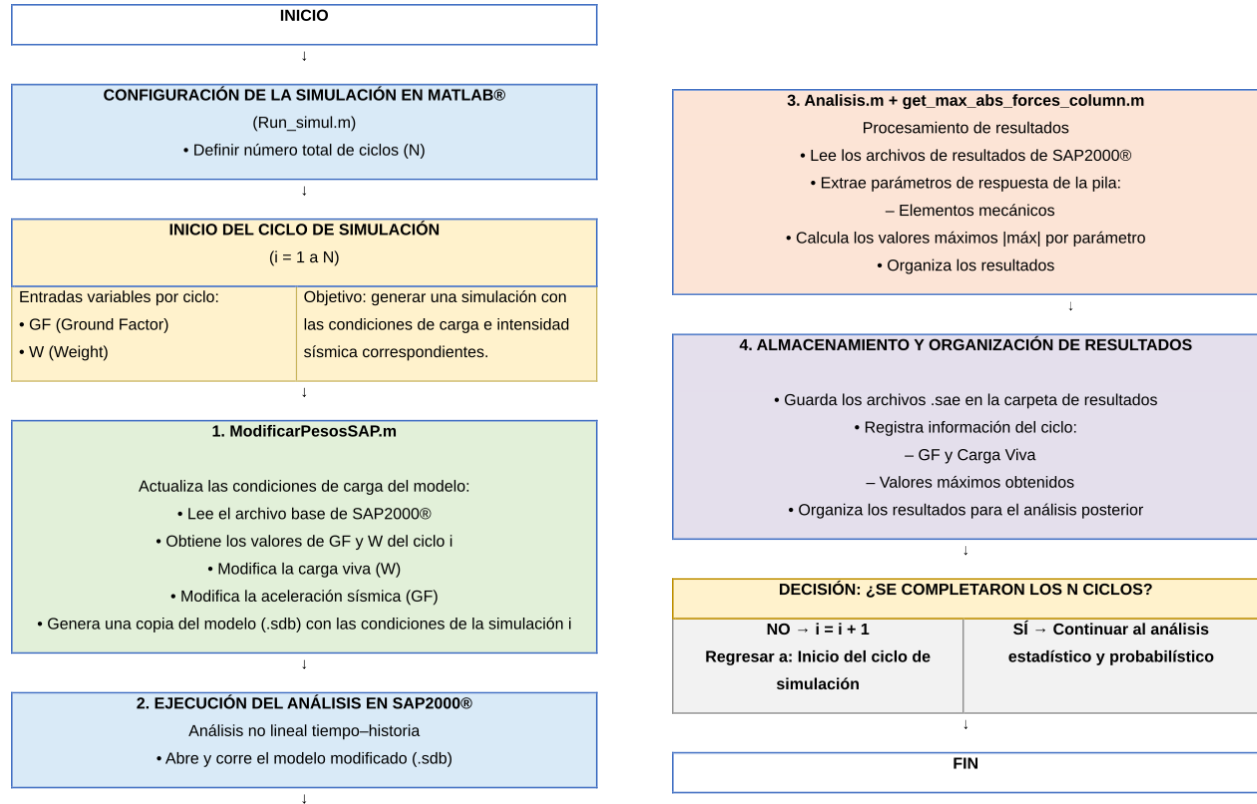


Figura 5.7: Diagrama de flujo MATLAB®–SAP2000®.

Debido a que los registros sísmicos se escalaron para generar escenarios de intensidad creciente, la probabilidad de falla estimada corresponde al espacio de escenarios simulados y no debe interpretarse directamente como una tasa anual de falla de la estructura en condiciones reales.

La red bayesiana no elimina las incertidumbres del modelo estructural. La calidad de sus resultados depende de la representatividad de las simulaciones, de la topología de la red, de las distribuciones marginales, de las relaciones de dependencia y del número de muestras. Por ello, las probabilidades obtenidas deben interpretarse como probabilidades condicionadas al conjunto de escenarios y supuestos empleados.

Entre las principales ventajas de esta metodología se encuentran la posibilidad de incorporar varias fuentes de incertidumbre, representar dependencias entre variables y actualizar la probabilidad de falla cuando se dispone de nueva evidencia. Estas características son especialmente útiles en infraestructura, donde la respuesta estructural depende de múltiples variables que no necesariamente son independientes (Fenton & Neil, 2018; Hanea et al.,

2015).

La integración mantiene separados el modelo físico y el modelo probabilístico: SAP2000® calcula la respuesta mecánica y, posteriormente, la red bayesiana representa la distribución y dependencia observadas en las simulaciones. De esta manera, la red no sustituye el análisis estructural, sino que utiliza sus resultados para realizar inferencia probabilística.

El flujo general del procedimiento es: definición de variables aleatorias → generación de un escenario mediante MATLAB® → modificación del modelo SAP2000® → análisis estructural → extracción y almacenamiento de resultados → construcción y cuantificación de la red bayesiana → evaluación del estado límite → estimación de la probabilidad de falla.

La metodología puede interpretarse como una cadena de tres niveles: SAP2000® representa el comportamiento mecánico; MATLAB® automatiza la generación de escenarios y el procesamiento de resultados; y UNINET™ representa estadísticamente la dependencia entre variables y permite realizar inferencia probabilística.

UNINET™ permite construir redes mediante nodos probabilísticos, relaciones de dependencia y procedimientos de muestreo, además de realizar condicionamiento y análisis de sensibilidad. En esta investigación se utiliza para estudiar la influencia de GF y W sobre la respuesta de la pila y, posteriormente, sobre la probabilidad de falla.

## 6. Redes bayesianas y análisis probabilístico

En el procedimiento probabilístico, las muestras generadas por la red se contrastan con la condición resistente definida por la curva de interacción. Cada muestra se clasifica en estado seguro o de falla, y la razón entre el número de muestras que satisfacen la condición de falla y el número total de muestras permite estimar la probabilidad de falla del conjunto de escenarios analizados.

La función de estado límite se relaciona con la capacidad de la pila frente a la combinación de carga axial y momento flexionante. Por tanto, la red no sustituye el cálculo de resistencia de la sección; utiliza la respuesta estructural simulada para estimar con qué frecuencia las combinaciones de demanda superan la capacidad.

Una vez cuantificada la red, es posible realizar inferencia condicionando una o varias variables. En el contexto de esta investigación, esto permite analizar cómo cambia la probabilidad de falla con el factor sísmico, el peso del tren o determinados niveles de respuesta estructural.

### 6.1. Inferencia, construcción y fundamentos de la red

La dependencia probabilística no debe confundirse con una relación causal demostrada. En este trabajo, la orientación de los arcos representa la estructura de dependencia y la trayectoria de información entre las variables de entrada y las respuestas. La interpretación física de los resultados se sustenta en el modelo estructural de SAP2000®<sup>®</sup>, mientras que la red bayesiana representa probabilísticamente los escenarios simulados.

La dependencia es fundamental para el problema estudiado. Un incremento de la intensidad sísmica puede generar simultáneamente aumentos en el momento flexionante, la fuerza cortante y los desplazamientos. Estas variables no deben tratarse como independientes cuando las simulaciones muestran una relación sistemática entre ellas.

La cuantificación de una red bayesiana consiste en asignar las distribuciones marginales y las relaciones de dependencia necesarias para representar la distribución conjunta de las variables. En una Non-Parametric Bayesian Network (NPBN), las variables pueden conservar distribuciones marginales empíricas y la dependencia puede representarse mediante correlaciones de rango y construcciones basadas en cópulas, sin recurrir necesariamente a una discretización previa (Paprotny et al., 2020).

Para cada registro sísmico se construye una red independiente, con el propósito de distinguir las diferencias en la respuesta probabilística asociadas con las características de cada acelerograma. Se consideran los registros de Chile de 1960 y México de 1985 y 2017.

La red se establece de forma que GF y W actúen como variables de entrada y las variables

estructurales como nodos dependientes. Esto no implica que GF y W sean las únicas variables que influyen físicamente en la respuesta, sino que son las variables de incertidumbre modificadas explícitamente durante las simulaciones. Las demás propiedades geométricas, materiales, condiciones de apoyo y parámetros del modelo permanecen definidos conforme al modelo estructural.

El procedimiento genera una base de datos multivariada en la que cada fila representa una simulación y cada columna una variable. Las variables de entrada principales son GF y W. Las respuestas incluyen P, V2, V3, M2, M3, MT, U1, U2, U3, R1, R2 y R3 (Tabla 6.1). Esta base de datos constituye el vínculo entre las simulaciones estructurales y la cuantificación probabilística.

La construcción de la red parte de los resultados obtenidos mediante SAP2000® y del proceso de automatización desarrollado en MATLAB®. Para cada simulación se modifican las variables de entrada, se calcula la respuesta de la pila y se almacenan los valores máximos de las variables de interés.

Mendoza-Lugo et al. (2022) utilizaron una NPN para representar la dependencia multivariada de datos de cargas vehiculares obtenidos mediante sistemas Weigh-in-Motion. El estudio muestra que las redes pueden conservar las relaciones de dependencia entre variables de carga y generar observaciones sintéticas cuando la información disponible es limitada.

Esta aplicación resulta pertinente para puentes y viaductos, donde las acciones sísmicas, las cargas móviles y la respuesta estructural presentan incertidumbre. Mendoza-Lugo et al. (2019) desarrollaron una red bayesiana no paramétrica para evaluar la probabilidad condicional de falla de una pila de concreto reforzado sometida simultáneamente a carga viva y sismo. Este antecedente constituye una referencia metodológica directa para la presente investigación.

La aplicación de redes bayesianas a problemas de confiabilidad estructural permite representar conjuntamente las incertidumbres asociadas con las acciones, las propiedades resistentes y la respuesta de la estructura. En lugar de evaluar la falla únicamente mediante valores deterministas, la metodología permite estimar la probabilidad de exceder una condición límite considerando la variabilidad de las variables de entrada.

La metodología NPN está orientada a problemas de alta dimensionalidad y dependencia multivariada. Hanea et al. (2015) revisaron sus fundamentos y aplicaciones en confiabilidad, seguridad y evaluación de riesgo, mientras que Paprotny et al. (2020) desarrollaron BANSHEE, una implementación en MATLAB® para la cuantificación, validación e inferencia de redes bayesianas no paramétricas.

Este enfoque resulta útil cuando las respuestas estructurales obtenidas de SAP2000® presentan distribuciones no normales, asimetrías o colas pronunciadas. En lugar de imponer una distribución analítica, la distribución de cada variable puede obtenerse directamente de las observaciones generadas durante las simulaciones.

Debido a que las variables estructurales consideradas son predominantemente continuas, las redes bayesianas no paramétricas (NPN) permiten trabajar con distribuciones marginales empíricas y estructuras de dependencia sin requerir una forma paramétrica única para cada variable (los datos determinan la forma de la distribución) (Hanea et al., 2015).

En el presente trabajo, la topología se orienta desde las variables de entrada hacia la respuesta estructural. GF y W actúan como variables de entrada; las respuestas obtenidas de SAP2000® se incorporan como nodos dependientes y, finalmente, se relacionan con el

estado límite de falla por flexo-compresión.

La ausencia de un arco entre dos variables representa un supuesto de independencia condicional. Por ello, la definición de la topología debe sustentarse en el conocimiento físico del problema, en evidencia estadística o en procedimientos de aprendizaje de estructura. Hanea et al. (2015) señalan que la selección y cuantificación de la estructura son etapas fundamentales de la construcción de una red bayesiana.

Una red bayesiana está constituida por tres componentes principales: la estructura gráfica, las distribuciones marginales de los nodos y las relaciones condicionales entre ellos. La estructura gráfica define las conexiones; las distribuciones marginales representan el comportamiento individual de las variables; y las relaciones condicionales describen cómo cambia una variable cuando se dispone de información sobre sus nodos padres.

La utilidad de esta formulación en ingeniería radica en que una red puede integrar resultados de simulaciones numéricas, distribuciones probabilísticas, mediciones y conocimiento experto, siempre que las relaciones y los supuestos del modelo estén definidos de manera consistente (Fenton & Neil, 2018).

En el contexto de esta investigación, la hipótesis puede asociarse con la ocurrencia de falla de la pila, mientras que la evidencia puede estar relacionada con la intensidad sísmica, la carga viva ferroviaria o cualquiera de las variables de respuesta obtenidas del modelo estructural.

La actualización de la probabilidad de una hipótesis cuando se dispone de evidencia constituye uno de los principios centrales de la inferencia bayesiana. El Teorema de Bayes relaciona una probabilidad previa con la evidencia observada para obtener una probabilidad posterior.

La factorización de la distribución conjunta constituye la base matemática para realizar inferencias probabilísticas y actualizar las distribuciones cuando se dispone de nueva evidencia. Pearl (1988) desarrolló una formulación sistemática de las redes bayesianas como representación del conocimiento probabilístico y de los mecanismos de actualización de creencias.

Las redes bayesianas (Bayesian Networks, BN) son modelos gráficos probabilísticos utilizados para representar y analizar relaciones de dependencia entre variables aleatorias. Su estructura se expresa mediante un grafo acíclico dirigido (DAG), en el que los nodos representan variables y los arcos dirigidos representan relaciones de dependencia probabilística. Esta representación permite descomponer una distribución conjunta de alta dimensión en distribuciones marginales y condicionales, facilitando el análisis de sistemas con múltiples fuentes de incertidumbre Koller y Friedman (2009).

Tabla 6.1: Variables del modelo de análisis.

| Tipo      | Variable                          | Función en la red                            |
|-----------|-----------------------------------|----------------------------------------------|
| Entrada   | $GF \sim \mathcal{U}(1, 4)$       | Factor de amplificación de la acción sísmica |
| Entrada   | $W \sim \mathcal{N}(53000, 7200)$ | Peso total de la carga viva ferroviaria      |
| Respuesta | P                                 | Carga axial máxima                           |

*Tabla 6.1 (continuación) Variables del modelo de análisis*

| Tipo      | Variable   | Función en la red   |
|-----------|------------|---------------------|
| Respuesta | V2, V3     | Fuerzas cortantes   |
| Respuesta | M2, M3     | Momento flexionante |
| Respuesta | MT         | Momento torsionante |
| Respuesta | U1, U2, U3 | Desplazamientos     |
| Respuesta | R1, R2, R3 | Giros               |

## 7. Discusión

Durante el análisis de resultados se identificaron las respuestas asociadas con las variaciones de los parámetros de entrada. Aunque las cargas y los niveles de demanda aumentaron progresivamente, algunos resultados no mostraron una tendencia proporcional; varios valores permanecieron concentrados en una misma región de la curva de interacción. Los archivos .sae, que contienen los valores máximos obtenidos en cada simulación, fueron procesados mediante UNINET™ siguiendo la metodología de Mendoza-Lugo et al. (2019). La Figura 7.1 muestra las redes desarrolladas para los registros sísmicos considerados. La estructura probabilística permitió analizar las relaciones de dependencia entre las variables y evaluar el comportamiento de la pila bajo los escenarios estudiados sin realizar nuevas simulaciones estructurales.

Se realizaron 1000 simulaciones para cada registro, considerando la variabilidad de GF y W.

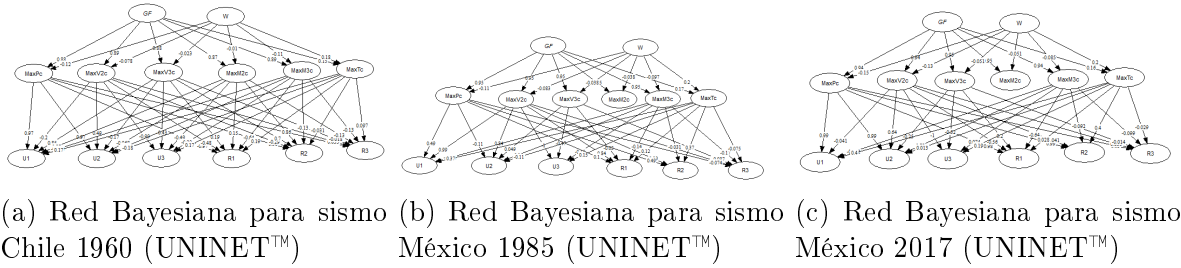


Figura 7.1: Redes bayesianas para los registros sísmicos considerados.

La capacidad resistente de la pila se evaluó mediante curvas de interacción carga axial-momento flexionante uniaxiales, obtenidas para cada eje principal de la sección. Debido a que la respuesta estructural se analizó de manera independiente en las direcciones longitudinal y transversal, la verificación de falla se efectuó comparando las solicitaciones de cada dirección con su curva correspondiente. Se consideró que existe falla cuando la combinación de carga axial y momento flexionante supera la capacidad definida por la curva de interacción. La Figura 7.2 presenta la curva para una pila de concreto con resistencia a compresión de  $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$  y muestra ejemplos de condición de falla y condición segura.

Con ayuda de la red bayesiana se generaron diez millones de datos para cada uno de los sismos analizados, lo que permite repetir el procedimiento para estimar la frecuencia con la que las muestras superan la capacidad resistente. Durante el análisis de resultados se identificaron las respuestas asociadas con las variaciones de los parámetros de entrada. Aunque las cargas y los niveles de demanda aumentaron progresivamente, algunos resultados

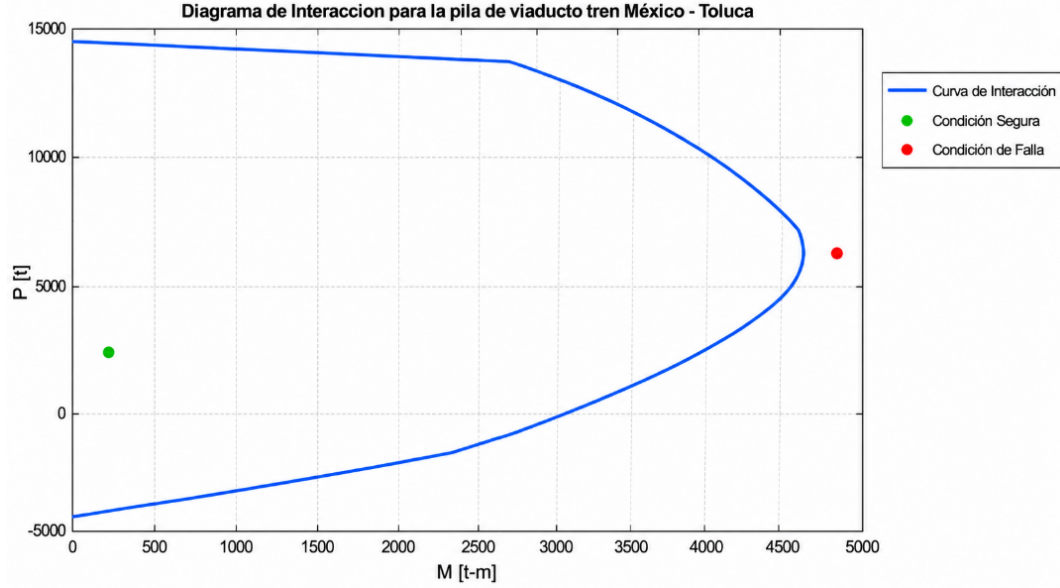


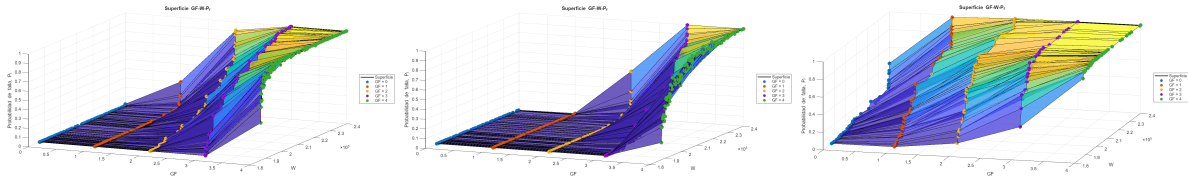
Figura 7.2: Curva de interacción para la pila de concreto.

no mostraron una tendencia proporcional; varios valores permanecieron concentrados en una misma región de la curva de interacción.

Para el cálculo de la probabilidad de falla, se contabilizó el número de simulaciones que sobrepasaron la curva de interacción y se comparó con el número total de simulaciones. De esta forma, se obtuvo una probabilidad de falla  $PF=0$ , ya que no se logró sobrepasar la curva de interacción para los valores iniciales de GF. Los valores de referencia reportados en la literatura oscilan entre 0.00015 y 0.00038 para puentes, mientras que para estructuras en general se reporta un valor de  $1 \times 10^{-6}$  (Chavarría Álvarez, 2022).

Con el propósito de evaluar la sensibilidad de la probabilidad de falla ante una disminución de la capacidad resistente de la pila, se plantearon escenarios adicionales mediante la reducción progresiva del área de la sección transversal de concreto. Esta modificación permitió variar la capacidad resistente de la sección y, en consecuencia, modificar la curva de interacción momento–carga axial. Para cada escenario se realizaron las simulaciones probabilísticas. La Figura 7.3 muestra las superficies de probabilidad de falla obtenidas para el escenario propuesto, permitiendo observar la interacción entre las dos variables de entrada, GF y W, y su efecto sobre la probabilidad de falla PF. En este escenario se observa que la incorporación de la carga viva y su incremento producen un aumento en la probabilidad de falla. Para la sección transversal reducida, este incremento resulta particularmente significativo, alcanzando valores de probabilidad de falla que superan el incremento relativo del 20 % establecido como referencia en la hipótesis de este trabajo. Estos resultados muestran que la reducción de la capacidad resistente de la sección modifica de manera importante la respuesta probabilística de la pila y permite identificar condiciones en las que la probabilidad de exceder la curva de interacción adquiere valores significativos.

Con base en las gráficas presentadas en la Figura 7.3, se elaboró la Tabla 7.1, en la cual se cuantifica el incremento de la probabilidad de falla asociado a un rango de carga



a. Superficie de PF para Sismo de México 1985 pila con sección reducida. b. Superficie de PF para Sismo de México 2017 pila con sección reducida. c. Superficie de PF para Sismo de Chile pila con sección reducida.

Figura 7.3: Superficies de probabilidad de falla en función de GF y W para la sección transversal reducida.

respecto a la condición de carga máxima considerada en el análisis. Para ello, se tomó como referencia la probabilidad de falla obtenida para la carga máxima y se determinó, para cada rango de carga inferior, el porcentaje que debe incrementarse su probabilidad de falla para alcanzar dicho valor de referencia. Esta relación permite evaluar el efecto del incremento de la carga sobre la probabilidad de falla y establecer una comparación directa entre las diferentes condiciones de carga analizadas para la pila con el área transversal reducida.

Tabla 7.1: Probabilidades de falla para la sección transversal reducida.

| GF    | Rango W  | Simulaciones | N_fallas | Pf     | Pf_max_GF | Relacion_Pf |
|-------|----------|--------------|----------|--------|-----------|-------------|
| Mex85 |          |              |          |        |           |             |
| 1     | 1.87E+05 | 1.98E+05     | 3565     | 0.5989 | 0.9996    | 66.9 %      |
| 1     | 1.98E+05 | 2.08E+05     | 2159     | 0.9185 | 0.9996    | 8.8 %       |
| 1     | 2.08E+05 | 2.19E+05     | 1866     | 0.9775 | 0.9996    | 2.3 %       |
| 1     | 2.19E+05 | 2.29E+05     | 1631     | 0.9926 | 0.9996    | 0.7 %       |
| 1     | 2.29E+05 | 2.40E+05     | 2366     | 0.9996 | 0.9996    | 0.0 %       |
| 2     | 1.87E+05 | 1.98E+05     | 3765     | 0.9907 | 1.0000    | 0.9 %       |
| 2     | 1.98E+05 | 2.08E+05     | 2149     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 2     | 2.08E+05 | 2.19E+05     | 1749     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 2     | 2.19E+05 | 2.29E+05     | 1651     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 2     | 2.29E+05 | 2.40E+05     | 2413     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 1.87E+05 | 1.98E+05     | 2906     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 1.98E+05 | 2.08E+05     | 1690     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 2.08E+05 | 2.19E+05     | 1334     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 2.19E+05 | 2.29E+05     | 1225     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 2.29E+05 | 2.40E+05     | 1802     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 1.87E+05 | 1.98E+05     | 2972     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 1.98E+05 | 2.08E+05     | 1706     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.08E+05 | 2.19E+05     | 1458     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.19E+05 | 2.29E+05     | 1309     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.29E+05 | 2.40E+05     | 1814     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| Mex17 |          |              |          |        |           |             |
| 1     | 1.87E+05 | 1.98E+05     | 3474     | 0.5993 | 0.9981    | 66.5 %      |
| 1     | 1.98E+05 | 2.08E+05     | 3113     | 0.8905 | 0.9981    | 12.1 %      |
| 1     | 2.08E+05 | 2.19E+05     | 1447     | 0.9627 | 0.9981    | 3.7 %       |
| 1     | 2.19E+05 | 2.29E+05     | 1319     | 0.9871 | 0.9981    | 1.1 %       |
| 1     | 2.29E+05 | 2.40E+05     | 2599     | 0.9981 | 0.9981    | 0.0 %       |
| 2     | 1.87E+05 | 1.98E+05     | 3649     | 0.9915 | 1.0000    | 0.9 %       |
| 2     | 1.98E+05 | 2.08E+05     | 3138     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 2     | 2.08E+05 | 2.19E+05     | 1372     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 2     | 2.19E+05 | 2.29E+05     | 1364     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 2     | 2.29E+05 | 2.40E+05     | 2635     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 1.87E+05 | 1.98E+05     | 1788     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 1.98E+05 | 2.08E+05     | 1557     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 2.08E+05 | 2.19E+05     | 716      | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 3     | 2.19E+05 | 2.29E+05     | 675      | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |

Tabla 7.1 (continuación) Probabilidades de falla para la sección transversal reducida

| GF    | Rango W  |          | Simulaciones | N_fallas | Pf     | Pf_max_GF | Relacion_Pf |
|-------|----------|----------|--------------|----------|--------|-----------|-------------|
| 3     | 2.29E+05 | 2.40E+05 | 1290         | 1290     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 1.87E+05 | 1.98E+05 | 2521         | 2521     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 1.98E+05 | 2.08E+05 | 2126         | 2126     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.08E+05 | 2.19E+05 | 1038         | 1038     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.19E+05 | 2.29E+05 | 927          | 927      | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.29E+05 | 2.40E+05 | 1696         | 1696     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| Chile |          |          |              |          |        |           |             |
| 1     | 1.88E+05 | 1.98E+05 | 2455         | 269      | 0.1096 | 0.7662    | 599.3 %     |
| 1     | 1.98E+05 | 2.09E+05 | 2738         | 933      | 0.3408 | 0.7662    | 124.9 %     |
| 1     | 2.09E+05 | 2.19E+05 | 385          | 185      | 0.4805 | 0.7662    | 59.5 %      |
| 1     | 2.19E+05 | 2.29E+05 | 406          | 233      | 0.5739 | 0.7662    | 33.5 %      |
| 1     | 2.29E+05 | 2.40E+05 | 1557         | 1193     | 0.7662 | 0.7662    | 0.0 %       |
| 2     | 1.88E+05 | 1.98E+05 | 2927         | 1165     | 0.3980 | 0.9527    | 139.4 %     |
| 2     | 1.98E+05 | 2.09E+05 | 2971         | 2204     | 0.7418 | 0.9527    | 28.4 %      |
| 2     | 2.09E+05 | 2.19E+05 | 437          | 372      | 0.8513 | 0.9527    | 11.9 %      |
| 2     | 2.19E+05 | 2.29E+05 | 410          | 375      | 0.9146 | 0.9527    | 4.2 %       |
| 2     | 2.29E+05 | 2.40E+05 | 1755         | 1672     | 0.9527 | 0.9527    | 0.0 %       |
| 3     | 1.88E+05 | 1.98E+05 | 2951         | 2258     | 0.7652 | 0.9989    | 30.5 %      |
| 3     | 1.98E+05 | 2.09E+05 | 2966         | 2832     | 0.9548 | 0.9989    | 4.6 %       |
| 3     | 2.09E+05 | 2.19E+05 | 434          | 427      | 0.9839 | 0.9989    | 1.5 %       |
| 3     | 2.19E+05 | 2.29E+05 | 451          | 447      | 0.9911 | 0.9989    | 0.8 %       |
| 3     | 2.29E+05 | 2.40E+05 | 1781         | 1779     | 0.9989 | 0.9989    | 0.0 %       |
| 4     | 1.88E+05 | 1.98E+05 | 4939         | 4832     | 0.9783 | 1.0000    | 2.2 %       |
| 4     | 1.98E+05 | 2.09E+05 | 5114         | 5107     | 0.9986 | 1.0000    | 0.1 %       |
| 4     | 2.09E+05 | 2.19E+05 | 727          | 727      | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.19E+05 | 2.29E+05 | 739          | 739      | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |
| 4     | 2.29E+05 | 2.40E+05 | 2865         | 2865     | 1.0000 | 1.0000    | 0.0 %       |

## 8. Conclusiones

La presente investigación evaluó el comportamiento estructural de una pila del viaducto elevado para trenes de pasajeros bajo la acción simultánea de carga viva máxima y excitación sísmica, mediante la integración del modelo estructural en SAP2000® y el análisis probabilístico basado en redes bayesianas. El estudio permitió analizar una combinación extrema de acciones relevante para estructuras de transporte masivo.

En este trabajo, el valor del 20 % establecido en la hipótesis se interpreta como un incremento relativo de la probabilidad de falla con respecto al valor mínimo calculado para cada sección analizada. El objetivo principal fue determinar la influencia de la carga muerta y viva máxima del tren cuando actúa simultáneamente con el sismo. Los resultados mostraron que la amplificación de la acción sísmica produjo los cambios más significativos en la respuesta de la pila, mientras que la variación de la carga viva no resultó determinante dentro del escenario analizado de la sección transversal original de la pila. Por lo tanto, la hipótesis no se cumple para la sección original. Sin embargo, el análisis de sensibilidad mostró que, ante una reducción de la capacidad resistente, la carga viva adquiere una influencia significativa sobre la probabilidad de falla, alcanzándose valores superiores al 20 % planteado en la hipótesis.

La investigación permitió desarrollar una metodología de automatización entre MATLAB® y SAP2000® e implementar redes bayesianas para el análisis probabilístico de la respuesta estructural. La integración de estas herramientas constituye una base metodológica para investigaciones posteriores.

## Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1998). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2004). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
- Bühler, D. (2022). La construcción del Ferrocarril Mexicano. *Mirada Ferroviaria*, 15(46), 10-24.
- Chavarría Álvarez, A. (2022). *Probabilidad de falla de la pila de un puente vehicular sujeto a carga viva y socavación* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF). (2026). *CAF México*. <https://www.cafmobility.com/mx/>
- Delgado, D. J., Jiménez, J. O., Martínez, L. H., González, J., & Arteaga, J. C. (2010). Efecto de la sobrecarga en puentes con problemas de socavación en las pilas de soporte. *Memorias del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 1-17.
- Du, X. T., Xu, Y. L., & Xia, H. (2012). Dynamic Interaction of Bridge–Train System Under Non-Uniform Seismic Ground Motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(1), 139-157. <https://doi.org/10.1002/eqe.1122>
- Fenton, N., & Neil, M. (2018). *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks* (2.<sup>a</sup> ed.). CRC Press.
- Hanea, A., Morales-Nápoles, O., & Ababei, D. (2015). Non-parametric Bayesian networks: Improving theory and reviewing applications. *Reliability Engineering & System Safety*, 144, 265-284. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.07.027>
- He, X., Kawatani, M., Hayashikawa, T., & Matsumoto, T. (2011). Numerical Analysis on Seismic Response of Shinkansen Bridge–Train Interaction System Under Moderate Earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10(1), 85-97. <https://doi.org/10.1007/s11803-011-0049-1>
- Kim, C. W., Kawatani, M., Konaka, S., & Kitaura, R. (2011). Seismic Responses of a Highway Viaduct Considering Vehicles of Design Live Load as Dynamic System During Moderate Earthquakes. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(7–8), 523-534.
- Koller, D., & Friedman, N. (2009). *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. MIT Press.
- Mendoza-Lugo, M. A., Delgado-Hernández, D.-J., & Morales-Nápoles, O. (2019). Reliability analysis of reinforced concrete vehicle bridges columns using non-parametric Bayesian networks. *Engineering Structures*, 188, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.011>

- Mendoza-Lugo, M. A., Morales-Nápoles, O., & Delgado-Hernández, D. J. (2022). A non-parametric Bayesian network for multivariate probabilistic modelling of Weigh-in-Motion System Data. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 13, 100552. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100552>
- Montes-De-Oca, H., & Delgado-Hernández, D. J. (2017). *Evaluación del factor de seguridad en las pilas de puentes vehiculares de concreto reforzado sujeto a sismo y carga viva* [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Paprotny, D., Morales-Nápoles, O., Worm, D. T. H., & Ragno, E. (2020). BANSHEE—A MATLAB toolbox for non-parametric Bayesian networks. *SoftwareX*, 12, 100588. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100588>
- Pearl, J. (1988). *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann.
- Sun, D., Chen, B., & Sun, B. (2015). Study based on bridge health monitoring system on multihazard load combinations of earthquake and truck loads for bridge design in the southeast coastal areas of China. *Shock and Vibration*, 2015(1), 829380.
- Wibowo, H., Sanford, D. M., Buckle, I. G., & Sanders, D. H. (2014). Preliminary Parametric Study of the Effects of Live Load on Seismic Response of Highway Bridges. *Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.
- Wibowo, H., Sanford, D. M., Buckle, I. G., & Sanders, D. H. (2013). *Effect of live load on the seismic response of bridges* (inf. téc. N.º CCEER 13-10).

## Anexo

### ModificarPesosSAP.m

```
%% 01 Modificar el archivo .$2k
% Esta rutina modifica el archivo .$2k añadiendo cargas aleatorias de
% pasajeros y un factor de amplificación de gravedad aleatorio (entre 1 y
% 4). Después, este archivo .$2k será ejecutado en SAP2000
% Archivos necesarios:
%-Viaducto_Modificado.$2k
%% Copiado de archivos
% CurrUnits = "Kgf, cm, C"
%El archivo Viaducto_Modificado.$2k es un archivo copia del Viaducto.$2k
%(archivo original) en el cual se le borro la tabla "TABLE: "VEHICLES 3 -
%GENERAL VEHICLES 2 - LOADS" (tabla de interes a modificar en rutina),
% la tabla TABLE: "CASE - DIRECT HISTORY 2 - LOAD ASSIGNMENTS" (para cambiar
%el factor de la gravedad de manera aleatoria (1,2,3,...) y la
%ultima linea 'END TABLE DATA'. Esto se hizo a "mano"
%Crear un archivo 'Viaducto_Copia.$2k' el cual se modificara en cada
%simulacion.
copyfile('Viaducto_Modificado.$2k','Viaducto_Copia.$2k');
% Pesos de los mexicanos en kg mean = 74kg std = 10kg norm dist
no_personas = 719; %
pesos_personas = normrnd(74,10,no_personas,1); %kg
peso_total_personas =sum(pesos_personas);
%Pesos tren
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%reacciones en cada uno de los ejes en ton
peso_de_ejes = [7.79,14.79,14.79,... %coche motor en ton
               18.69,18.69,... %coche intermedio en ton
               18.69,18.69,...
               18.69,18.69,...
               14.79,14.79,7.79];
r = (peso_de_ejes*1000); %en kg
% Pesos de las personas aleatorios
for i=2:length(peso_de_ejes)-1
aux_rand(i)=rand(1);
```

```

end
sum_aux_rand=sum (aux_rand);
aux_rand=aux_rand./sum_aux_rand
for i=2:length(peso_de_ejes)-1
    r(i) =r(i)+(peso_total_personas/1)*aux_rand(i);
end
carga_en_ejes= r;
peso_total= sum(r);
display('Peso total = ' + string(round(peso_total/1000,2))+ ' tons')
%% Abrir archivo $2k
fout = fopen('Viaducto_Copia.$2k', 'at');
%% Agregar al final del archivo modificado las cargas aleatorias
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
s='TABLE: "VEHICLES 3 - GENERAL VEHICLES 2 - LOADS"';
fprintf(fout, '%s\n', s);
formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
    Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist=370
    ';
fprintf(fout, formatSpec, r(1));
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
    Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist=240
    ';
fprintf(fout, formatSpec, r(2));
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
    Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist
    =1619';
fprintf(fout, formatSpec, r(3));
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
    Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist=240
    ';
fprintf(fout, formatSpec, r(4));
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
    Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist
    =1526';
fprintf(fout, formatSpec, r(5));
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero

```

```

        Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist=240
    ';
    fprintf(fout, formatSpec, r(6));
    ss='';
    fprintf(fout, '\n%s', ss);
    formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
        Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist
        =1526';
    fprintf(fout, formatSpec, r(7));
    ss='';
    fprintf(fout, '\n%s', ss);
    formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
        Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist=240
        ';
    fprintf(fout, formatSpec, r(8));
    ss='';
    fprintf(fout, '\n%s', ss);
    formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
        Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist
        =1526';
    fprintf(fout, formatSpec, r(9));
    ss='';
    fprintf(fout, '\n%s', ss);
    formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
        Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist=240
        ';
    fprintf(fout, formatSpec, r(10));
    ss='';
    fprintf(fout, '\n%s', ss);
    formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
        Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist
        =1619';
    fprintf(fout, formatSpec, r(11));
    ss='';
    fprintf(fout, '\n%s', ss);
    formatSpec='    VehName=tren    LoadType="Fixed Length"    UnifLoad=0    UnifType="Zero
        Width"    AxleLoad=%.4f    AxleType="Two Points"    AxleWidth=148.5    MinDist=240
        ';
    fprintf(fout, formatSpec, r(12));
    %% Agregar al final del archivo modificado el factor de amplificación sísmica
    aleatorio
    gaf = randi([1,4],1); % número aleatorio entre 1 y 4
    %gaf = 4; %gravity amplification factor
    display('Factor de amplificación = ' + string(gaf))
    ss='';
    fprintf(fout, '\n%s', ss);
    s='TABLE: "CASE - DIRECT HISTORY 2 - LOAD ASSIGNMENTS"';

```

```

fprintf(fout, '%s\n', s);
formatSpec='    Case=sismo_Mexico    LoadType=Accel    LoadName="Accel U1"    Function=
    MexX    TransAccSF=%.4f    TimeFactor=1    ArrivalTime=0    CoordSys=GLOBAL    Angle
    =0';
fprintf(fout, formatSpec, gaf);
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
formatSpec='    Case=sismo_Mexico    LoadType=Accel    LoadName="Accel U2"    Function=
    MexY    TransAccSF=%.4f    TimeFactor=1    ArrivalTime=0    CoordSys=GLOBAL    Angle
    =0';
fprintf(fout, formatSpec, gaf);
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
formatSpec='    Case=sismo_Mexico    LoadType=Accel    LoadName="Accel U3"    Function=
    MexZ    TransAccSF=%.4f    TimeFactor=1    ArrivalTime=0    CoordSys=GLOBAL    Angle
    =0';
fprintf(fout, formatSpec, gaf);
%% Escribir la ultima linea en el archivo $2k y cerrar los archivos
ss='';
fprintf(fout, '\n%s', ss);
s='END TABLE DATA';
fprintf(fout, '\n%s', s);
fclose(fout);
display('Archivo Viaducto_Copia.$2k modificado')

```

## Analisis.m

```

%% 02 Rutina para que SAP2000 analice el archivo creado por ModificarPesosSAP
% Aquí se obtienen los elementos mecánicos, así como las deformaciones y
% giros del elemento y del nodo seleccionado.
% Archivos necesarios:
% -ModificarPesosSAP.m
%clc;clear; close all
%% Generar el archivo de entrada con sismo aleatorio y cargas ferroviarias
    aleatorias
ModificarPesosSAP
%% Abrir SAP2000
feature('COM_SafeArraySingleDim', 1);
feature('COM_PassSafeArrayByRef', 1);
SapObject = actxserver('sap2000.SapObject');
SapObject.ApplicationStart;
%% Iniciar nuevo modelo
ret=SapObject.SapModel.InitializeNewModel;
%% Abrir modelo existente %%CAMBIAR RUTA SI SE CAMBIA DE EQUIPO%%
file = strcat(pwd,'\Viaducto_Copia.$2k');

```

```

ret = SapObject.SapModel.File.OpenFile(file);
%% Actualiza el 'bridge object' antes de correr el analisis
% flag = SapObject.SapModel.BridgeObj.GetBridgeUpdateForAnalysisFlag;
ret = SapObject.SapModel.BridgeObj.SetBridgeUpdateForAnalysisFlag(true);
%% Actualizar la vista del modelo en SAP2000
ret = SapObject.SapModel.View.RefreshView(0, false());
%% Ejecutar el análisis en SAP2000
tic
display('I N I C I O   D E L   A N A L I S I S !');
ret = SapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis();
%% Elegir la combinacion de salida para los resultados
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput;
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetComboSelectedForOutput('COMB2');
ret = SapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('MODAL');
%% Extraer los elementos mecánicos de interés
% DECK, fuerzas en las trabes principales
NBarras = 32; %el deck esta discretizado en 32 elementos barras (frame objects)
for j= 1: NBarras;
    Name=[' ' num2str(j)];
    NumberResults = 0;
    Obj = cellstr(' ');
    Elm = cellstr(' ');
    ElmSta = cellstr(' ');
    ObjSta=cellstr(' ');
    ACase = cellstr(' ');
    StepType = cellstr(' ');
    StepNum = zeros(1,1,'double');
    P = zeros(1,1,'double');
    V2 = zeros(1,1,'double');
    V3 = zeros(1,1,'double');
    T = zeros(1,1,'double');
    M2 = zeros(1,1,'double');
    M3 = zeros(1,1,'double');
    ObjectElm = 0;
    [ret,NumberResults, Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, ACase, StepType, StepNum, P, V2,
    V3, T, M2, M3]=SapObject.SapModel.Results.FrameForce(Name,...
    ObjectElm, NumberResults, Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, ACase, StepType,
    StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3);
    for jj=1:length(ElmSta);
        elemnt_frame(j,jj) = Elm(jj);
        step_min_max(j,jj) = StepType(jj);
        station_elem_mec(j,jj) = ElmSta(jj);
        ElementosMecP(j,jj)=P(jj);
        ElementosMecV2(j,jj)=V2(jj);
        ElementosMecV3(j,jj)=V3(jj);
        ElementosMecT(j,jj)=T(jj);
        ElementosMecM2(j,jj)=M2(jj);

```

```

        ElementosMecM3(j,jj)=M3(jj);
    end
end
display('-- Fuerzas en el deck obtenidas --')
%% Extraer los elementos mecánicos de interés
% Pila, fuerzas en la pila
barras_pila = [560,561,562]; % 560,561,562 son las barras que componen a la pila
for k = 1:length(barras_pila)
    j = barras_pila(k);
    Name=[' ' num2str(j)];
    NumberResults = 0;
    Obj = cellstr(' ');
    Elm_c = cellstr(' ');
    ElmSta_c = cellstr(' ');
    ObjSta_c=cellstr(' ');
    ACase_c = cellstr(' ');
    StepType_c = cellstr(' ');
    StepNum_c = zeros(1,1,'double');
    P_c = zeros(1,1,'double');
    V2_c = zeros(1,1,'double');
    V3_c = zeros(1,1,'double');
    T_c = zeros(1,1,'double');
    M2_c = zeros(1,1,'double');
    M3_c = zeros(1,1,'double');
    ObjectElm_c = 0;
    [ret,NumberResults, Obj, ObjSta_c, Elm_c, ElmSta_c, ACase_c, StepType_c,
    StepNum_c, P_c, V2_c, V3_c, T_c, M2_c, M3_c]=SapObject.SapModel.Results.
    FrameForce(Name, ...
        ObjectElm_c, NumberResults, Obj, ObjSta_c, Elm_c, ElmSta_c, ACase,
    StepType_c, StepNum_c, P_c, V2_c, V3_c, T_c, M2_c, M3_c);

    for jj=1:length(ElmSta_c);
        elemnt_frame_c(k,jj) = Elm_c(jj);
        step_min_max_c(k,jj) = StepType_c(jj);
        station_elem_mec_c(k,jj) = ElmSta_c(jj);
        ElementosMecP_c(k,jj)=P_c(jj);
        ElementosMecV2_c(k,jj)=V2_c(jj);
        ElementosMecV3_c(k,jj)=V3_c(jj);
        ElementosMecT_c(k,jj)=T_c(jj);
        ElementosMecM2_c(k,jj)=M2_c(jj);
        ElementosMecM3_c(k,jj)=M3_c(jj);
    end
end
display('-- Fuerzas en la pila obtenidas --')
%% Obtener los desplazamientos en los nodos
j=284; % Nodo a analizar punta de la pila
Name=[' ' num2str(j)];

```

```

NumberResults = 0;
Obj = cellstr(' ');
Elm = cellstr(' ');
ACase = cellstr(' ');
StepType = cellstr(' ');
StepNum = zeros(1,1,'double');
    %StepNum=reshape(0:1,2,1);
U1 = zeros(1,1,'double');
U2 = zeros(1,1,'double');
U3 = zeros(1,1,'double');
R1 = zeros(1,1,'double');
R2 = zeros(1,1,'double');
R3 = zeros(1,1,'double');
ObjectElm = 0;
[ret, NumberResults, Obj, Elm, ACase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3] =
    SapObject.SapModel.Results.JointDispl(Name, ObjectElm, NumberResults, Obj, Elm,
    ACase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3);
if abs(U1(13))>=abs(U1(14));
DesplazamientosU1(1)=U1(13);
else
DesplazamientosU1(1)=U1(14);
end
if abs(U2(13))>=abs(U2(14));
DesplazamientosU2(1)=U2(13);
else
DesplazamientosU2(1)=U2(14);
end
if abs(U3(13))>=abs(U3(14));
DesplazamientosU3(1)=U3(13);
else
DesplazamientosU3(1)=U3(14);
end
if abs(R1(13))>=abs(R1(14));
GirosR1(1)=R1(13);
else
GirosR1(1)=R1(14);
end
if abs(R2(13))>=abs(R2(14));
GirosR2(1)=R2(13);
else
GirosR2(1)=R2(14);
end
if abs(R3(13))>=abs(R3(14));
GirosR3(1)=R3(13);
else
GirosR3(1)=R3(14);
end

```

```

% DesplazamientosU1(1)=U1(1);
% DesplazamientosU2(1)=U2(1);
% DesplazamientosU3(1)=U3(1);
% GirosR1(1)=R1(1);
% GirosR2(1)=R2(1);
% GirosR3(1)=R3(1);
display('-- Desplazamientos en la punta de la pila obtenidos --')
%% ----- Variables para la red-----
%%Tren
W = peso_total;
A = carga_en_ejes;
%% Fuerzas maximas en el Deck
MaxPd = get_max_abs_forces_deck(ElementosMecP);
MaxV2d = get_max_abs_forces_deck(ElementosMecV2); %kg
MaxV3d = get_max_abs_forces_deck(ElementosMecV3);
MaxM2d = get_max_abs_forces_deck(ElementosMecM2); %kg.cm
MaxM3d = get_max_abs_forces_deck(ElementosMecM3);
MaxTd = get_max_abs_forces_deck(ElementosMecT);
%% Pila
%Fuerzas maximas en la pila
MaxPc = get_max_abs_forces_column(ElementosMecP_c);
MaxV2c = get_max_abs_forces_column(ElementosMecV2_c); %kg
MaxV3c = get_max_abs_forces_column(ElementosMecV3_c);
MaxM2c = get_max_abs_forces_column(ElementosMecM2_c); %kg.cm
MaxM3c = get_max_abs_forces_column(ElementosMecM3_c);
MaxTc = get_max_abs_forces_column(ElementosMecT_c);
U = [DesplazamientosU1,DesplazamientosU2,DesplazamientosU3];
R = [GirosR1,GirosR2,GirosR3];
%% Salvar en archivo sae
%Nombres de las variables para el archivo sae o csv
nombres_de_las_var = ['GF','W','A1','A2','A3','A4','A5','A6','A7','A8','A9','A10','A11','A12',...
    'MaxPd','MaxV2d','MaxV3d','MaxM2d','MaxM3d','MaxTd',
    'MaxPc','MaxV2c','MaxV3c','MaxM2c','MaxM3c','MaxTc',
    'U1','U2','U3','R1','R2','R3\n'];
%Variables a utilizar
variables = [gaf,W,A(1),A(2),A(3),A(4),A(5),A(6),A(7),A(8),A(9),A(10),A(11),A(12),...
    MaxPd,MaxV2d,MaxV3d,MaxM2d,MaxM3d,MaxTd,...
    MaxPc,MaxV2c,MaxV3c,MaxM2c,MaxM3c,MaxTc,...
    U(1),U(2),U(3),R(1),R(2),R(3)];
% Escribe en el archivo
filename = 'DatosPuente_prueba.sae'; %cambiar nombre si se quiere otro archivo de salida
%Revisa si ya existe el archivo si no escribe el nombres de las variables

```

```

if isfile(filename)
    fileIDRed = fopen(filename, 'a');
    fprintf(fileIDRed, [" %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f,"+...
        " %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f,"+...
        " %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f,"+...
        " %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f\n
        "],...
        variables);
    fclose(fileIDRed);
else
    fileIDRed = fopen(filename, 'a');
    fprintf(fileIDRed, nombres_de_las_var);
    fprintf(fileIDRed, [" %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f,"+...
        " %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f,"+...
        " %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f,"+...
        " %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f, %6.9f\n
        "],...
        variables);
    fclose(fileIDRed);
end
%% Desbloquear el modelo
ret=SapObject.SapModel.SetModelIsLocked(false);
%% Cerrar el modelo
ret = SapObject.ApplicationExit(false());
SapModel = 0;
SapObject = 0;
%% Eliminar archivos residuales
delete Viaducto_Copia.SDB Viaducto_Copia.msh
toc
% clearvars -except elemnt_frame station_elem_mec ElementosMecP ElementosMecV2
% ElementosMecV3 step_min_max...
% ElementosMecT ElementosMecM2 ElementosMecM3 sigma DesplazamientosU1
% DesplazamientosU2 DesplazamientosU3...
% GirosR1 GirosR2 GirosR3 FstPeriod FstFreq Results
clearvars -except n
display('F I N D E L A N A L I S I S !')
toc

```

## get\_max\_abs\_forces\_column.m

```

% function max_force = get_max_abs_forces_column(ElementosMec_c)
% max_force = max([abs(ElementosMec_c(3,61:70))...
%                 abs(ElementosMec_c(2,37:42))...
%                 abs(ElementosMec_c(3,37:42))]);
% end

```

```

function max_force = get_max_abs_forces_column(ElementosMec_c)
max_force = max([abs(ElementosMec_c(1,:))...
                 abs(ElementosMec_c(2,:))...
                 abs(ElementosMec_c(3,:))]);
end

```

## Run\_simul.m

```

%% Run_simul.m
%Esta rutina ejecuta las n simulaciones.
%Archivos matlab necesarios:
%-Analisis.m
%-ModificarPesosSAP.m
clc, clear, close all
%% Cálculo de las simulaciones
% Número de simulaciones
n=1000;
% Cálculos
for i = 1:n
    try
        display('----- Simulación '+ string(i)+' de '+string(n)+'-----')
        Analisis
    catch ME
        disp(ME);
        fprintf('Retrying...\n');
    end
end
end
% Sonido de gong que avisa cuando las n simulaciones han terminado
load gong.mat;
soundsc(y,3*Fs);

```

## Constancia de aceptación de Obra

- CONSTANCIA DE ACEPTACIÓN DE OBRA -



**EDICIONES  
COMUNICACIÓN  
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES  
ARBITRADAS

[www.comunicacion-cientifica.com](http://www.comunicacion-cientifica.com)

## CONSTANCIA

Ciudad de México, 06 de julio de 2026

A QUIEN CORRESPONDA:

Mediante la presente informo que el libro *Convergencia científica y tecnológica: Avances en Ingeniería Civil, Control, Energía, Ingeniería Biomédica y Aprendizaje Automático*, coordinado por Jaime De la Colina Martínez, José Antonio Hernández Servín, Lourdes Loza Hernández y Rigoberto Martínez Méndez, se aceptó para el proceso de publicación en nuestro sello editorial. Lo invitamos a ver próximamente el proceso de publicación transparentado y la publicación en nuestra página <https://comunicacion-cientifica.com/>

Nuestra editorial cumple con todos los lineamientos de la comunidad científica internacional, como dictaminación de pares ciegos, transparencia, comités y ética editorial, medición del impacto de la publicación e investigación, ISBN, DOI, metadatos, distribución del libro impreso y digital, campaña de comunicación, acceso abierto al texto completo del libro e indización internacional.

La obra *Convergencia científica y tecnológica: Avances en Ingeniería Civil, Control, Energía, Ingeniería Biomédica y Aprendizaje Automático* se presenta con los siguientes capítulos y autores:

---

### CAPÍTULOS

### AUTORES

---

[WWW.COMUNICACION-CIENTIFICA.COM](http://WWW.COMUNICACION-CIENTIFICA.COM)

Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400, Crédito Constructor, Benito Juárez, CP 03940, CDMX  
móvil: +(52) 55 7424 2682 / oficina: +(52) 55 5696 6541 / e-mail: [dircomunicacioncientifica@gmail.com](mailto:dircomunicacioncientifica@gmail.com)

D.R. © EDICIONES COMUNICACIÓN CIENTÍFICA S.A. DE C.V.

### Capítulo 1

*Dispositivo portátil de bioimpedancia basado en el AD5941 para evaluación del estado de hidratación en perros*

- \* Ada Michelle Velázquez Flores
- \* Rigoberto Martínez Méndez
- \* Zeus Tlaltecútlí Domínguez Vega
- \* Otniel Portillo Rodríguez
- \* Adriana H. Vilchis González

### Capítulo 2

*Sistema Inalámbrico de bajo costo para medir Irradiancia solar basado en panel fotovoltaico y red neuronal*

- \* Maricruz Martínez Jardón
- \* Otniel Portillo Rodríguez
- \* Juan Manuel Jacinto Villegas
- \* Joanna Juárez Michua
- \* Jorge Rodríguez Arce

### Capítulo 3

*Diseño y caracterización preliminar de una plataforma portátil para la medición simultánea del centro de presión y la bioimpedancia*

- \* José Abraham Morales Jiménez
- \* Rigoberto Martínez Méndez
- \* Ángel Gabriel Estévez Pedraza
- \* Juan Manuel Jacinto Villegas

### Capítulo 4

*Modelado y control de vehículo aéreo estable por construcción*

- \* Jesús García Barrera
- \* Juan Carlos Ávila Vilchis
- \* Martha Belem Saldívar Márquez
- \* Manuel Alejandro Jiménez Lizárraga

### Capítulo 5

*Retos actuales en minería de patrones dirigida*

- \* Víctor Gonzalo Rivero Martínez
- \* Héctor A. Montes Venegas
- \* Rosa M. Valdovinos Rosas
- \* Angélica Guzmán Ponce

### Capítulo 6

*Herencia terminológica y referentes matemáticos en redes neuronales*

- \* Uriel Balder Huerta Mendoza
- \* J. A. Hernández Sérvín
- \* J. Raymundo Marcial Romero

|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Capítulo 7</b><br><i>Resistencia de columnas de concreto reforzado con perfiles metálicos embebidos, sujetas a compresión y flexión biaxial</i>                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Jazmín Anayeli Martínez García</li> <li>* Jaime De la Colina Martínez</li> </ul>                                                                                                 |
| <b>Capítulo 8</b><br><i>Evaluación del riesgo en edificios diseñados sin torsión accidental</i>                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>* David López Delgado</li> <li>* Jaime De la Colina Martínez</li> <li>* Francisco Héctor Bañuelos García</li> </ul>                                                                |
| <b>Capítulo 9</b><br><i>Balance de energías para estimar presiones en tanques cilíndricos ocasionadas por sismos</i>                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Sonia Valdez Mejía</li> <li>* Jaime De la Colina Martínez</li> <li>* Carlos Alberto González Pérez</li> </ul>                                                                    |
| <b>Capítulo 10</b><br><i>Optimización geométrica de un horno solar de doble etapa mediante redes neuronales artificiales</i>                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>* David Rojas Valdez</li> <li>* Miriam Sánchez Pozos</li> <li>* Ricardo Arévalo Mejía</li> <li>* María Dolores Durán-García</li> <li>* Ivan Galileo Martínez Cienfuegos</li> </ul> |
| <b>Capítulo 11</b><br><i>Diseño de un sistema multicanal de fotoplestismografía con sincronización inalámbrica para la selección de la ubicación anatómica óptima comparado con electrocardiograma</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Dania Ivon González López</li> <li>* Rigoberto Martínez Mendez</li> <li>* Jorge Rodríguez Arce</li> <li>* Luis Adrán Zúniga Avelés</li> </ul>                                    |
| <b>Capítulo 12</b><br><i>Análisis óptico de un concentrador Fresnel compacto para la aplicación en procesos industriales</i>                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Marco Antonio González Martínez</li> <li>* María Dolores García Durán</li> <li>* María González Mora</li> </ul>                                                                  |
| <b>Capítulo 13</b><br><i>Producción y optimización de biodiésel a partir de aceite de cocina reciclado empleando catálisis heterogénea con óxido de calcio</i>                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>* Miguel Armando Moran González</li> <li>* María Dolores Durán-García</li> <li>* Rubi Romero Romero</li> <li>* Javier Salas García</li> </ul>                                      |

\* Reyna Natividad Rangel

**Capítulo 14**

*Evaluación de la probabilidad de falla en el viaducto elevado del tren México-Toluca debido a la presencia simultánea de sismo y carga viva máxima*

\* José Francisco García Zamora  
\* David Joaquin Delgado Hernandez

**Capítulo 15**

*Mejoramiento del sistema mHealth 3Ollin para la estimación del riesgo de caídas en adultos mayores mediante optimización de adquisición de datos y usabilidad*

\* José Manuel Octaviano Gonzalez  
\* Marcelo Romero Huertas  
\* Otniel Portillo Rodríguez  
\* Lorena Parra Rodríguez

**Capítulo 16**

*Diseño integral de un prototipo de desalinización MED de baja potencia*

\* Jessica Itzel González Trejo  
\* Iván Galileo Martínez Cienfuegos  
\* Marina Islas Espinoza  
\* María Dolores Durán García

**Capítulo 17**

*REXTRI: Trituradora de rocas de rodillo excéntrico modular*

\* Ebenezer Marcelo Hernández Portillo  
\* Luis Adrián Zúñiga Avilés  
\* Juana Mariel Dávila Vilchis  
\* Giorgio Mackenzie Cruz Martínez

Con la finalidad de mantener estándares de calidad para el mercado mexicano estamos afiliados al RENIECYT del SECIHTI y en la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana (CANIEM): 3976. Nos encontramos a su disposición para cualquier aclaración.

Atentamente



[WWW.COMUNICACION-CIENTIFICA.COM](http://WWW.COMUNICACION-CIENTIFICA.COM)

Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400, Crédito Constructor, Benito Juárez, CP 03940, CDMX  
móvil: +(52) 55 7424 2682 / oficina: +(52) 55 5696 6541 / e-mail: [dircomunicacioncientifica@gmail.com](mailto:dircomunicacioncientifica@gmail.com)

D.R. © EDICIONES COMUNICACIÓN CIENTÍFICA S.A. DE C.V.

**HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS**



Víctor Hugo Ballesteros  
Director Académico

[WWW.COMUNICACION-CIENTIFICA.COM](http://WWW.COMUNICACION-CIENTIFICA.COM)

Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400, Crédito Constructor, Benito Juárez, CP 03940, CDMX  
móvil: +(52) 55 7424 2682 / oficina: +(52) 55 5696 6541 / e-mail: dircomunicacioncientifica@gmail.com

D.R. © EDICIONES COMUNICACIÓN CIENTÍFICA S.A. DE C.V.