



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**ESTIMACIÓN DEL EFECTO BIDIRECCIONAL
GENERADO DURANTE EL IMPACTO TABLERO-
ESTRIBO EN PUENTES VIALES ANTE SISMOS DE
GRAN INTENSIDAD**

Memoria de Título presentada por

Maximiliano Lobovsky Herrera

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Claudio Ignacio Sepúlveda Contreras



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: ESTIMACIÓN DEL EFECTO BIDIRECCIONAL GENERADO DURANTE EL IMPACTO TABLERO-ESTRIBO EN PUENTES VIALES ANTE SISMOS DE GRAN INTENSIDAD.

Nombre del candidato(a): Maximiliano Nicolás Lobovsky Herrera

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Campus San Joaquín **Departamento:** Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Sepúlveda Contreras, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 09/01/2026

Firma: HERRERA

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09/01/2026

Firma: [Firma manuscrita]

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



TITULO DE LA MEMORIA:

ESTIMACIÓN DEL EFECTO BIDIRECCIONAL GENERADO DURANTE EL IMPACTO TABLERO- ESTRIBO EN PUENTES VIALES ANTE SISMOS DE GRAN INTENSIDAD

AUTOR:

Maximiliano Nicolás Lobovsky Herrera

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Claudio Sepúlveda

Ramiro Bazáez

Santiago, Chile, Diciembre de 2025

Agradecimientos

En primer lugar y más importante quiero agradecer profundamente a mis padres, quienes estuvieron presentes en todo momento e hicieron posible cada uno de los logros alcanzados a lo largo de toda mi formación académica.

Agradezco también a mis amigos, quienes estuvieron presentes en cada desafío, prueba y tarea, haciendo de este recorrido exigente una experiencia mucho más llevadera y amena.

Asimismo, quiero dedicar un sincero agradecimiento a mi pareja, quien me acompañó y apoyó incondicionalmente durante este largo y complejo camino, siendo un pilar fundamental para poder avanzar y culminar esta etapa.

Finalmente, agradezco a la Universidad Técnica Federico Santa María, a sus funcionarios y profesores. Y de manera especial al profesor Dr. Claudio Sepúlveda, quien ha sido un guía fundamental en el desarrollo de esta memoria y en la culminación de este proceso formativo.

ESTIMACIÓN DEL EFECTO BIDIRECCIONAL GENERADO DURANTE EL IMPACTO TABLERO-ESTRIBO EN PUENTES VIALES ANTE SISMOS DE GRAN INTENSIDAD

Maximiliano Lobovsky, PhD Claudio Sepúlveda

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

El impacto entre el tablero y los estribos puede influir de manera importante en la respuesta sísmica de puentes, especialmente cuando existe esviaje. En la práctica, muchos modelos consideran únicamente la componente normal del impacto, dejando fuera la fricción, pese a que esta puede modificar la respuesta del sistema. Esta memoria estudia específicamente cómo la fricción presente durante el impacto afecta la rotación del tablero y los desplazamientos en un puente típico chileno, evaluando dos configuraciones geométricas, una sin esviaje y otra con un ángulo de 11° .

Para ello se desarrolló un modelo tridimensional en OpenSees que simula el impacto mediante el elemento *FlatSliderBearing* junto al material *HertzDamp*, permitiendo representar de manera integrada la interacción normal y tangencial. Se realizaron 22 análisis tiempo-historia utilizando registros sísmicos ajustados al nivel de demanda definido en la NCh2369-2025, lo que permite evaluar de forma consistente cómo la presencia o ausencia de fricción modifica la respuesta dinámica del tablero durante eventos sísmicos de alta intensidad.

La investigación permite identificar de manera directa los efectos que introduce la fricción en cada configuración geométrica, entregando una referencia sobre su rol en la interacción tablero–estribo y sobre cómo puede influir en los mecanismos de rotación y desplazamiento del puente. Los resultados detallados y su análisis se presentan en los capítulos posteriores, donde se discuten las diferencias observadas entre ambas configuraciones.

Palabras claves: Puente esviado, OpenSees, Impacto bidireccional.

ESTIMATION OF THE BIDIRECTIONAL EFFECT GENERATED DURING THE DECK–ABUTMENT IMPACT IN ROAD BRIDGES UNDER HIGH-INTENSITY EARTHQUAKES.

Maximiliano Lobovsky, PhD Claudio Sepúlveda

Universidad Técnica Federico Santa María

Abstract

The impact between the bridge deck and abutments can significantly influence a bridge's seismic response, especially when skew is present. In practice, many models consider only the normal component of the impact, disregarding friction even though it can alter the system's response. This thesis specifically examines how friction during impact affects the deck's rotation and transverse displacements in a typical Chilean bridge, evaluating two geometric configurations, one without skew and another with an 11° skew angle.

To accomplish this, a three-dimensional model was developed in OpenSees that simulates the impact using the *FlatSliderBearing* element coupled with the *HertzDamp* material, allowing an integrated representation of normal and tangential interaction. Twenty-two time-history analyses were performed using seismic records adjusted to the demand level defined in NCh2369-2025, in order to consistently evaluate how the presence or absence of friction modifies the deck's dynamic response during high intensity seismic events.

This research directly identifies the effects that friction introduces in each geometric configuration, providing insight into its role in the deck–abutment interaction and how it can influence the bridge's rotation and displacement mechanisms. The detailed results and their analysis are presented in subsequent chapters, where the observed differences between both configurations are discussed.

Keywords: skewed bridge, OpenSees, bidirectional impact.

Índice

1	Introducción	9
2	Marco teórico	10
2.1	Comportamiento Sísmico de puentes	10
2.2	Probabilidad de impacto entre el estribo y el tablero	10
2.3	Efecto del ángulo de esviaje en el desempeño sísmico de puentes	10
2.4	Efecto de la fricción en la probabilidad de impacto de puentes	11
2.5	Modelación numérica de puentes sometidos a impactos	11
3	Objetivos	12
3.1	Objetivo General:	12
3.2	Objetivos específicos:	12
4	Metodología	12
4.1	Generar el modelo numérico del puente prototipo, definiendo sus características estructurales, geométricas y materiales.	12
4.2	Seleccionar los registros sísmicos representativos para el análisis y realizar un estudio paramétrico, considerando distintos ángulos de esviaje para evaluar su impacto en la respuesta dinámica del puente.	13
4.3	Modificar el modelo numérico para replicar las características específicas del puente particular en estudio, asegurando que refleje sus condiciones estructurales reales.	13
5	Descripción del caso de estudio y Modelación en OpenSees.....	14
5.1	Caso de estudio	14
5.2	Modelación numérica del puente.....	15
5.2.1	Tablero.....	15
5.2.2	Columnas y Viga cabezal.....	16
5.2.3	Modelación de la fundación.....	16
5.2.4	Interacción estribo y tablero.....	16
5.2.5	Apoyos elastoméricos	17
5.2.6	Llaves de corte.....	19
5.2.7	Barras sísmicas	21
6	Resultados	24
6.1	Selección y escalamiento de registros sísmicos.....	24
6.2	Análisis modal.	25
6.3	Respuesta estructural en el caso sin esviaje.....	25
6.4	Respuesta estructural con un esviaje de 11°	30
7	Conclusiones	35
7.1	Puente sin esviaje	35
7.2	Puente con un ángulo de esviaje de 11°	35
8	Referencias bibliográficas	37
9	Anexos	39

Índice de figuras

Figura 1: Caso estudio, Puente Las Mercedes.	14
Figura 2: Sección Transversal Cepa.	15
Figura 3: Modelo Tridimensional del Puente Las Mercedes.	15
Figura 4: Representación del tablero modelado en OpenSees.	16
Figura 5: Elementos impactos en uno de los estribos.	17
Figura 6: Comportamiento del apoyo elastomérico.	18
Figura 7: Grafico fuerza vs deformación de un apoyo elastomérico.	19
Figura 8: Fuerza vs deformación de las llaves de corte Goel y Chopra.	19
Figura 9: Trayectoria del tablero para el caso con esviaje.	21
Figura 10: Comportamiento de las llaves de corte.	21
Figura 11: Comportamiento horizontal.	22
Figura 12: Comportamiento vertical.	22
Figura 13: Comportamiento de las barras sísmicas.	23
Figura 14: Espectros escalados y objetivo en escala logarítmica para MCE.	25
Figura 15: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R04 caso con impactos.	26
Figura 16: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R04 caso con impactos sin roce en el estribo de entrada.	26
Figura 17: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R04 caso con impactos con roce en el estribo de entrada.	27
Figura 18: Grafico fuerza normal versus fuerza tangencial para registro R04 caso con impactos con roce en el estribo de entrada.	27
Figura 19: Figura ilustrativa de como la rotación se lleva a desplazamientos de borde.	28
Figura 20: Rotaciones del nodo central expresada en centímetros.	28
Figura 21: Comparación entre el peak de desplazamiento de borde vs el peak de desplazamiento del nodo central para el caso sin esviaje.	29
Figura 22: Desplazamiento residuales de los bordes del tablero expresada en %.	30
Figura 23: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos sin roce en el estribo de entrada.	30
Figura 24: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos sin roce en el estribo de salida.	31
Figura 25: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos con roce en el estribo de entrada.	31
Figura 26: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos con roce en el estribo de salida.	32
Figura 27: Rotaciones del nodo central expresada en centímetros.	32
Figura 28: Grafico de barras comparando el peak de desplazamiento de borde vs el peak de desplazamiento del nodo central para el caso con esviaje.	33
Figura 29: Desplazamiento residuales de los bordes del tablero expresada en %.	33
Figura 30: Trayectoria del tablero para el registro R01.	39
Figura 31: Trayectoria del tablero para el registro R02.	39
Figura 32: Trayectoria del tablero para el registro R03.	40
Figura 33: Trayectoria del tablero para el registro R04.	40
Figura 34: Trayectoria del tablero para el registro R05.	41
Figura 35: Trayectoria del tablero para el registro R06.	41
Figura 36: Trayectoria del tablero para el registro R07.	42
Figura 37: Trayectoria del tablero para el registro R08.	42
Figura 38: Trayectoria del tablero para el registro R09.	43
Figura 39: Trayectoria del tablero para el registro R10.	43
Figura 40: Trayectoria del tablero para el registro R11.	44
Figura 41: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R01.	44
Figura 42: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R01.	45
Figura 43: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R02.	45

Figura 44: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R02.	46
Figura 45: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R03.	46
Figura 46: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R03.	47
Figura 47: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R04.	47
Figura 48: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R04.	48
Figura 49: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R05.	48
Figura 50: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R05.	49
Figura 51: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R06.	49
Figura 52: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R06.	50
Figura 53: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R07.	50
Figura 54: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R07.	51
Figura 55: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R08.	51
Figura 56: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R08.	52
Figura 57: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R09.	52
Figura 58: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R09.	53
Figura 59: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R10.	53
Figura 60: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R10.	54
Figura 61: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R11.	54
Figura 62: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R11.	55

ESTIMACIÓN DEL EFECTO BIDIRECCIONAL GENERADO DURANTE EL IMPACTO TABLERO-ESTRIBO EN PUENTES VIALES ANTE SISMOS DE GRAN INTENSIDAD

Maximiliano Lobovsky, PhD Claudio Sepúlveda

Universidad Técnica Federico Santa María

1 Introducción

Los puentes son infraestructuras esenciales para la conectividad territorial, especialmente en regiones con alta actividad sísmica. Su diseño estructural debe garantizar su estabilidad y funcionalidad ante eventos extremos, minimizando daños que puedan comprometer la seguridad y operatividad de la red vial. Tradicionalmente, los criterios de diseño sísmico buscan evitar impactos entre el tablero y el estribo o entre distintas secciones del tablero. No obstante, en sismos de gran magnitud, estos impactos pueden ser inevitables, generando efectos que afectan la integridad estructural de los puentes. El terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile puso en evidencia esta problemática, con numerosos puentes que sufrieron daños significativos o colapsaron debido a rotaciones excesivas del tablero, fenómeno atribuido, en parte, a los impactos generados durante el movimiento sísmico.

En la modelación numérica de estos impactos, la mayoría de los estudios se han enfocado en la componente perpendicular a la superficie de contacto, debido a la gran magnitud de las fuerzas en esa dirección. Sin embargo, esta aproximación simplificada omite la componente friccional del impacto, la cual puede inducir giros en el tablero, incluso en ausencia de esviaje. La fricción en la superficie de contacto genera una fuerza excéntrica en los extremos del tablero, afectando la estabilidad de la estructura y, en consecuencia, la resiliencia de la red vial ante sismos severos.

A pesar de su importancia, la componente friccional del impacto ha sido subestimada en los modelos numéricos convencionales, lo que puede cambiar considerablemente la respuesta del sistema (Miari et al., 2021). Su incorporación en plataformas de modelación abiertas, como OpenSees, ha sido limitada debido a la complejidad de su implementación, lo que restringe su uso en proyectos de ingeniería y diseño estructural. El terremoto de 2010 demostró la necesidad de modelos más precisos que consideren estos efectos en puentes tanto rectos como esviados, con el fin de mejorar la predicción del comportamiento estructural en escenarios sísmicos severos.

Este estudio busca desarrollar herramientas computacionales que permitan incorporar la componente friccional del impacto en la modelación de puentes, con un enfoque en infraestructura vial.

2 Marco teórico

2.1 Comportamiento Sísmico de puentes

Los choques entre el tablero y los estribos de un puente, o entre distintas secciones del tablero, pueden generar daños estructurales que impiden su uso hasta que se realicen las reparaciones correspondientes. Por esta razón, uno de los aspectos fundamentales en el diseño sísmico de puentes es evitar este tipo de colisiones, con el fin de mantener la operatividad y seguridad de las rutas. No obstante, en terremotos de gran magnitud, estos impactos pueden volverse inevitables, afectando negativamente la capacidad de recuperación de la infraestructura vial. Un ejemplo claro de esto ocurrió durante el terremoto de Chile en 2010, donde varios puentes presentaron fallas severas o colapsaron, debido principalmente a desplazamientos rotacionales extremos de la superestructura (Buckle et al., 2012) (Wilches et al., 2021) (Schanack et al., 2012), como sería el caso del paso sobre nivel Las Mercedes.

2.2 Probabilidad de impacto entre el estribo y el tablero

Tradicionalmente, los estudios de impacto se han centrado en la componente perpendicular a la superficie de contacto, debido a la mayor magnitud de las fuerzas en esa dirección. Sin embargo, esta simplificación omite una parte crucial del fenómeno, la componente paralela, o friccional, que surge al existir movimientos bidireccionales. Esta fuerza tangencial puede inducir momentos excéntricos en los extremos del tablero, generando rotaciones incluso en configuraciones simétricas sin esviaje (Shi & Dimitrakopoulos, 2017).

La probabilidad de que ocurra un impacto entre el tablero y el estribo depende de múltiples factores, tales como la demanda sísmica, la configuración geométrica del puente, las holguras disponibles entre componentes, y la interacción dinámica de los elementos estructurales. Estudios como los de Bi & Hao (2013) han abordado esta problemática desde un enfoque determinista mediante modelos de elementos finitos, pero su alto costo computacional limita su aplicabilidad cuando se requiere una evaluación probabilística sobre múltiples registros sísmicos.

A pesar de estos avances, aún persiste una brecha en la incorporación rigurosa de la componente friccional en estos modelos, tanto en términos numéricos como experimentales. Esta limitación afecta directamente la estimación precisa de la probabilidad de impacto y de sus efectos estructurales, especialmente cuando se busca evaluar el colapso potencial de puentes ante sismos extremos.

2.3 Efecto del ángulo de esviaje en el desempeño sísmico de puentes

El ángulo de esviaje en puentes viales introduce complejidades adicionales en su comportamiento sísmico, afectando la distribución de fuerzas y las interacciones entre el tablero y los estribos. Durante el terremoto de Maule en 2010, se observó que varios puentes con geometrías esviadas sufrieron daños significativos, evidenciando la vulnerabilidad de estas estructuras ante movimientos sísmicos intensos. Kawashima et al (2011) documentaron casos donde la combinación de esviaje y movimientos sísmicos resultó en desplazamientos transversales y rotaciones del tablero más pronunciados, incrementando el riesgo de impacto y deslizamiento en las juntas de apoyo. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar el ángulo de esviaje en el diseño y análisis sísmico de puentes, ya que influye directamente en la respuesta estructural y en la probabilidad de colapso bajo eventos sísmicos

2.4 Efecto de la fricción en la probabilidad de impacto de puentes

La mayoría de las investigaciones experimentales relacionadas con impactos en estructuras se han centrado en pruebas unidireccionales y en la recolección de datos de fuerza en una sola dirección. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Guo et al (2009) ,donde se evaluaron modelos a escala reducida de secciones de tableros sometidas a colisiones entre sí. Las pruebas se efectuaron únicamente en sentido longitudinal y los modelos no incorporaban esviaje, por lo que el análisis se restringió exclusivamente a los efectos del impacto en esa dirección. Más adelante, Yang et al (2019) desarrollaron ensayos con modelos a escala de puentes de acero, con y sin esviaje, con el objetivo de analizar los impactos entre tablero y estribo bajo diversas condiciones. Encontraron que la presencia de esviaje intensificaba notablemente la rotación del tablero, aunque las mediciones se limitaron, nuevamente, a la componente longitudinal de la fuerza independiente del ángulo de esviaje. Entre los pocos trabajos que han investigado este último aspecto se encuentra el de Saiidi et al (2013), quienes desarrollaron pruebas a gran escala en las que se observó un trancamiento transversal producto de la fricción entre el tablero y el estribo al momento del impacto, lo cual incrementaba considerablemente la rotación del tablero en planta. Dado el tamaño del experimento, no fue posible medir directamente las fuerzas de impacto mediante celdas de carga, por lo que los autores emplearon métodos indirectos para estimar los valores máximos de fuerza utilizando otras variables registradas durante las pruebas.

2.5 Modelación numérica de puentes sometidos a impactos

La plataforma OpenSees ha sido ampliamente utilizada para la modelación no-lineal de puentes viales, permitiendo representar el comportamiento complejo de sus componentes mediante macro-elementos. En este contexto, Hughes & Mosqueda (2020) implementaron diversos modelos de impacto unidireccional, incluyendo formulaciones como HertzDamp (Muthukumar & DesRoches, 2006) y Jankowski (Jankowski, 2005) ,los cuales han sido validados parcialmente mediante ensayos experimentales en mesa vibradora. Sin embargo, estos modelos, al estar definidos como materiales uniaxiales, presentan limitaciones importantes, ya que desacoplan completamente la respuesta en la dirección tangencial, omitiendo los efectos friccionales que pueden inducirse durante movimientos bidireccionales en planta.

Distintos investigadores han abordado el análisis no-lineal de puentes viales, incorporando en sus modelos el comportamiento complejo de sus diversos elementos estructurales. En este sentido, sepulveda, (n.d.) evaluaron la respuesta sísmica de puentes con dispositivos de aislamiento bajo solicitaciones que superan los niveles considerados en el diseño. Su enfoque consistió en representar cada componente del puente mediante macro-elementos en OpenSees. Por su parte, Aldea et al (2021) generaron curvas de fragilidad para puentes en Chile utilizando modelos no-lineales que simulan de forma detallada el comportamiento de apoyos elastoméricos, llaves de corte, interacción suelo-estructura y el impacto normal entre tablero y estribo. No obstante, estos estudios se han enfocado exclusivamente en la componente perpendicular al impacto, dejando de lado el análisis de la fuerza tangencial.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General:

- Cuantificar el desempeño sísmico en puentes esviados incluyendo la componente bidireccional.

3.2 Objetivos específicos:

- Analizar y cuantificar el efecto de la componente friccional en el impacto entre el estribo y el tablero en un puente prototipo sin esviaje.
- Analizar y cuantificar el efecto de la componente friccional en el impacto entre el estribo y el tablero en un puente prototipo con esviaje.
- Simular la respuesta sísmica de un puente chileno que sufrió daños durante el terremoto del 27 de febrero de 2010.

4 Metodología

Esta sección describe el enfoque utilizado para alcanzar el objetivo general del estudio, que busca cuantificar el desempeño sísmico de puentes esviados considerando la componente bidireccional del movimiento. Para ello, se desarrollan modelos numéricos que incorporan distintos ángulos de esviaje, así como escenarios con y sin la presencia de fricción en los impactos entre el tablero y los estribos. La metodología contempla la selección de registros sísmicos representativos, el uso de simulaciones no lineales mediante OpenSees y la aplicación de un análisis de tipo multifranjas para estimar la probabilidad de colapso.

4.1 Generar el modelo numérico del puente prototipo, definiendo sus características estructurales, geométricas y materiales.

El puente será modelado en OpenSees el cual es un software de código abierto ampliamente reconocida en el campo de la ingeniería estructural, especialmente en el análisis de sistemas no lineales sometidos a cargas dinámicas, como sismos. Su flexibilidad y capacidad de personalización hacen de OpenSees una herramienta ideal para modelar fenómenos complejos, como los impactos entre el tablero y el estribo de puentes durante un evento sísmico. En el contexto de esta memoria, su capacidad para manejar modelos avanzados y su estructura de código abierto permiten el desarrollo de macro-elementos específicos que capturen las interacciones friccionales y de contacto en sistemas estructurales.

La ventaja de OpenSees radica en su diseño modular, que permite a los investigadores y profesionales de la ingeniería agregar nuevas funcionalidades mediante la implementación de sus propios algoritmos y elementos personalizados. Esto es crucial para este estudio, ya que las herramientas prediseñadas disponibles en la plataforma, aunque útiles, no cubren completamente las interacciones bidireccionales y los fenómenos friccionales que ocurren en puentes sometidos a sismos de gran magnitud. La posibilidad de crear un macro-elemento que modele la fricción y el contacto entre el tablero y el estribo bajo condiciones bidireccionales convierte a OpenSees en la plataforma idónea para llevar a cabo este tipo de análisis.

En esta etapa se definen las principales características geométricas, estructurales y de materiales del modelo. Se consideran como variables clave la presencia de esviaje (en distintos ángulos), la inclusión o no de fricción en la interfaz de impacto, y los desplazamientos relativos obtenidos como respuesta. El modelo se construye con macro-elementos que capturan de forma simplificada, pero precisa, la interacción dinámica de los componentes.

4.2 Seleccionar los registros sísmicos representativos para el análisis y realizar un estudio paramétrico, considerando distintos ángulos de esviaje para evaluar su impacto en la respuesta dinámica del puente.

El análisis tiempo-historia no lineal constituye una herramienta fundamental para evaluar la respuesta estructural frente a movimientos sísmicos reales, considerando la complejidad y variabilidad de la acción sísmica. Para representar de manera adecuada las condiciones de amenaza sísmica, los registros se seleccionaron desde la base de datos NGA-Subducción del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), la cual recopila movimientos fuertes característicos de zonas de subducción. Posteriormente, se aplicará un proceso de escalamiento sísmico para ajustar la intensidad de los registros y lograr compatibilidad con el espectro objetivo definido por la normativa nacional vigente.

A partir de estos registros, se desarrollará un estudio paramétrico variando el ángulo de esviaje del puente, con el propósito de analizar cómo la fricción influye en su respuesta dinámica. En cada configuración se evaluarán variables como desplazamientos máximos, aparición de impacto y rotación en planta, permitiendo comprender el efecto combinado del esviaje y la fricción en el desempeño estructural del sistema.

4.3 Modificar el modelo numérico para replicar las características específicas del puente particular en estudio, asegurando que refleje sus condiciones estructurales reales.

Con el fin de evaluar la respuesta sísmica del puente en estudio bajo condiciones representativas, se adaptará el modelo numérico prototipo incorporando las características geométricas, estructurales y de apoyo del puente real. Para ello, se utilizarán planos, fotografías y antecedentes técnicos disponibles que permitan definir dimensiones, tipología de apoyos, tipo de tablero y configuración estructural general. Este proceso busca construir un modelo calibrado que funcione como un gemelo digital, es decir, una réplica computacional del puente capaz de reproducir su comportamiento dinámico ante eventos sísmicos. La hipótesis principal es que, al incorporar las condiciones reales del puente, el modelo será capaz de replicar de manera adecuada la respuesta estructural observada en terreno. Las variables clave a definir y ajustar en esta etapa incluyen rigidez, masa y distribución de cargas. Este modelo será utilizado en conjunto con registros sísmicos locales para evaluar su desempeño y validar el desplazamiento obtenido para el terremoto del 27 de febrero en Chile.

5 Descripción del caso de estudio y Modelación en OpenSees

Durante esta etapa se ha trabajado en la construcción progresiva del modelo numérico del puente en OpenSees, incorporando de forma estructurada los distintos componentes que serán parte del análisis. Se ha definido la geometría general, la configuración de la superestructura y subestructura, y se han modelado elementos clave como los apoyos elastoméricos, llaves de corte, barras antisísmicas y la interacción entre el tablero y los estribos. Esta última incluye un elemento de impacto bidireccional que permite capturar tanto la componente vertical como la friccional, lo que representa uno de los aportes centrales de la memoria. Los detalles de esta modelación se presentan a continuación.

5.1 Caso de estudio

El puente Las Mercedes ha sido seleccionado como caso de estudio por representar una tipología común en la infraestructura vial chilena ya que es un puente simplemente apoyado con vigas pretensadas de hormigón. Esta configuración es una de las más frecuentes en el país, lo que permite que los resultados obtenidos sean aplicables a un amplio conjunto de estructuras similares. El puente en cuestión presenta dos vanos de 27 metros de longitud y 9,1 metros de ancho, con una losa continua apoyada sobre tres vigas pretensadas. La superestructura se apoya sobre apoyos elastoméricos no adheridos, dispuestos sobre una pila central de dos columnas y estribos tipo asiento en los extremos.

El ángulo de esviaje de la estructura es de 11° , lo que introduce condiciones geométricas relevantes para el análisis del impacto y la fricción en la interfaz tablero-estribo. Las columnas de la pila central tienen un diámetro de 1 metro, una altura de 6,8 metros, y están separadas 5 metros entre sí. La disposición geométrica del Puente de Las Mercedes se representa en la Figura 1.

Este puente ha sido objeto de estudios anteriores enfocados en el comportamiento sísmico de puentes chilenos (Martínez et al., 2017^a), (Aldea et al., 2021b), lo que respalda su elección como referencia para este trabajo. Además, su diseño estructural se ajusta tanto al código chileno de diseño sísmico de puentes (MOP, 2002) como a especificaciones internacionales como AASHTO LRFD (2017), lo que refuerza la validez de los análisis realizados y su aplicabilidad más allá del contexto local.

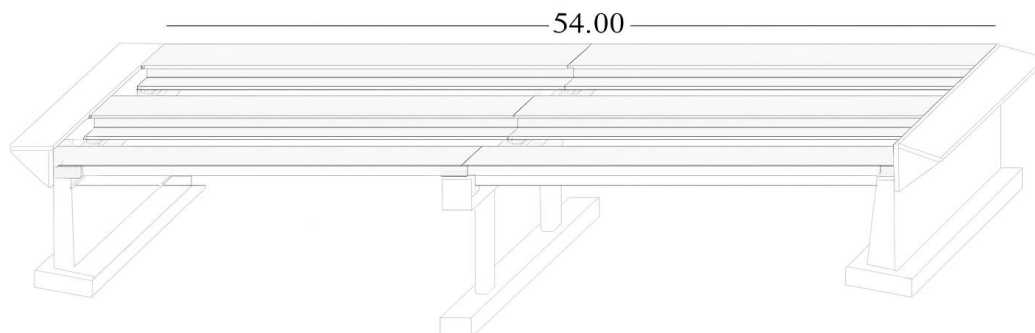


Figura 1: Caso estudio, Puente Las Mercedes.

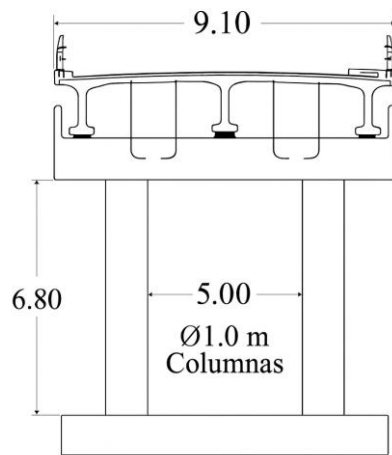


Figura 2: Sección Transversal Cepa.

5.2 Modelación numérica del puente

En este estudio se utilizará un modelo tridimensional del puente desarrollado en OpenSees, plataforma de código abierto ampliamente utilizada para simulaciones no lineales en ingeniería sísmica (McKenna et al., 2010). El modelo se calibrará con base en la geometría y características estructurales del caso de estudio (puente Las Mercedes), permitiendo evaluar el desempeño del puente bajo solicitaciones sísmicas extremas, considerando distintos elementos y materiales. A continuación, se muestra el modelo 3D hecho en OpenSees.

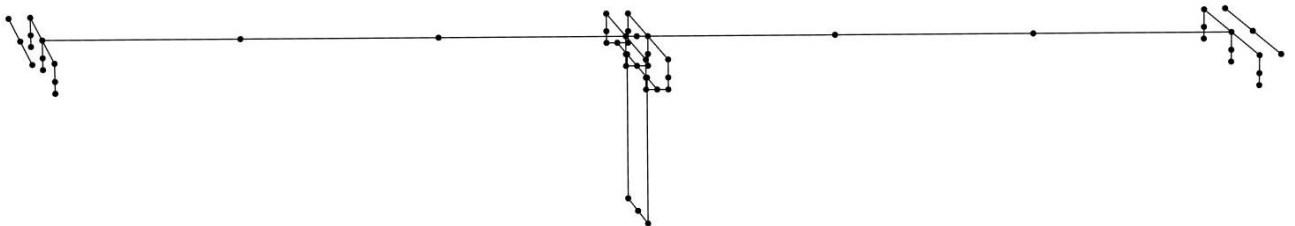


Figura 3: Modelo Tridimensional del Puente Las Mercedes.

5.2.1 Tablero

La superestructura está conformada por tres vigas de hormigón pretensado sobre apoyos elastoméricos sin adherencia. Estas vigas se extienden de manera continua a lo largo del puente y trabajan junto a una losa de hormigón armado, conformando un sistema compuesto que permite una adecuada distribución de cargas.

El tablero será modelado en OpenSees mediante un único elemento “elasticBeamColumn” subdividido en 6 partes iguales, como se muestra en la Figura 4. Este elemento representa el comportamiento elástico lineal de la sección transversal compuesta por la losa y las tres vigas pretensadas, lo cual es adecuado considerando que no se espera demanda no lineal en estos componentes. Las propiedades geométricas y mecánicas de la sección se obtienen mediante la herramienta Section Designer de SAP2000, que permite definir fácilmente la geometría de la sección transversal del tablero. A continuación, se detallan las características adoptadas para este modelo.

Tabla 1: Propiedades del tablero.

h [m]	1.16
A [m ²]	3.96
J [m ⁴]	0.13
Iz [m ⁴]	1.52
Iy [m ⁴]	30.78

La subdivisión del tablero en 6 elementos tiene como objetivo representar de manera más realista su comportamiento dinámico. Al utilizar varios elementos en lugar de un único tramo continuo, la masa queda distribuida a lo largo del tablero y no concentrada solo en los extremos, lo que permite obtener formas modales, rotaciones y deformaciones más representativas del sistema real. Esta discretización también facilita la medición de la respuesta en puntos intermedios, aspectos relevantes para los análisis tiempo-historia desarrollados en este estudio. En la Figura 4 se puede apreciar una vista en planta de solo el tablero.



Figura 4: Representación del tablero modelado en OpenSees.

5.2.2 Columnas y Viga cabezal

Esta parte de la estructura se compone de una viga central conectada por dos columnas circulares de hormigón armado que llegan hacia la fundación (ver Figura 2). Las columnas tienen 1 metro de diámetro y una altura de 6.8 metros, separadas 5 metros entre sí. Esta disposición responde a las especificaciones del código chileno de diseño sísmico de puentes. Este marco se simula mediante elementos *frame* lineales elásticos debido a que no se espera incursión no-lineal en estos elementos.

5.2.3 Modelación de la fundación

El sistema de fundación será representado mediante condiciones de apoyo rígidas en la base de las columnas, considerando que el enfoque de la investigación se centra en la respuesta estructural asociada al impacto y no en la interacción suelo-estructura. Además, la fundación cumple un rol secundario en este contexto, actuando principalmente como soporte del sistema.

5.2.4 Interacción estribo y tablero

La interacción entre el tablero y los estribos se modela mediante un elemento capaz de representar el contacto en ambas direcciones, la fuerza normal cuando ocurre el impacto y la fuerza tangencial asociada a la fricción. Este enfoque es importante porque el roce que aparece durante el contacto puede generar giros en el tablero y modificar la respuesta global del puente, especialmente cuando existe esvía.

Para esto se utiliza el elemento *FlatSliderBearing* de OpenSees, ya que permite definir su orientación mediante dos nodos, alineando el eje principal del elemento con la dirección efectiva del impacto. De esta manera, la componente normal queda asociada al eje axial del elemento y la fricción se desarrolla en la dirección perpendicular dentro del mismo plano de contacto (González, 2025).

En el eje normal se asigna un material tipo *Hertz-Damp*, que reproduce el comportamiento no lineal del impacto, considerando la rigidez y amortiguamiento propios de este fenómeno. Para la componente tangencial se emplea un modelo de fricción Coulomb con un coeficiente dinámico $\mu = 0.5$, valor utilizado comúnmente en los análisis de impacto en estructuras de hormigón armado (Pant & Wijeyewickrema, 2014). La rigidez tangencial local del elemento de impacto se define con un valor alto, de forma tal de que su comportamiento sea prácticamente infinitamente rígido en esa dirección en condición de pre-deslizamiento.

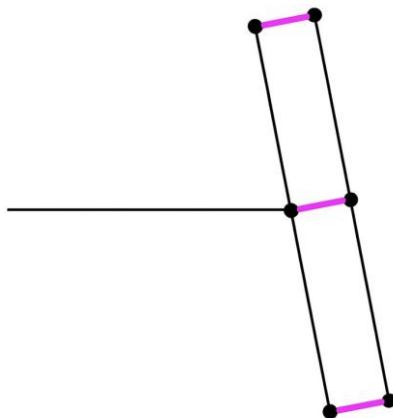


Figura 5: Elementos impactos en uno de los estribos.

Los elementos se ubican directamente entre los nodos del tablero ubicados en los bordes y los nodos correspondientes en el estribo, de modo que el eje axial coincida con la dirección normal a la superficie de contacto. Esto permite que la fuerza de impacto se transmita correctamente y que la fricción actúe en el plano del tablero.

En cambio, para el caso con impacto pero sin fricción se usa un coeficiente de fricción prácticamente nulo ($\mu=1e-10$) para que el elemento permita el contacto normal, pero sin aportar fuerza tangencial, sin mayores modificaciones al modelo. Esto permite separar claramente los efectos de ambas componentes.

Con esta configuración es posible representar de manera sencilla y consistente el impacto bidireccional entre el tablero y los estribos, lo que es esencial para evaluar el rol que juega la fricción en la respuesta sísmica del puente. En la Figura 5 se puede apreciar como se conecta el tablero con uno de los estribos a través de tres elementos impacto.

5.2.5 Apoyos elastoméricos

Los apoyos elastoméricos serán modelados como elementos sin adherencia, con sección rectangular de 300×500 mm y una altura de 47 mm en los estribos y 34 mm en la cepa. Estos dispositivos permiten desplazamientos controlados y juegan un rol fundamental tanto en la distribución de las fuerzas sísmicas como en la ocurrencia de deslizamientos durante eventos extremos.

Para su representación numérica, se utilizará el elemento *FlatSliderBearing* de OpenSees, el cual permite capturar de forma integrada la rigidez al corte en el rango lineal de la goma y la interacción friccional en el plano dependiente de la fuerza axial que sostiene el elemento. El comportamiento a flexión y torsión de los apoyos será modelado mediante un enfoque elástico, empleando materiales tipo *Elastic*, conforme a las recomendaciones de (Green et al., 2001). En cuanto a la respuesta al corte, esta se definirá con base en el modelo propuesto por (Steelman et al., 2013) utilizando una rigidez inicial derivada del módulo de corte especificado en el Manual de Carreteras. La fricción se incorporará mediante un modelo de tipo Coulomb.

A continuación, se presentan las expresiones utilizadas para estimar las rigideces verticales, de corte, de flexión y de torsión de los apoyos, necesarias para su correcta implementación en el modelo numérico.

- Rigidez vertical de los apoyos

$$k_{axial} = \frac{EA}{h_r} \quad (1)$$

- Rigidez al corte de los apoyos.

$$k_{corte} = \frac{GA}{h_r} \quad (2)$$

- Rigidez A flexión de los apoyos.

$$k_{flexion} = \frac{EI}{h_r} \quad (3)$$

- Rigidez a torsión de los apoyos.

$$k_{torsion} = \frac{GI}{h_r} \quad (4)$$

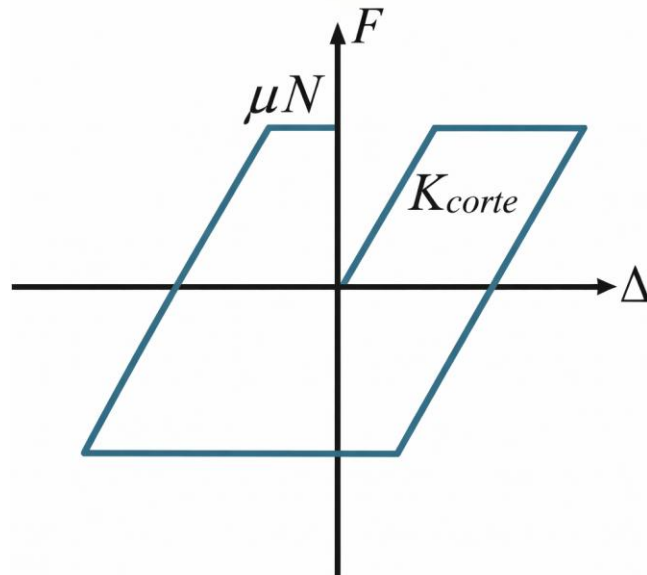


Figura 6: Comportamiento del apoyo elastomérico.

En la Figura 7 se presenta un gráfico fuerza vs deformación de un apoyo elastomérico proveniente de uno de los análisis que se presentaran más adelante.

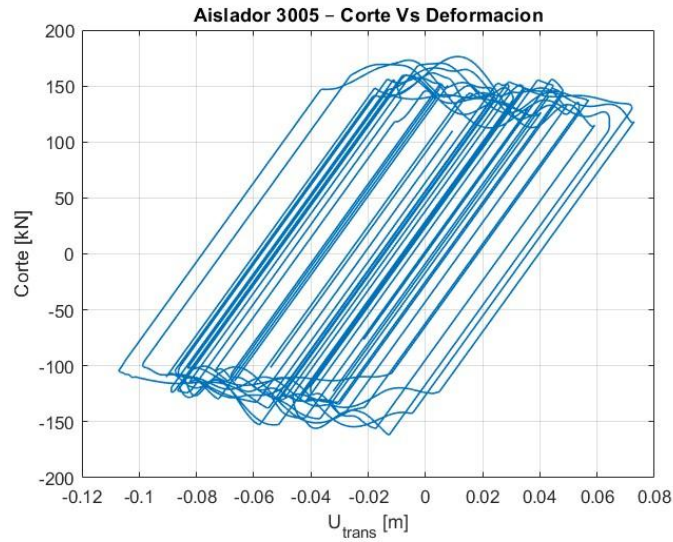


Figura 7: Gráfico fuerza vs deformación de un apoyo elastomérico.

5.2.6 Llaves de corte

Las llaves de corte externas de hormigón son modeladas utilizando elementos tipo *zeroLength* en OpenSees. Para representar su comportamiento, se utilizará una combinación de materiales que actúan en serie: un material *Hysteretic*, que permite capturar la respuesta fuerza-deformación con forma trilineal, y un material *ElasticPPGap*, que reproduce el efecto del gap existente entre la superestructura y el tope. Esta estrategia de modelación ha sido utilizada previamente para representar el comportamiento no lineal de este tipo de elementos bajo cargas sísmicas, siguiendo las recomendaciones de (Goel & Chopra, 2008). Las deformaciones y fuerzas fueron determinadas a partir de las siguientes ecuaciones.

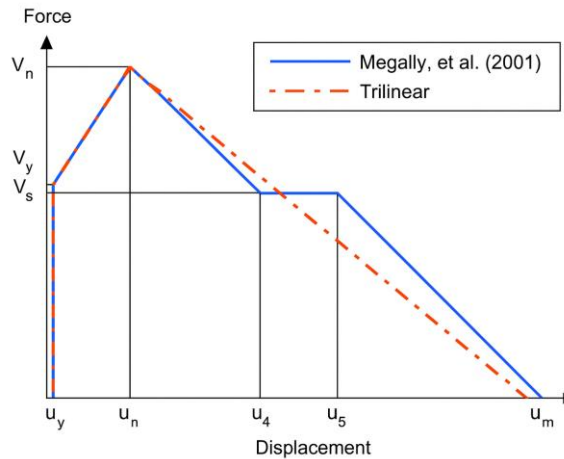


Figura 8: Fuerza vs deformación de las llaves de corte Goel y Chopra.

$$\mu_y = \sqrt{2} \cdot \varepsilon_y \cdot (L_d + L_a) \cdot \frac{(h + d)}{\sqrt{h^2 + d^2}} \quad (5)$$

$$\mu_n = \sqrt{2} \cdot \varepsilon_y \cdot (L_d + L_a) \cdot \frac{(h + d)}{s} \quad (6)$$

$$V_c = 200 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot h \quad (7)$$

$$V_s = \left[A_{s1} \cdot f_y \cdot h + A_{s2} \cdot f_y \cdot d + n_h \cdot A_{sh} \cdot f_y \cdot \frac{h^2}{2S} + n_v \cdot A_{sv} \cdot f_y \cdot \frac{d^2}{2S} \right] \cdot \frac{1}{h + a} \quad (8)$$

$$V_n = V_s + V_c \quad (9)$$

$$V_y = V_s + V_c \cdot \frac{\mu_y}{\mu_n} \quad (10)$$

Donde en las deformaciones:

- ε_y : Deformación unitaria de fluencia del acero ($\varepsilon_y = 0.002$).
- $\varepsilon_{0.005}$: 0.005
- $\varepsilon_{0.007}$: 0.007
- L_a : Ancho de la pared del muro.
- L_d : Longitud de desarrollo del refuerzo longitudinal.
- s : Espaciamiento horizontal y vertical de las barras.
- h : Alto del muro espaldar del estribo.
- d : Ancho del tope sísmico externo.
- μ_m : Se obtiene considerando la misma pendiente entre $\mu_5 - \mu_m$ y $\mu_n - \mu_4$.

Mientras que para las fuerzas:

- V_c : Contribución del hormigón a la capacidad del tope.
- V_s : Contribución del acero a la capacidad del tope.
- V_n : Resistencia nominal al corte del tope.
- f'_c : Resistencia a compresión del hormigón
- b : Ancho del muro espaldar del estribo.
- A_{s1} : Área transversal de las barras horizontales.
- A_{s2} : Área transversal de las barras inclinadas en la primera interfaz del elemento.
- A_{sh} y A_{sv} : Área transversal de una barra horizontal y vertical, respectivamente.
- n_h y n_v : Numero de planos con reforzamiento horizontal y vertical, respectivamente.
- A : 0.167 veces el valor de d
- f_y : Esfuerzo de fluencia del acero.

Para verificar el correcto funcionamiento de las llaves de corte, se presenta la respuesta del sistema utilizando uno de los registros sísmicos utilizados en este estudio. La Figura 9 muestra la trayectoria orbital del tablero para el registro R11 a través de desplazamiento del nodo central de este para el caso con esviaje con y sin fricción, mientras que en la Figura 10 se muestra el comportamiento de las llaves de corte de todo el puente. A partir de la trayectoria transversal del sismo se ve que el tablero cruza el gap de ± 10 [cm] en ambos sentidos, lo que confirma impacto con las llaves de corte de los dos lados. Luego, en la Figura 10 se aprecia que todas las llaves alcanzan a activarse durante el movimiento, excepto una que no llega a cerrar completamente. Cabe destacar que el comportamiento de las llaves de corte mostrado corresponde únicamente al caso con fricción. Si bien se observa la ocurrencia de impacto para el registro considerado, éste no alcanza a generar un comportamiento no lineal en estos elementos.

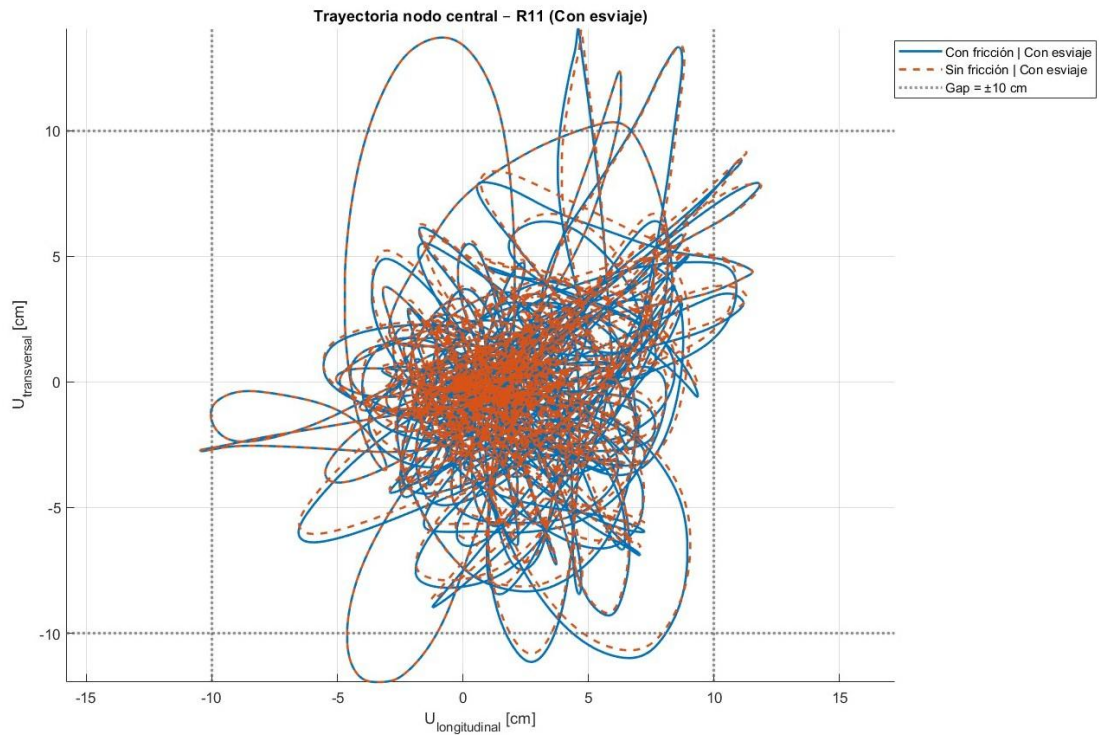


Figura 9: Trayectoria del tablero para el caso con esvaje.

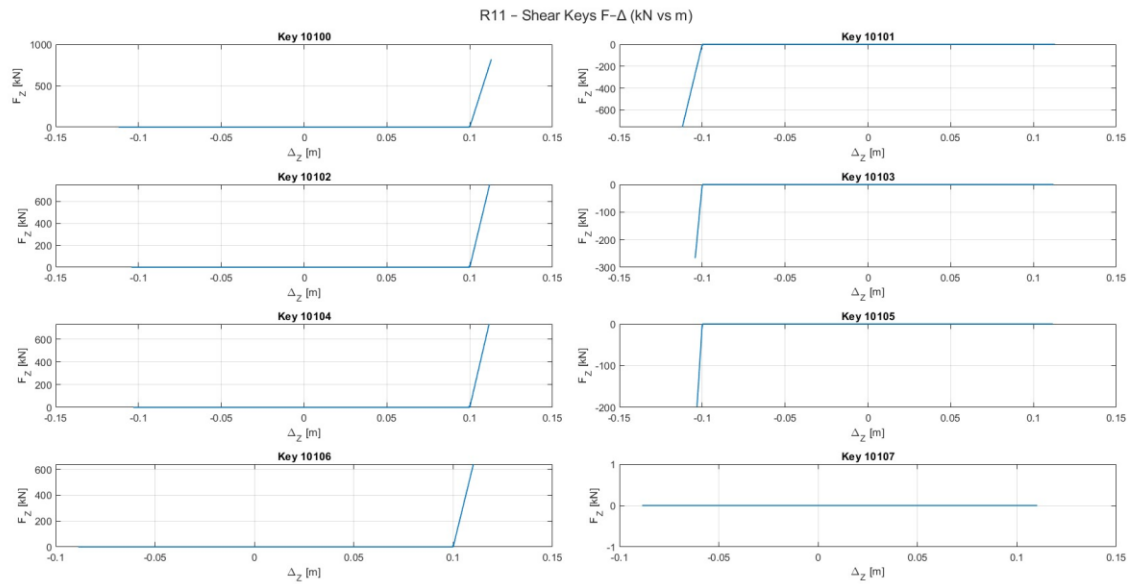


Figura 10: Comportamiento de las llaves de corte.

5.2.7 Barras sísmicas

Las barras sísmicas fueron modeladas mediante resortes no lineales ubicados en las tres direcciones del sistema estructural, dos en el plano horizontal y una en la dirección vertical. Para las direcciones horizontales se utilizó un material tipo *Hysteretic*, con propiedades definidas según el modelo propuesto por (Martínez et al., 2017b) permitiendo representar la respuesta cíclica bilineal de las conexiones y su capacidad de disipar energía durante eventos sísmicos. A continuación, se mostrarán las ecuaciones y los gráficos utilizados.

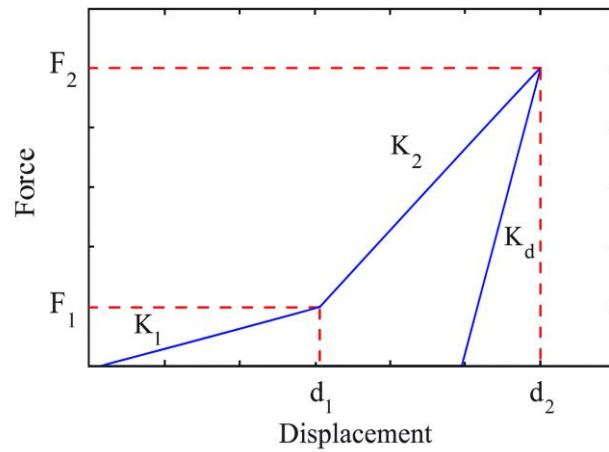


Figura 11: Comportamiento horizontal.

$$F_i = \gamma f_i^* A_{sb} \quad (11)$$

$$K_d = 15K_2 \quad (12)$$

Donde:

- f_i^* corresponde a $1.2f_y$ nominal
- $\gamma = \begin{cases} 0.07 & \text{para } F_1 \\ 0.37 & \text{para } F_2 \end{cases}$
- h_l : distancia libre promedio
- $d_1 = 0.1h_l$
- $d_2 = 0.35h_l$

En la dirección vertical se empleó un material *ElasticPPGap*, configurado para trabajar únicamente a tracción, sin capacidad de resistir esfuerzos de compresión. Este enfoque busca representar de forma adecuada el comportamiento de las barras sísmicas no-postensadas ante fuerzas de levantamiento, considerando las propiedades específicas del material utilizado.

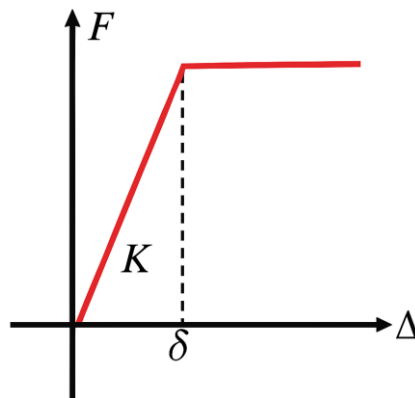


Figura 12: Comportamiento vertical.

A continuación, en la Figura 13 se presenta un gráfico donde se ve el comportamiento de una barra sísmica en un registro en el eje horizontal y vertical.

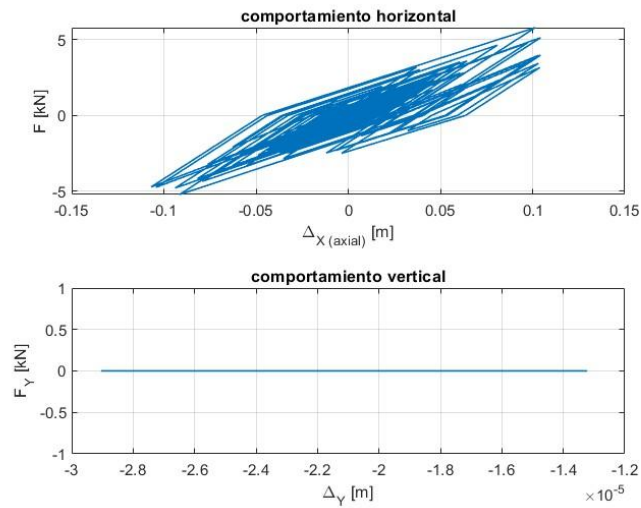


Figura 13: Comportamiento de las barras sísmicas.

En el comportamiento vertical no se aprecian fuerzas debido a que el modelo solo se le incorporó el sismo en dos direcciones, es decir solo en los ejes horizontales. Luego, al considerar la carga gravitacional, la barra sísmica deja de trabajar. En este contexto, la única forma de tomar fuerzas verticales sería que ocurrieran movimientos de balanceo importantes, lo cual no sucede.

6 Resultados

En esta sección se presentan los resultados para los casos con y sin esviaje, evaluando en cada uno la respuesta con y sin fricción durante el impacto. Se reportan las fuerzas obtenidas durante el impacto, la rotación en el nodo central y los desplazamientos transversales en los nodos de borde, permitiendo comparar cómo cada condición influye en el comportamiento global del tablero.

6.1 Selección y escalamiento de registros sísmicos

La selección de registros se llevó a cabo mediante la plataforma NGA-Subduction del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), considerando movimientos sísmicos ocurridos en Sudamérica con magnitudes entre 6.5 y 9.2 [Mw]. Además, se tomaron en cuenta las condiciones de sitio caracterizadas por velocidades de propagación de onda de corte V_{s30} entre 350 y 500 [m/s], correspondientes a un suelo tipo C según la NCh 2369-2025, en una zona sísmica II, en concordancia con las condiciones del puente en estudio. A continuación, se presentará una tabla con los registros seleccionados.

Tabla 2: Detalle de los registros sísmicos

Registro	Estación	NGAsubRSN	Magnitud [Mw]	Vs 30 [m/s]	Factor de amplificación
R01	ARICA	6001020	8.41	432	3.98
R02	ARICA CEMENTERIO	6001021	8.41	432	2.78
R03	ARICA COSTANERA 2	6001145	7.78	390	3.47
R04	ARICA CEMENTERIO	6001733	8.41	432	3.32
R05	OLMU	6001808	8.81	391	1.31
R06	MATANZAS ESCUELA CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO	6001818	8.81	379	1.01
R07	SANTIAGO CENTRO VILLA ANDALUCÍA	6001824	8.81	489	3.37
R08	T13A	6002215	7.76	378	2.18
R09	AV21	6004613	6.73	429	3.89
R10	C140	6005361	8.31	415	2.34
R11	ARICA COSTANERA	6005776	8.15	390	3.18

Los registros fueron escalados en amplitud de acuerdo con el espectro de diseño definido en el acápite 5.4.3.2 de la norma NCh2369-2025, correspondiente al espectro objetivo a nivel máximo, equivalente a 1.4 veces el espectro de referencia. Esta comparación entre el espectro escalado de cada registro y el espectro objetivo permite verificar que la demanda del movimiento ajustado representa adecuadamente un nivel MCE, garantizando así la compatibilidad requerida para los análisis tiempo-historia del puente.

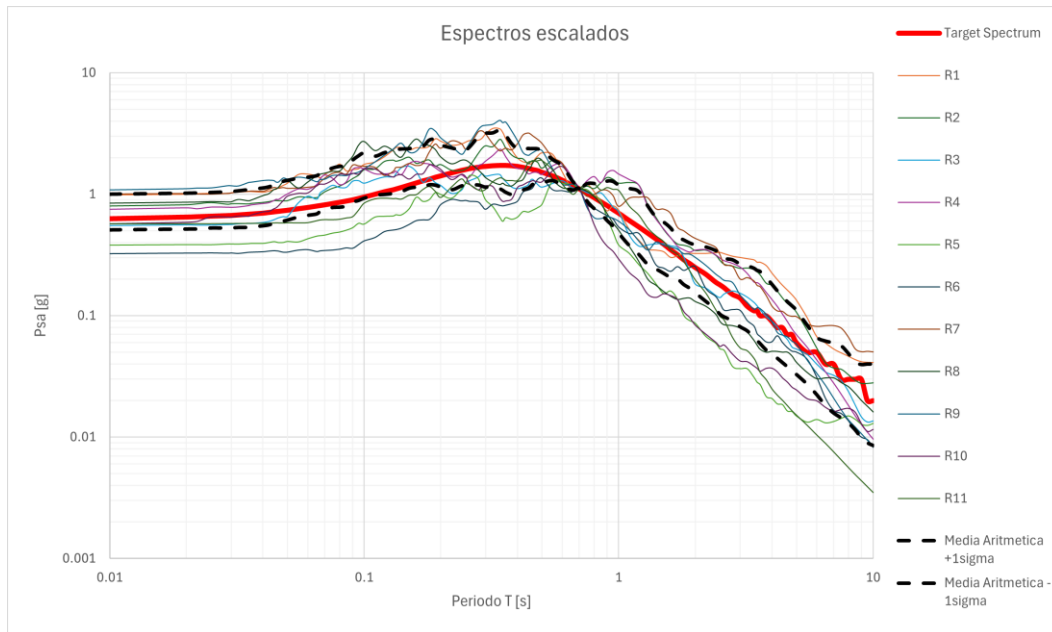


Figura 14: Espectros escalados y objetivo en escala logarítmica para MCE.

6.2 Análisis modal.

En la siguiente tabla se presentarán los resultados de los tres primeros periodos naturales de la estructura. Los dos primeros están dados por el desplazamiento traslacional en el eje longitudinal y transversal, mientras que el tercero está dado por el desplazamiento rotacional. dando así resultados bastante parecido a otros autores que han estudiado el mismo caso.

Tabla 3: Periodos naturales de la estructura.

Modo	1	2	3
T [s]	0.67	0.67	0.63

6.3 Respuesta estructural en el caso sin esviaje.

Para cada estribo se suman las fuerzas normales y tangenciales provenientes de sus tres elementos de impacto, y luego estas fuerzas se normalizan respecto del peso del tablero, expresándolas en porcentaje del peso [W%]. Con este procedimiento, el comportamiento del elemento se observa de manera clara con las fuerzas normalizadas del registro R04. A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a el caso sin fricción.

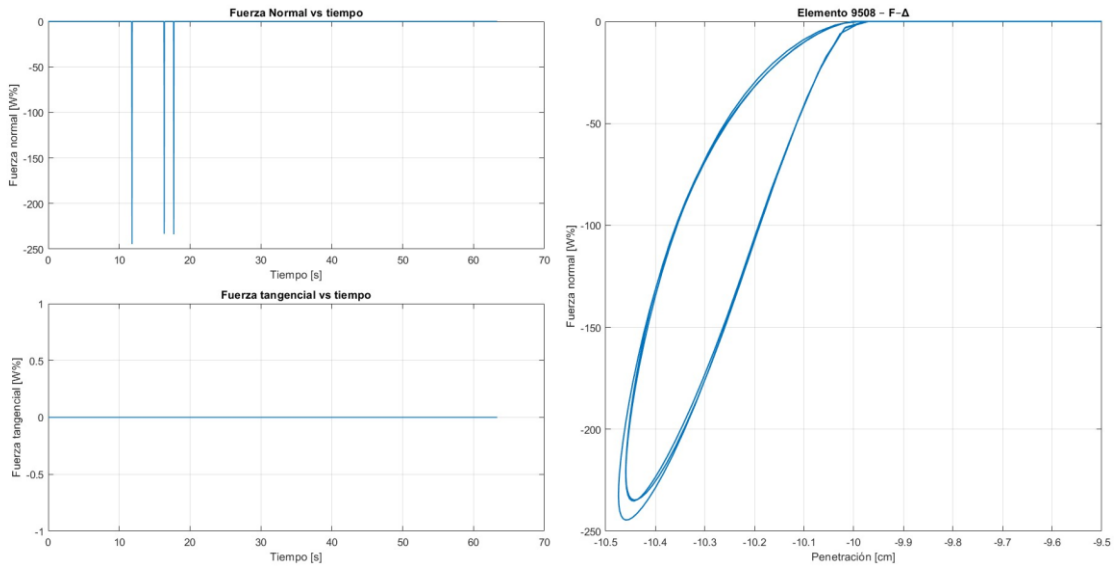


Figura 15: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R04 caso con impactos sin roce en el estribo de salida.

Para mejorar la interpretación del gráfico fuerza versus penetración, se optó por representar únicamente la curva de un solo elemento de impacto y no la suma de los tres elementos del estribo. Esto se debe a que las fuerzas de impacto de los distintos elementos no son perfectamente sincrónicas entre sí, cada uno entra en contacto en instantes levemente diferentes, por lo que al sumar sus contribuciones la curva resultante pierde su forma característica y genera un $F-\Delta$ poco representativo. En cambio, al graficar un único elemento y escalarlo para que su valor máximo coincida con el peak real de la fuerza total, se obtiene una curva limpia, físicamente coherente y visualmente más clara para el análisis. Por practicidad, a partir de este punto solo se presentarán los gráficos de fuerza vs tiempo.

Al analizar las fuerzas de impacto también se observa que no siempre se cumple la relación donde la fuerza tangencial es el 50% de la fuerza normal ($\mu=0.5$). Esto ocurre porque durante el contacto en presencia de deslizamiento, la relación entre estas fuerzas debería ser 0.5, sin embargo, en ausencia de deslizamiento, la relación puede ser un valor menor a 0.5, incluso pudiendo cambiar de signo.

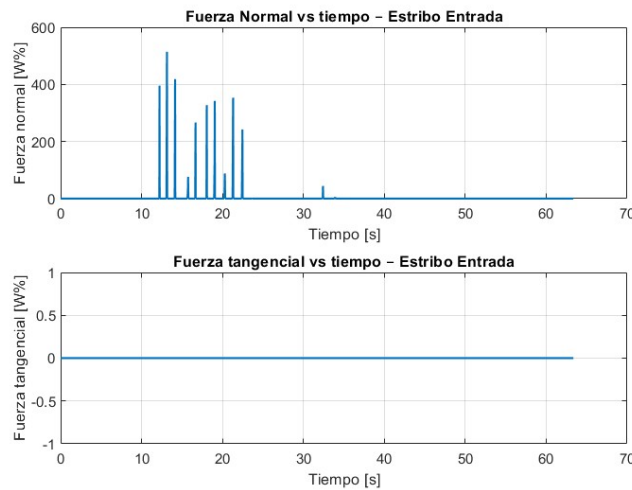


Figura 16: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R04 caso con impactos sin roce en el estribo de entrada.

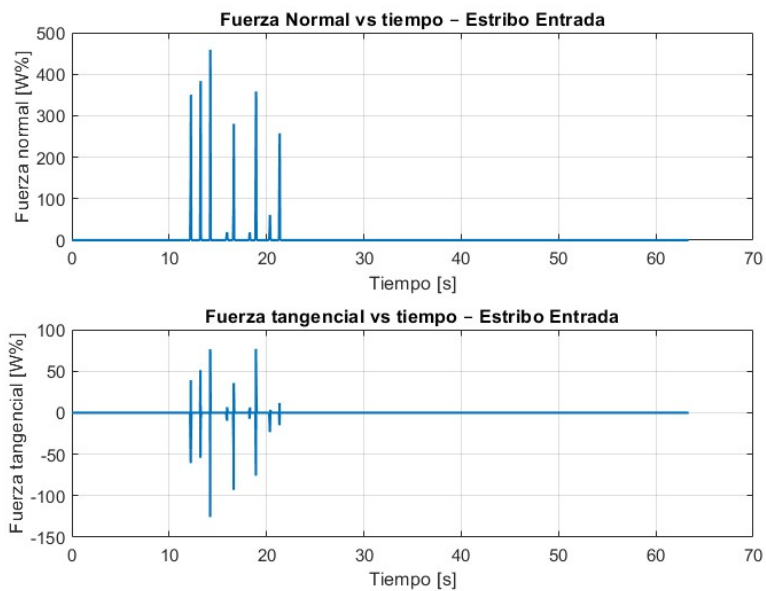


Figura 17: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R04 caso con impactos con roce en el estribo de entrada.

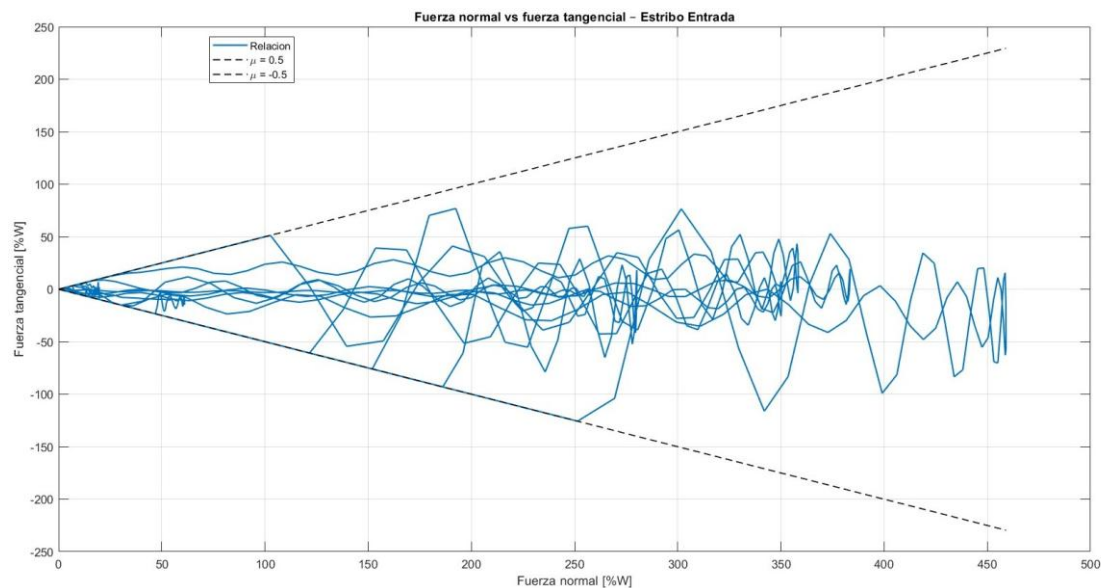


Figura 18: Grafico fuerza normal versus fuerza tangencial para registro R04 caso con impactos con roce en el estribo de entrada.

Se puede apreciar en la Figura 18 que en el grafico de fuerza tangencial versus fuerza normal se incluyen líneas segmentadas con pendiente ± 0.5 , asociadas al coeficiente de fricción considerado en el modelo. Estas líneas funcionan como bandas límite que la respuesta no sobrepasa, ya que al alcanzarlas se produce el deslizamiento entre el tablero y el estribo.

Para facilitar la interpretación de las rotaciones que entrega OpenSees, las cuales se reportan en radianes en el nodo central del tablero, estas se transformaron en desplazamientos de borde equivalentes, Δ . Para ello, cada rotación se multiplicó por la mitad de la longitud del tablero, que corresponde al radio desde el centro de masa hacia los bordes. Esta conversión permite expresar la rotación en términos de desplazamiento transversal en el borde, lo que hace más clara la comparación entre casos y la magnitud del movimiento que experimenta el tablero respecto a los movimientos de traslación.

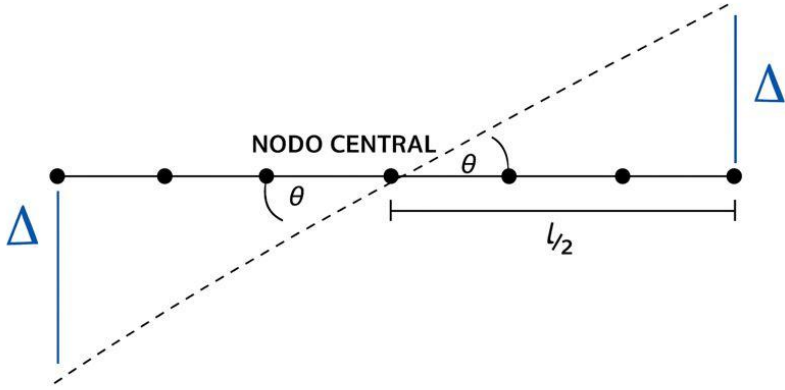


Figura 19: Figura ilustrativa de como la rotación se lleva a desplazamientos de borde.

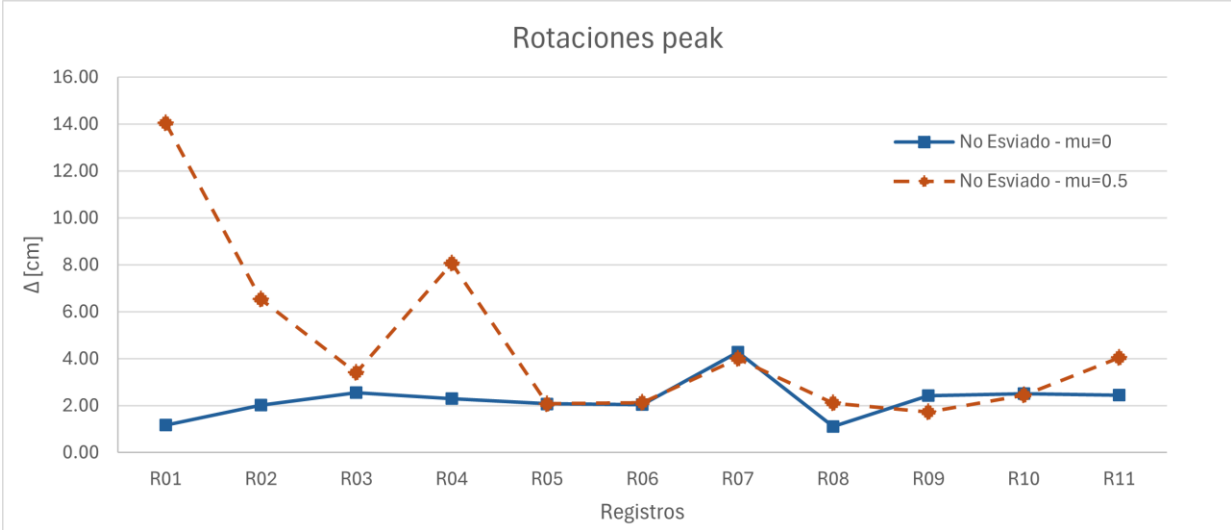


Figura 20: Rotaciones del nodo central expresada en centímetros.

En el caso sin esviaje se observa prácticamente una rotación nula del tablero, lo cual es coherente con el comportamiento esperado para un puente simétrico donde no existen efectos geométricos que induzcan rotación, salvo algún efecto de balanceo menor que produzca un deslizamiento diferencial en alguno de los apoyos elastoméricos. En cambio, cuando se considera el impacto con fricción, este comportamiento cambia de manera evidente. La mayoría de los registros muestran incrementos apreciables en desplazamientos adicionales de borde debido a la rotación. Esto confirma que la fuerza tangencial asociada al roce durante el impacto es suficiente para generar un giro del tablero incluso en ausencia de esviaje, modificando la respuesta global de la estructura.

En la Figura 21 se presentan los resultados correspondientes al caso sin esviaje, considerando las configuraciones con y sin fricción, a partir de los valores peak de desplazamiento registrados tanto en los bordes como en el centro del tablero. Para el caso con fricción, el desplazamiento peak en los bordes se representa en color azul, mientras que el desplazamiento peak del nodo central se muestra en celeste claro. En cambio, para el caso sin fricción, los desplazamientos peak en los bordes se indican en color café oscuro, y los correspondientes al centro del tablero en café claro.

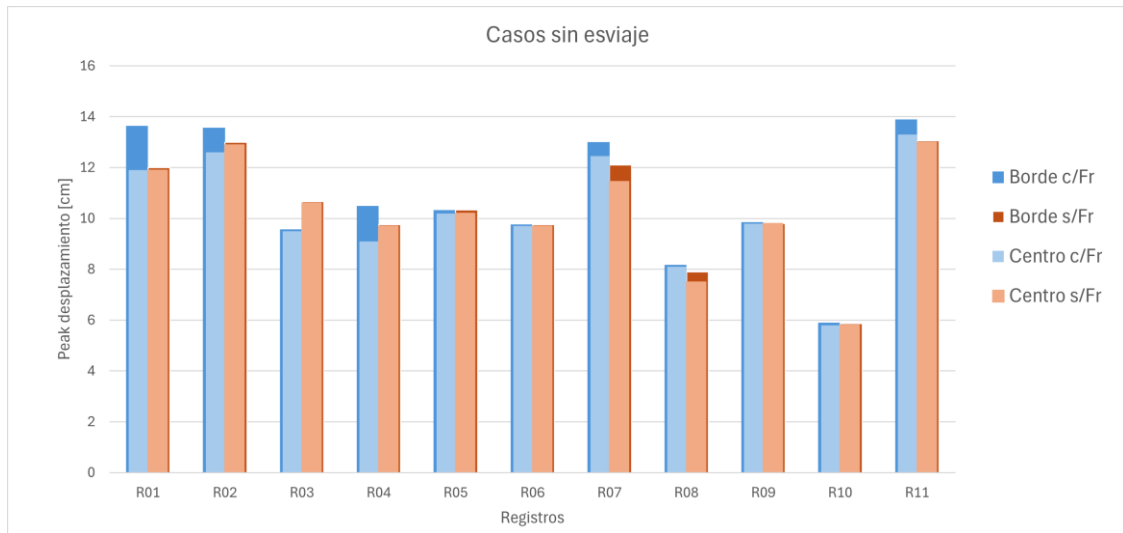


Figura 21: Comparación entre el peak de desplazamiento de borde vs el peak de desplazamiento del nodo central para el caso sin esviaje.

Para la Figura 22, se toma el mayor desplazamiento residual registrado en los bordes (considerando traslación y rotación del tablero, al final del registro) y se normaliza utilizando el promedio del peak de deformación de ambos nodos extremos, tal como se aprecia en la ecuación 12. Este enfoque permite comparar de forma más directa la magnitud del desplazamiento residual respecto de la demanda máxima experimentada por el tablero.

$$x = \frac{\text{Max}(\text{Desplazamiento}_{res\ borde\ izq}, \text{Desplazamiento}_{res\ borde\ der})}{\text{Peak de deformacion de borde}} \quad (13)$$

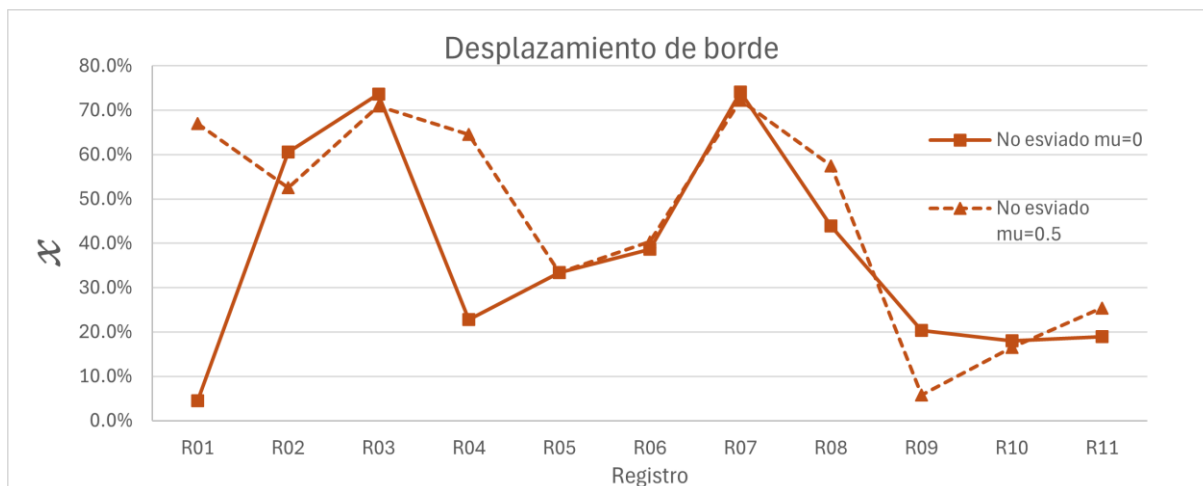


Figura 22: Desplazamiento residuales de los bordes del tablero expresada en %.

Para los desplazamientos residuales en los bordes del tablero, la interpretación se vuelve algo más difusa. Esto se debe a que, si bien puede haber mayores rotaciones máximas del tablero al incluir la fricción, esto no siempre genera un aumento significativo en las deformaciones residuales debido a deslizamiento de los apoyos. Aun así, al comparar las respuestas es posible reconocer, aunque de forma más tenue la misma tendencia observada previamente en el gráfico de rotación, donde los casos con fricción tienden a presentar mayores diferencias respecto del escenario sin esviaje.

6.4 Respuesta estructural con un esviaje de 11°

Para el caso con esviaje se presentan los mismos indicadores analizados en el escenario sin esviaje, es decir, fuerzas de impacto, rotación del nodo central y desplazamientos residuales en los bordes. Como el procesamiento de los resultados y los criterios de normalización no cambian, en esta sección solo se muestran las figuras correspondientes al modelo esviado, sin repetir las explicaciones ya desarrolladas anteriormente.

A continuación, se presentan las fuerzas de impacto obtenidas para el caso con esviaje, utilizando el mismo procedimiento aplicado previamente para su normalización y representación. Se mantiene el formato adoptado en la sección anterior para facilitar la comparación posterior.

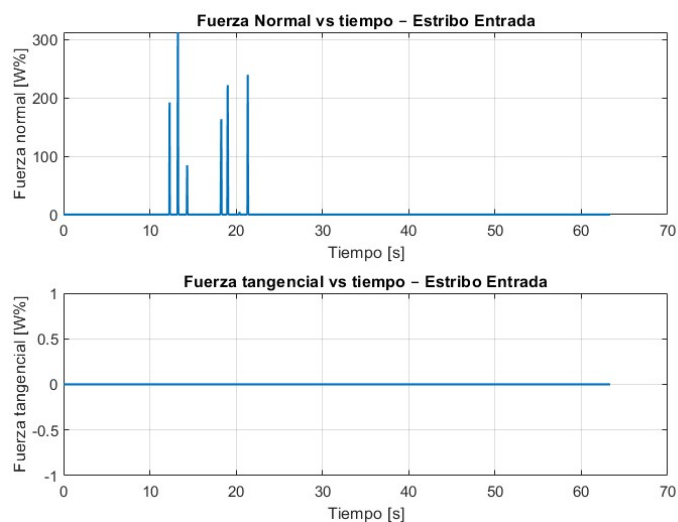


Figura 23: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos sin roce en el estribo de entrada.

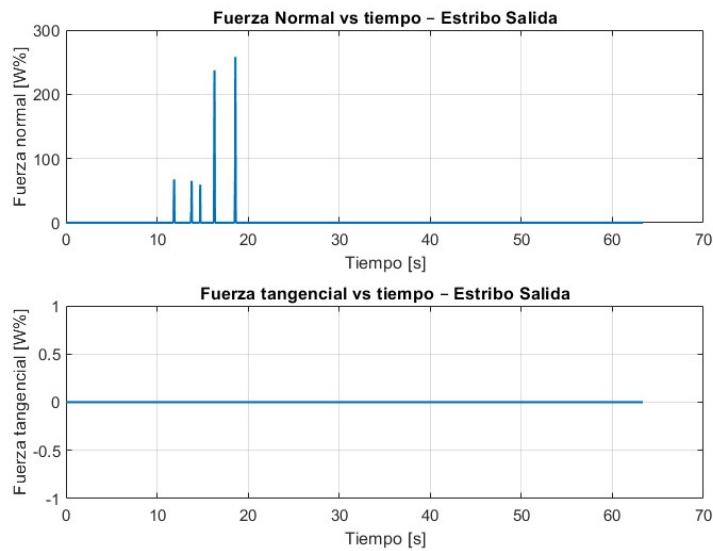


Figura 24: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos sin roce en el estribo de salida.

En el caso de impacto sin fricción, tal como se observa en las Figura 16 y Figura 16, la fuerza tangencial no aparece. Esto es coherente con el comportamiento esperado, ya que al anularse el coeficiente de roce el contacto solo puede transmitir esfuerzos normales. La ausencia de componente tangencial confirma que el elemento de impacto está siendo utilizado correctamente y que su respuesta es consistente con la formulación del modelo implementado.

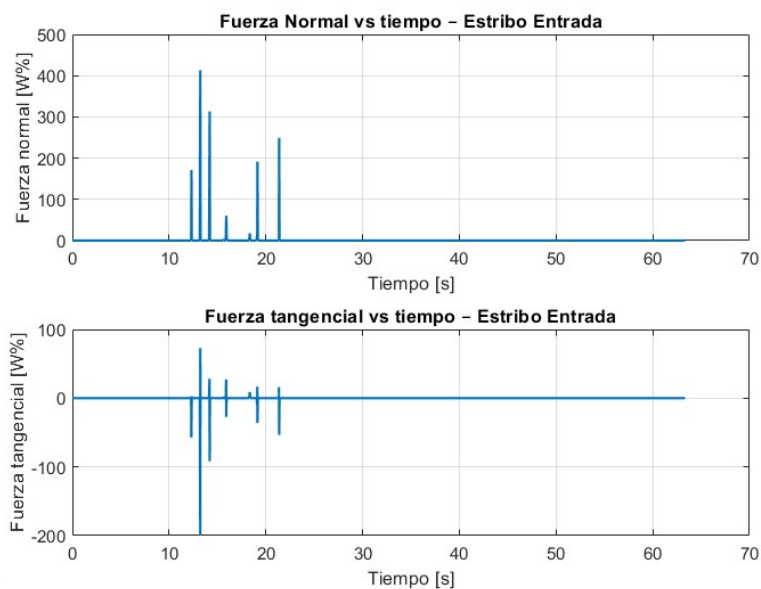


Figura 25: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos con roce en el estribo de entrada.

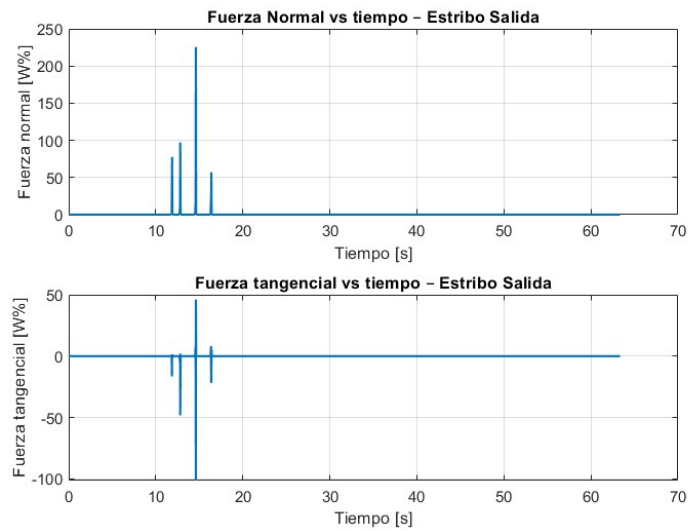


Figura 26: Ejemplo de fuerzas de impacto para registro R02 caso con impactos con roce en el estribo de salida.

En este caso se muestra la rotación del nodo central del tablero para el modelo con esviaje, expresada como desplazamiento transversal equivalente en el borde mediante la misma conversión utilizada previamente. La Figura 27 mantiene la misma escala y estructura de la sección anterior para facilitar la comparación posterior. En este caso, se observa que la tendencia es a la inversa respecto al caso sin esviaje: en presencia de esviaje, la fricción reduce levemente las rotaciones del tablero. Esto se puede explicar debido a que el esviaje de por sí produce rotaciones en el tablero en presencia de impactos (Kaviani et al., 2012). Sin embargo, la incorporación de la fricción en la simulación actúa como una especie de freno, el cual reduce la libre rotación del tablero debido al esviaje.

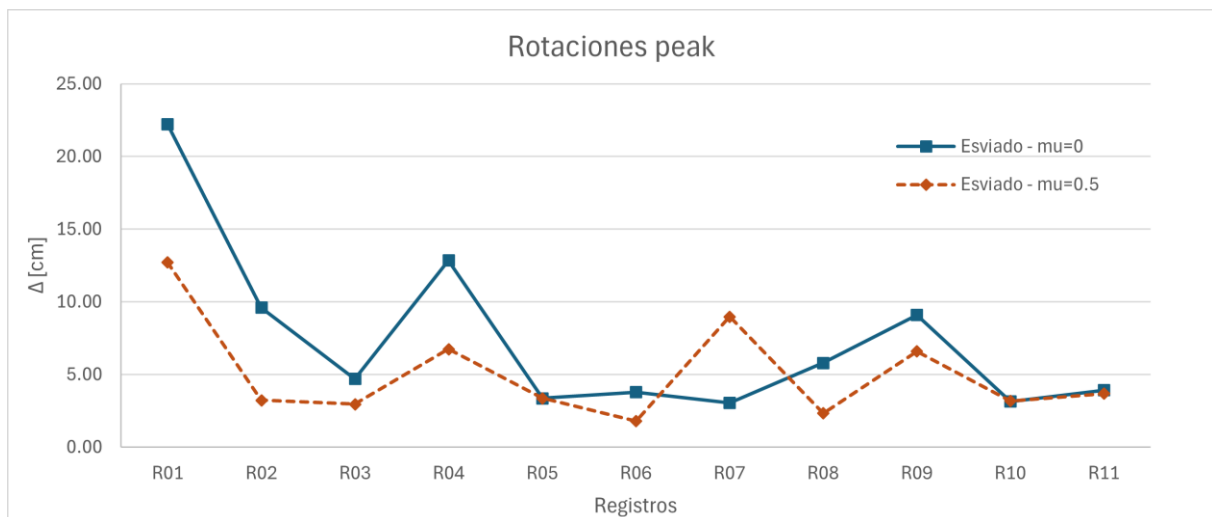


Figura 27: Rotaciones del nodo central expresada en centímetros.

En la Figura 28 se presentan los resultados correspondientes al caso con esviaje, considerando las configuraciones con y sin fricción, a partir de los valores peak de desplazamiento registrados tanto en los bordes como en el centro del tablero. Para el caso con fricción, el desplazamiento peak en los bordes se representa en color morado, mientras que el desplazamiento peak del nodo central se muestra en morado claro. En contraste, para el caso sin fricción, los desplazamientos peak en los bordes se indican en color verde oscuro, y los correspondientes al centro del tablero en verde claro.

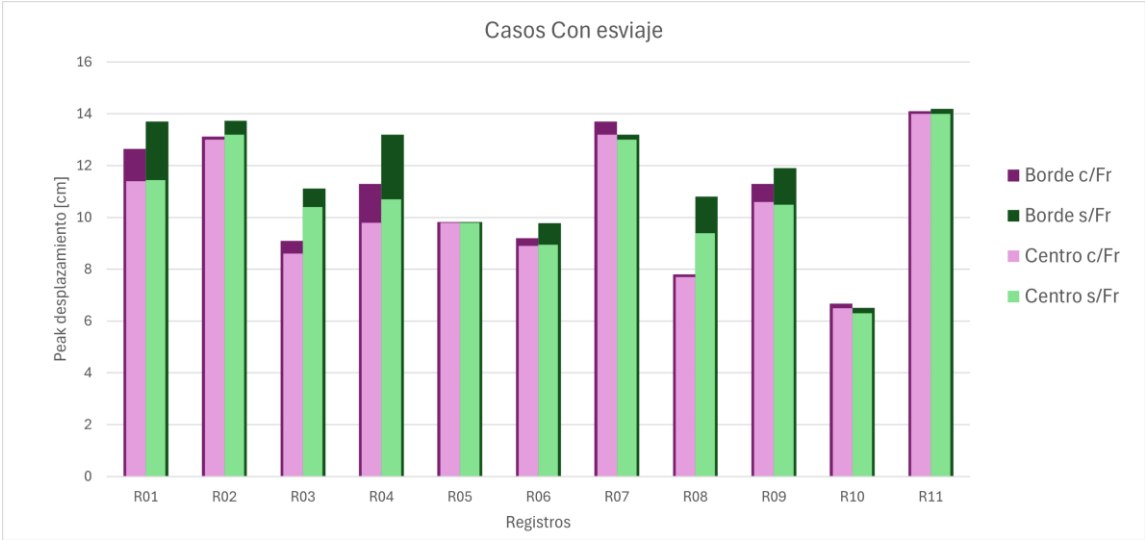


Figura 28: Grafico de barras comparando el peak de desplazamiento de borde vs el peak de desplazamiento del nodo central para el caso con esviaje.

En la Figura 29 se presenta los desplazamientos residuales de los bordes del tablero para el caso con esviaje. Los valores fueron normalizados utilizando el mismo procedimiento aplicado en el escenario sin esviaje, de modo que los resultados puedan interpretarse bajo una misma referencia porcentual.

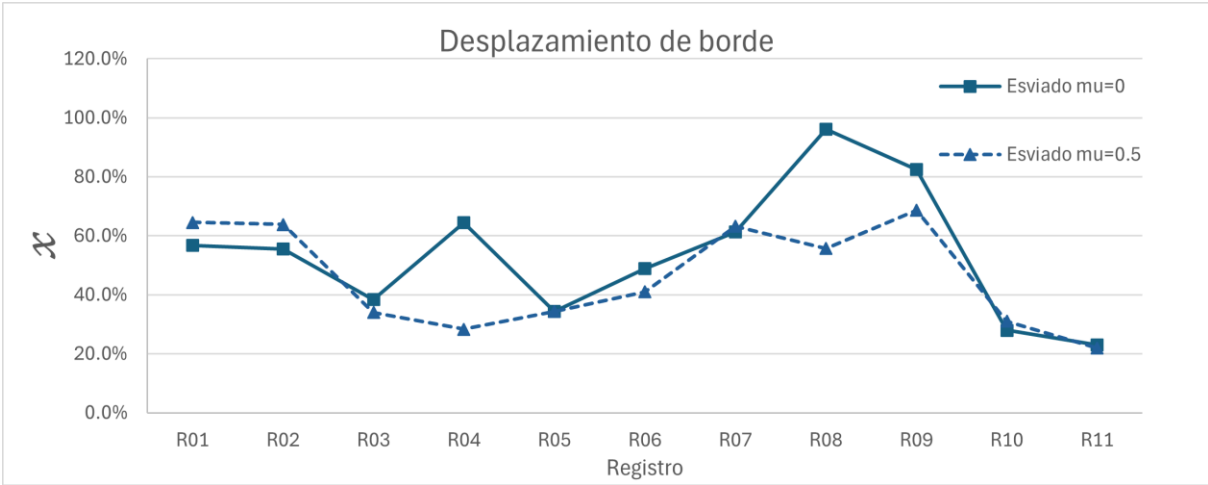


Figura 29: Desplazamiento residuales de los bordes del tablero expresada en %.

Por otra parte, según la Figura 21 y Figura 28 puede resultar tentador interpretar los desplazamientos peak del tablero como una medida directa del riesgo de colapso. Sin embargo, esta aproximación debe tomarse solo como una referencia. En algunos registros, los desplazamientos peak de borde superan los valores asociados al gap transversal dado por las llaves de corte, por lo que el tablero alcanza demandas severas. Sin embargo, el hecho de que el tablero impacte con las llaves de corte no implica necesariamente una condición de colapso. El colapso podría estar asociado a una pérdida efectiva de apoyo, particularmente cuando los desplazamientos transversales exceden la zona donde descansan los apoyos. Por lo tanto, esta comparación debe entenderse únicamente como un indicio cualitativo de la severidad de los desplazamientos y no como una estimación directa del colapso.

7 Conclusiones

En esta memoria se evaluó de forma directa cómo la fricción presente durante el impacto entre el tablero y los estribos modifica la respuesta global de un puente. Para ello se desarrolló un modelo 3D capaz de reproducir el esviaje y las condiciones reales de apoyo, y se ejecutaron 22 análisis tiempo-historia, 11 análisis para el puente esviado en 11° y los otros 11 para el puente sin esviaje. La presente memoria se enfoca principalmente en observar los cambios en la rotación del tablero según su centro de masa y en los desplazamientos transversales de los bordes del puente al comparar los casos con y sin fricción. Además, se incorpora un enfoque alternativo para simular las fuerzas de impacto en OpenSees, utilizando el elemento *FlatSliderBearing* en conjunto con el material uniaxial *HertzDamp*, con el fin de representar de forma coherente el impacto.

Es importante mencionar que cuando se hace la comparación entre el caso con y sin esviaje, ambos sin fricción que es la forma en el que generalmente se modelan los puentes, el caso sin esviaje prácticamente no presenta rotaciones, mientras que para el caso con esviaje hay rotaciones significativas, lo que es justamente lo que se espera según estudios como el de Kaviani et al (2012).

7.1 Puente sin esviaje

- En el caso sin fricción, la rotación peak del tablero es prácticamente nula en la mayoría de los registros, llegando a 4 [cm] en el escenario más desfavorable. Esto es coherente con una geometría completamente simétrica, donde no hay ningún elemento que genere rotación en el tablero. Pero cuando se incorpora la fricción el panorama cambia. Los registros donde es más evidente la diferencia son los registros R01, R02 y R04, donde la diferencia entre tener o no fricción es realmente significativa. En el registro R01, por ejemplo, la rotación pasa de 1 [cm] sin fricción a 14 [cm] con fricción, en el registro R02 aumenta de 2 a 7 [cm] y en el registro R04 crece desde 2 a 8.1 [cm] para el caso con fricción. Estas diferencias dejan en evidencia que la componente de fricción durante el impacto induce rotaciones que no aparecen en el caso sin fricción.
- Para los desplazamientos residuales se observan comportamientos variados debido al acoplamiento entre traslación y rotación, lo que dificulta identificar una tendencia uniforme. Aun así, en los registros R01, R04, R06, R08 y R11 se evidencia consistentemente que el caso con fricción presenta deformaciones residuales mayores que el caso sin fricción. Por ejemplo, en el registro R01 el residual alcanza un 67% del peak de deformación cuando se incorpora la fricción, frente a un 4.5% sin fricción. De manera similar, los registros R04 (64.5% vs 22.8%), R06 (41% vs 38%), R08 (57.5% vs 44%), y R11 (25.4% vs 19%), muestran incrementos relevantes. Estas diferencias refuerzan que, en situaciones donde la rotación participa activamente, la fricción puede amplificar el desplazamiento residual de los bordes del tablero.

7.2 Puente con un ángulo de esviaje de 11°

- En este caso los resultados difieren de lo observado en la configuración anterior. Tal como se aprecia en la Figura 27, para el escenario sin fricción se obtiene una rotación mayor del tablero en comparación con el caso con fricción. Esto indica que, al existir esviaje la propia geometría ya induce una rotación significativa y que la fricción tiende a reducirla en lugar de amplificarla, como ocurría en el modelo sin esviaje.
- En el caso de los desplazamientos, los resultados muestran un comportamiento similar al observado en la configuración sin esviaje. Tal como se aprecia en la Figura 29, para los registros R01, R02 y R10 se obtiene un mayor desplazamiento de borde en el caso con fricción, mientras que para los registros R03, R04, R06, R09 y R11 el mayor desplazamiento ocurre en el caso sin fricción. Debido a esta variabilidad, comparar ambos escenarios resulta menos claro, tal como se mencionó anteriormente, se acoplan los efectos de traslación y rotación del centro de masa, dificultando identificar una tendencia.

En el presente estudio, los resultados muestran que la fricción puede modificar de forma significativa la rotación del tablero. En la configuración sin esviaje, la fricción es capaz de inducir rotaciones que prácticamente no existen cuando el impacto es solo en una dirección, mientras que con esviaje ocurre lo contrario, la geometría por sí sola genera la mayor parte de la rotación y la fricción tiende a disminuirla. Los desplazamientos residuales presentan un comportamiento más variable por el acoplamiento entre traslación y rotación, pero aun así siguen, en términos generales, estas mismas tendencias. En general, los resultados evidencian que el efecto de la fricción depende de la geometría del puente y puede generar respuestas muy distintas dependiendo la configuración. Este estudio sirve como referencia de cómo puede influir la fricción en este tipo de estructuras, entendiendo que su efecto final siempre dependerá de las características particulares de cada puente.

8 Referencias bibliográficas

- Aldea, S., Bazaez, R., Astroza, R., & Hernandez, F. (2021a). Seismic fragility assessment of Chilean skewed highway bridges. *Engineering Structures*, 249, 113300. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113300>
- Aldea, S., Bazaez, R., Astroza, R., & Hernandez, F. (2021b). Seismic fragility assessment of Chilean skewed highway bridges. *Engineering Structures*, 249, 113300. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113300>
- Bi, K., & Hao, H. (2013). Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions. *Engineering Structures*, 46, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.012>
- Buckle, I., Hube, M., Chen, G., Yen, W.-H., & Arias, J. (2012). Structural Performance of Bridges in the Offshore Maule Earthquake of 27 February 2010. *Earthquake Spectra*, 28(1_suppl1), 533–552. <https://doi.org/10.1193/1.4000031>
- Claudio sepulveda. (n.d.). *Seismic Performance of Isolated Bridges Under Beyond Design Basis Shaking*.
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (2008). Role of Shear Keys in Seismic Behavior of Bridges Crossing Fault-Rupture Zones. *Journal of Bridge Engineering*, 13(4), 398–408. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:4\(398\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:4(398))
- Green, T., Yazdani, N., Spainhour, L., & Cai, C. S. (2001). Effect of Bearing Stiffness and Skew Angle on Performance of Precast Concrete Bridge. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1770(1), 27–33. <https://doi.org/10.3141/1770-04>
- Guo, A., Li, Z., Li, H., & Ou, J. (2009). Experimental and analytical study on pounding reduction of base-isolated highway bridges using MR dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(11), 1307–1333. <https://doi.org/10.1002/eqe.903>
- Hughes, P. J., & Mosqueda, G. (2020). Evaluation of uniaxial contact models for moat wall pounding simulations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(12), 1197–1215. <https://doi.org/10.1002/eqe.3285>
- Jankowski, R. (2005). Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(6), 595–611. <https://doi.org/10.1002/eqe.434>
- Kaviani, P., Zareian, F., & Taciroglu, E. (2012). Seismic behavior of reinforced concrete bridges with skew-angled seat-type abutments. *Engineering Structures*, 45, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.013>
- Kawashima, K., Unjoh, S., Hoshikuma, J.-I., & Kosa, K. (2011). Damage of Bridges due to the 2010 Maule, Chile, Earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(7), 1036–1068. <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.575531>
- Martínez, A., Hube, M. A., & Rollins, K. M. (2017a). Analytical fragility curves for non-skewed highway bridges in Chile. *Engineering Structures*, 141, 530–542. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.041>
- Martínez, A., Hube, M. A., & Rollins, K. M. (2017b). Analytical fragility curves for non-skewed highway bridges in Chile. *Engineering Structures*, 141, 530–542. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.041>
- McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2010). Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(1), 95–107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000002](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000002)

- Miari, M., Choong, K. K., & Jankowski, R. (2021). Seismic Pounding Between Bridge Segments: A State-of-the-Art Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(2), 495–504. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09389-x>
- Muthukumar, S., & DesRoches, R. (2006). A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(7), 811–828. <https://doi.org/10.1002/eqe.557>
- Pant, D. R., & Wijeyewickrema, A. C. (2014). Performance of base-isolated reinforced concrete buildings under bidirectional seismic excitation considering pounding with retaining walls including friction effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(10), 1521–1541. <https://doi.org/10.1002/eqe.2409>
- Rodrigo Andrés González Muñoz. (2025). *ESTUDIO DEL IMPACTO ENTRE ESTRUCTURAS CON AISLACIÓN SÍSMICA Y EL MURO DE CONTENCIÓN CONSIDERANDO LAS COMPONENTES DE FUERZA LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Saiidi, M. S., Vosooghi, A., & Nelson, R. B. (2013). Shake-Table Studies of a Four-Span Reinforced Concrete Bridge. *Journal of Structural Engineering*, 139(8), 1352–1361. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000790](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000790)
- Schanack, F., Valdebenito, G., & Alvia, J. (2012). Seismic Damage to Bridges during the 27 February 2010 Magnitude 8.8 Chile Earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(1), 301–315. <https://doi.org/10.1193/1.3672424>
- Shi, Z., & Dimitrakopoulos, E. G. (2017). Comparative evaluation of two simulation approaches of deck-abutment pounding in bridges. *Engineering Structures*, 148, 541–551. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.077>
- Steelman, J. S., Fahnstock, L. A., Filipov, E. T., LaFave, J. M., Hajjar, J. F., & Foutch, D. A. (2013). Shear and Friction Response of Nonseismic Laminated Elastomeric Bridge Bearings Subject to Seismic Demands. *Journal of Bridge Engineering*, 18(7), 612–623. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000406](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000406)
- Wilches, J., Santa Maria, H., Leon, R., Riddell, R., Hube, M., & Arrate, C. (2021). Evolution of seismic design codes of highway bridges in Chile. *Earthquake Spectra*, 37(3), 2174–2204. <https://doi.org/10.1177/8755293020988011>
- Yang, Z., Kun, C., & Chouw, N. (2019). Experimental Evaluation of the Seismic Response of Skewed Bridges with Emphasis on Poundings between Girder and Abutments. *Shock and Vibration*, 2019(1). <https://doi.org/10.1155/2019/4069817>

9 Anexos

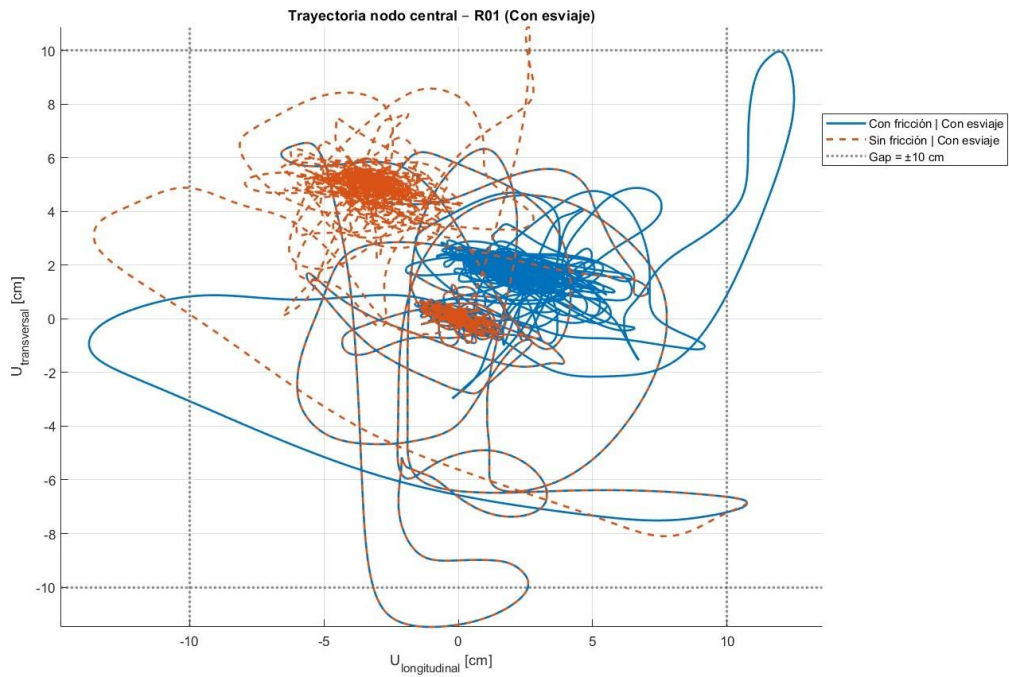


Figura 30: Trayectoria del tablero para el registro R01.

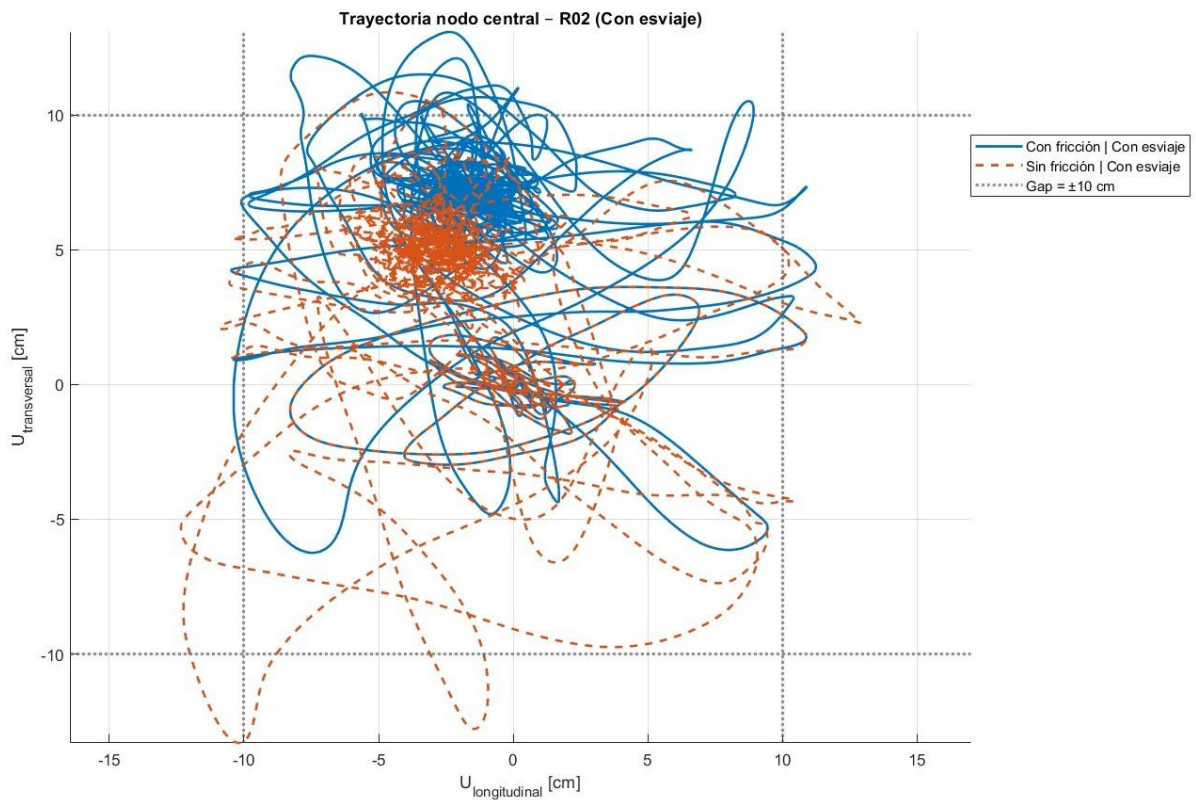


Figura 31: Trayectoria del tablero para el registro R02.

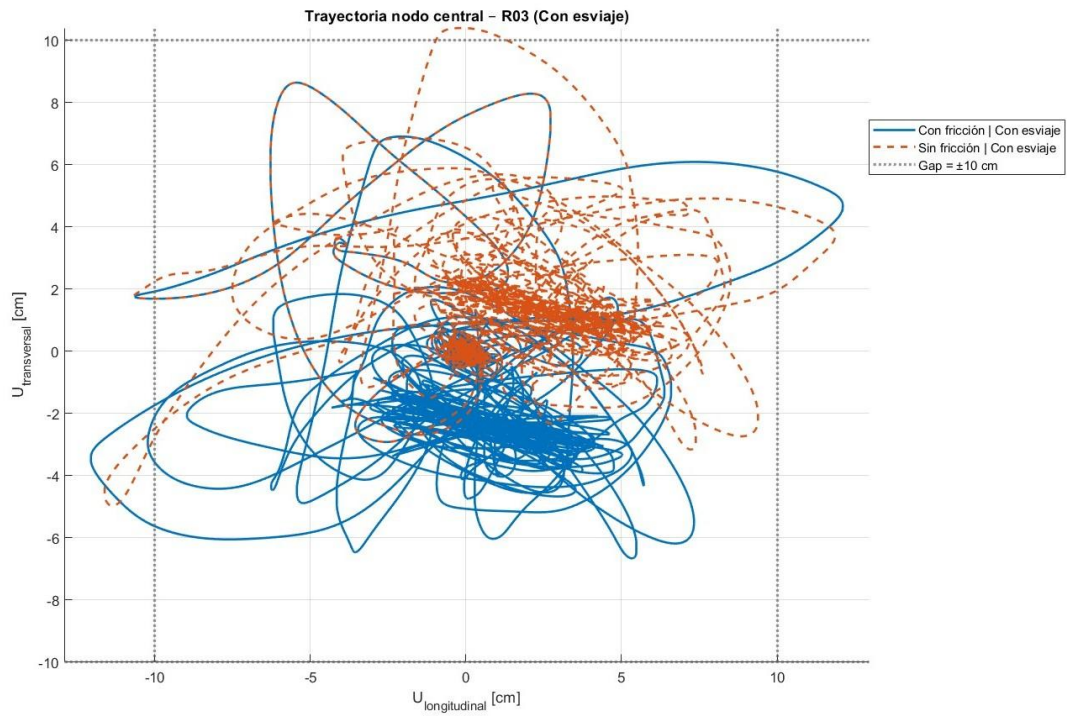


Figura 32: Trayectoria del tablero para el registro R03.

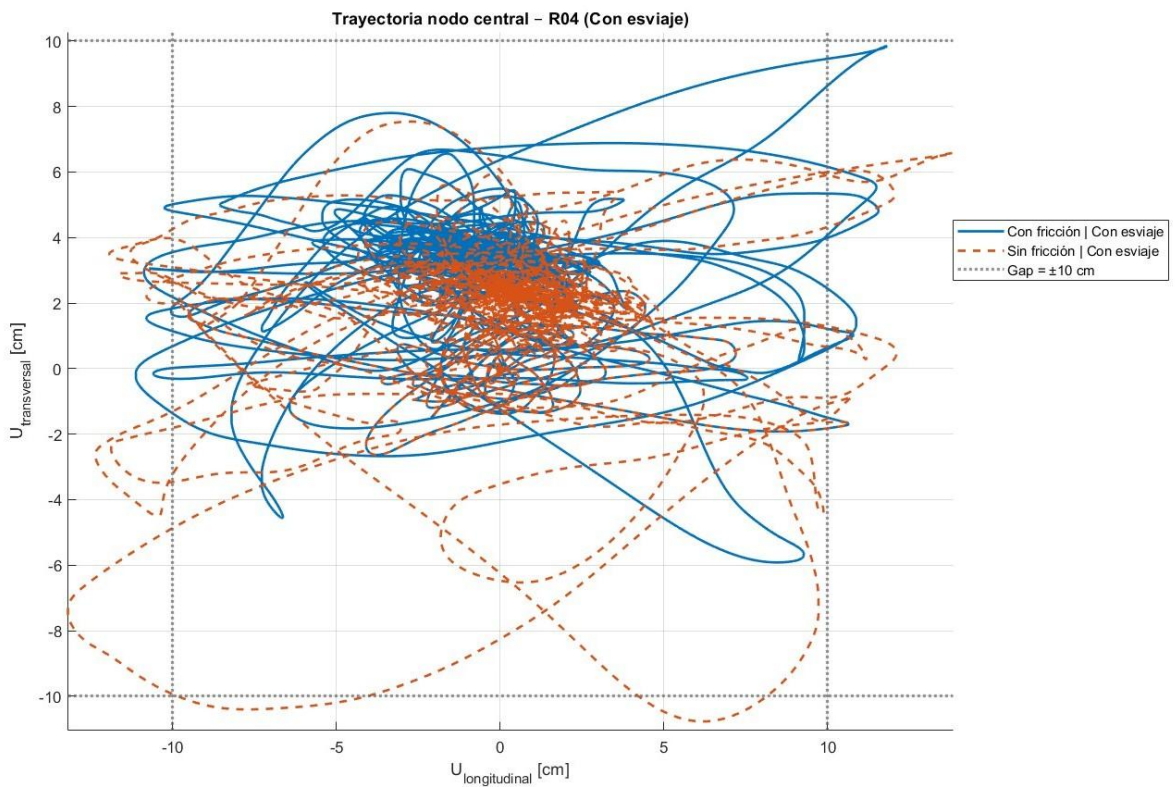


Figura 33: Trayectoria del tablero para el registro R04.

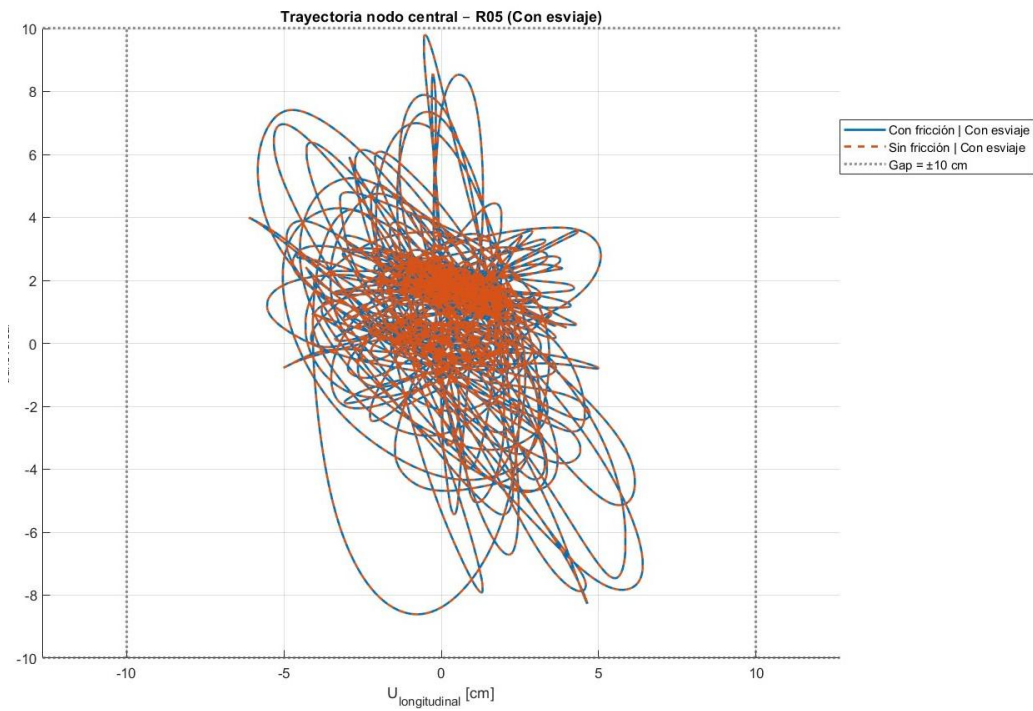


Figura 34: Trayectoria del tablero para el registro R05.

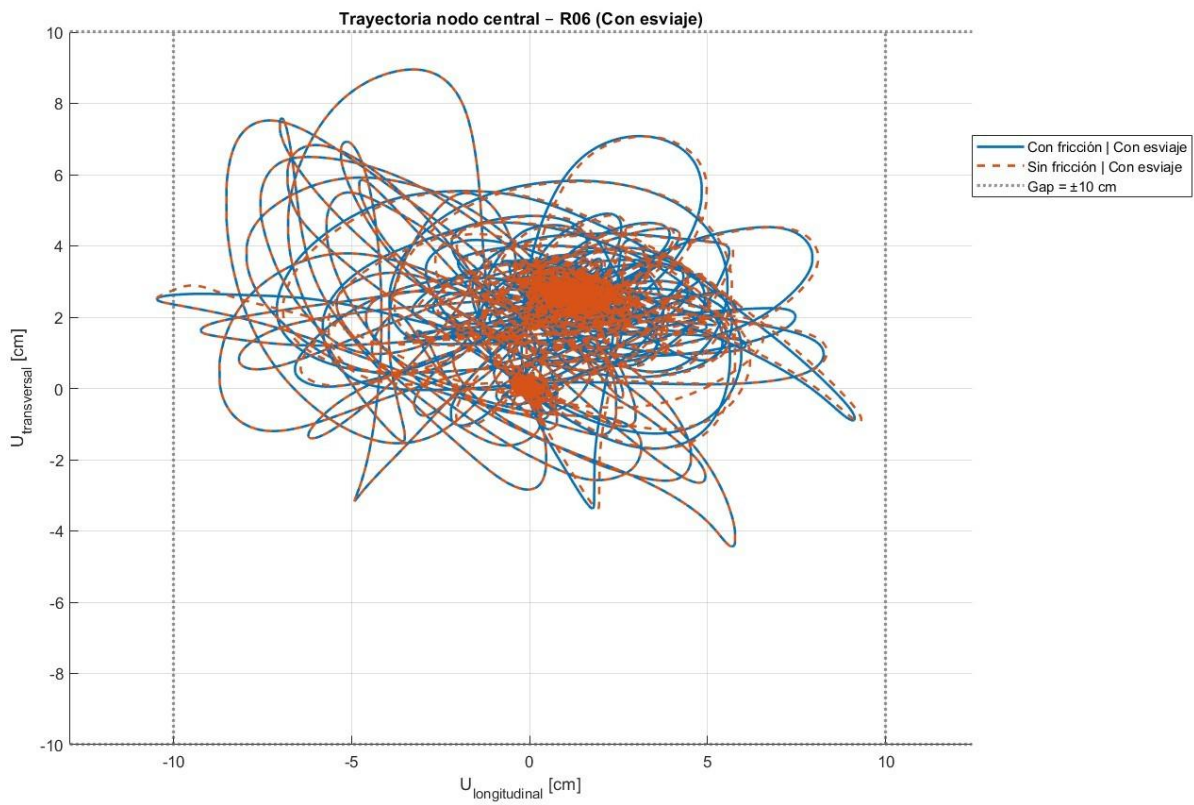


Figura 35: Trayectoria del tablero para el registro R06.

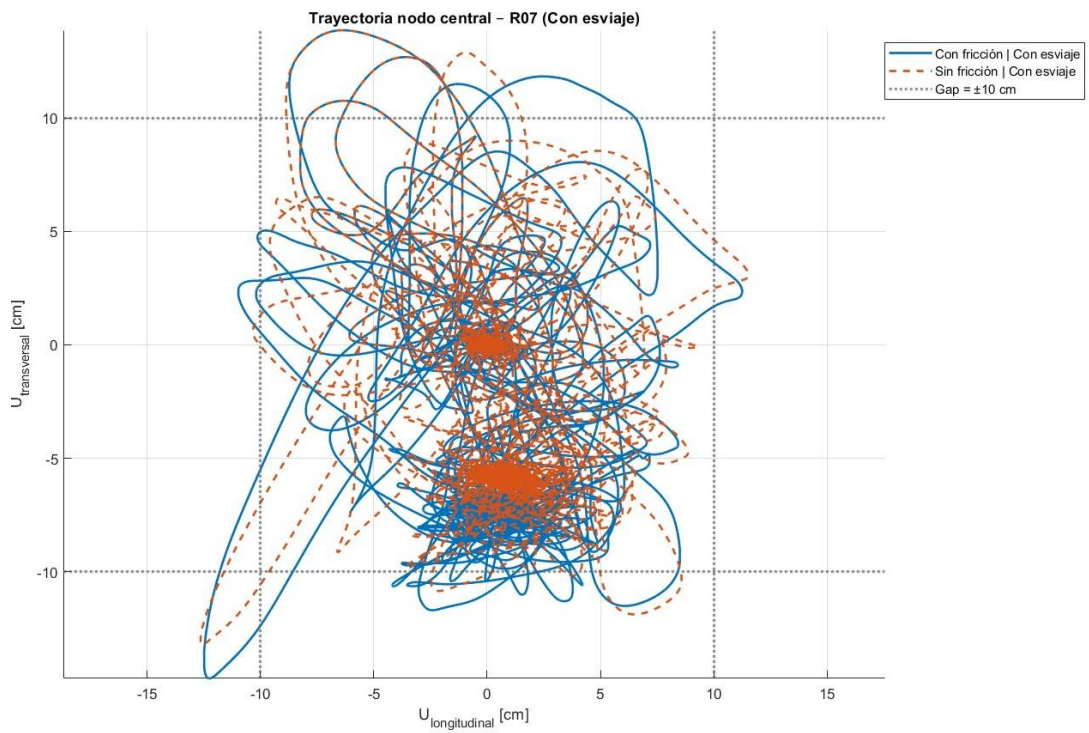


Figura 36: Trayectoria del tablero para el registro R07.

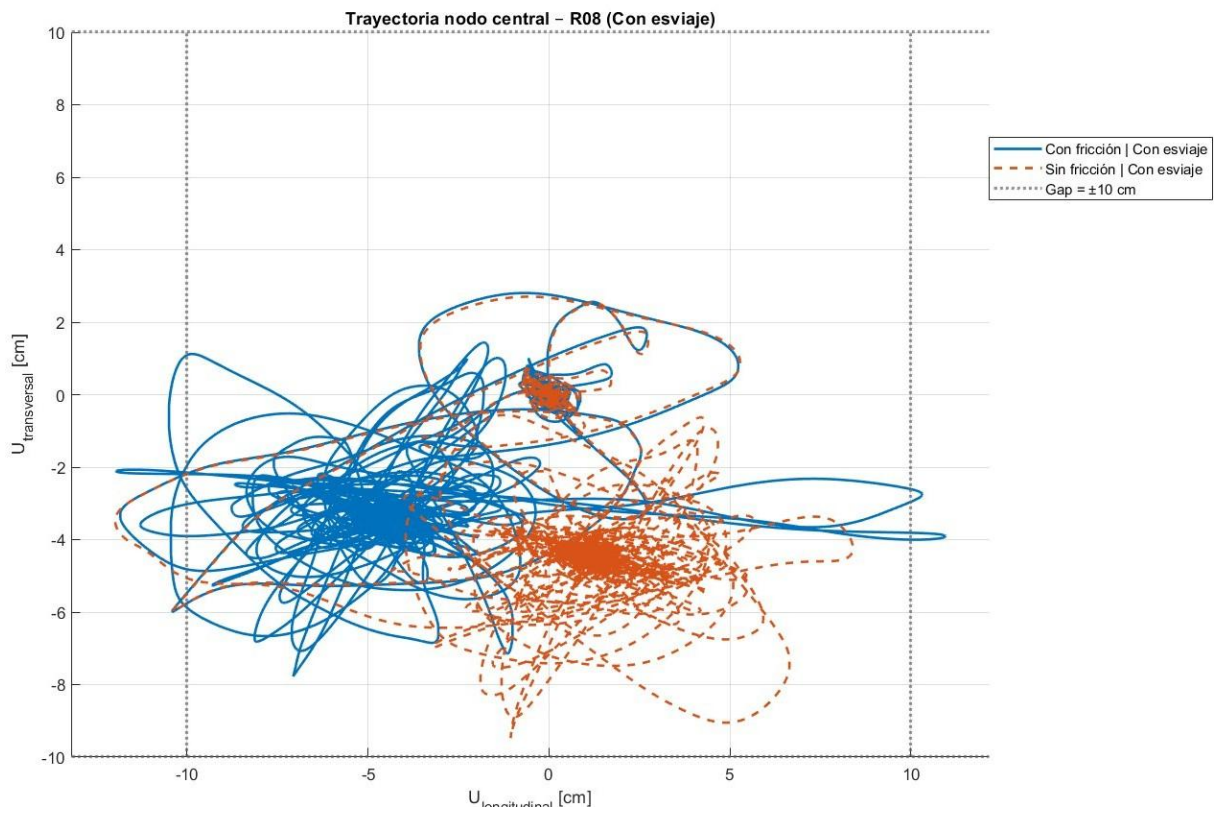


Figura 37: Trayectoria del tablero para el registro R08.

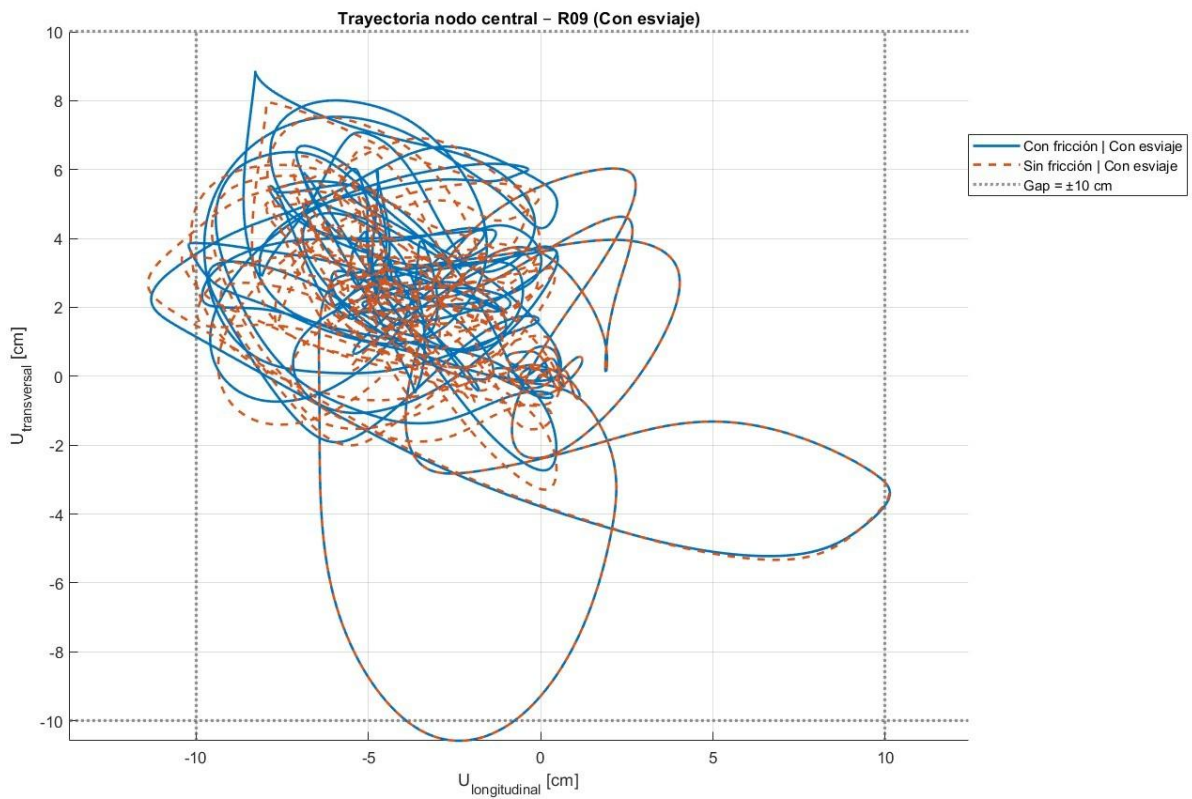


Figura 38: Trayectoria del tablero para el registro R09.

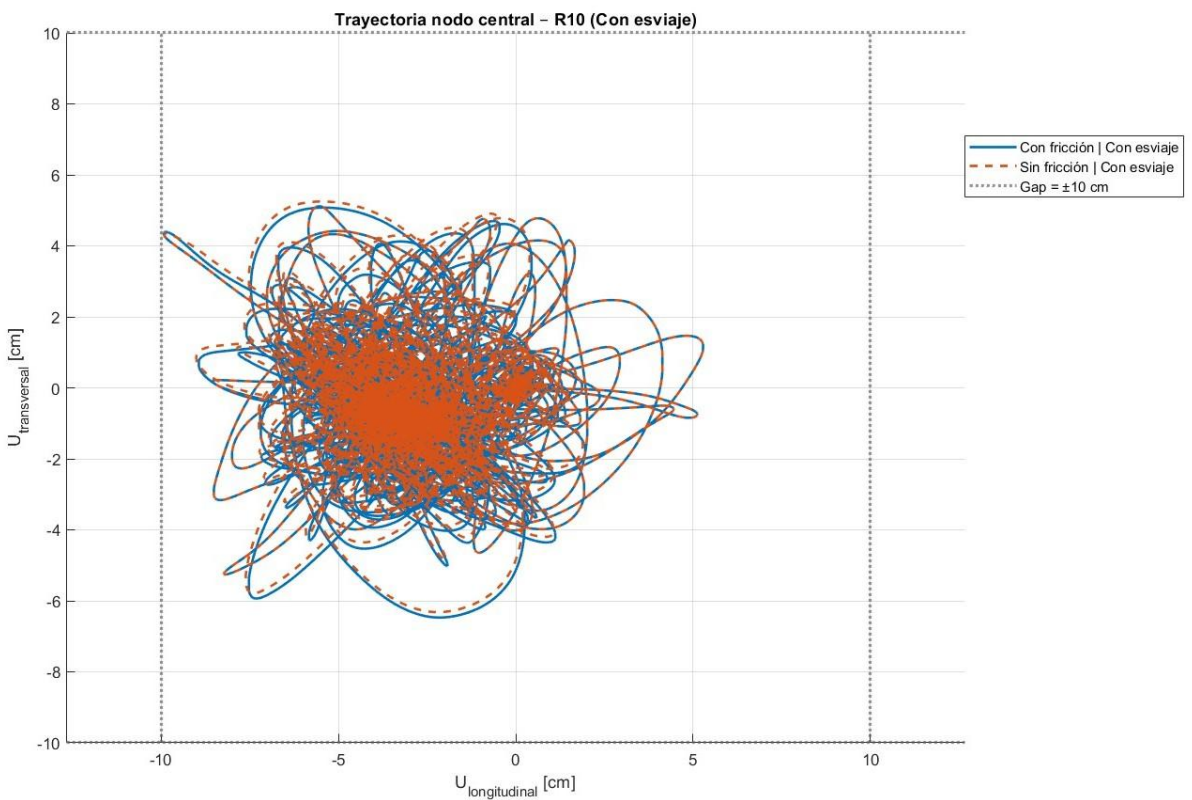


Figura 39: Trayectoria del tablero para el registro R10.

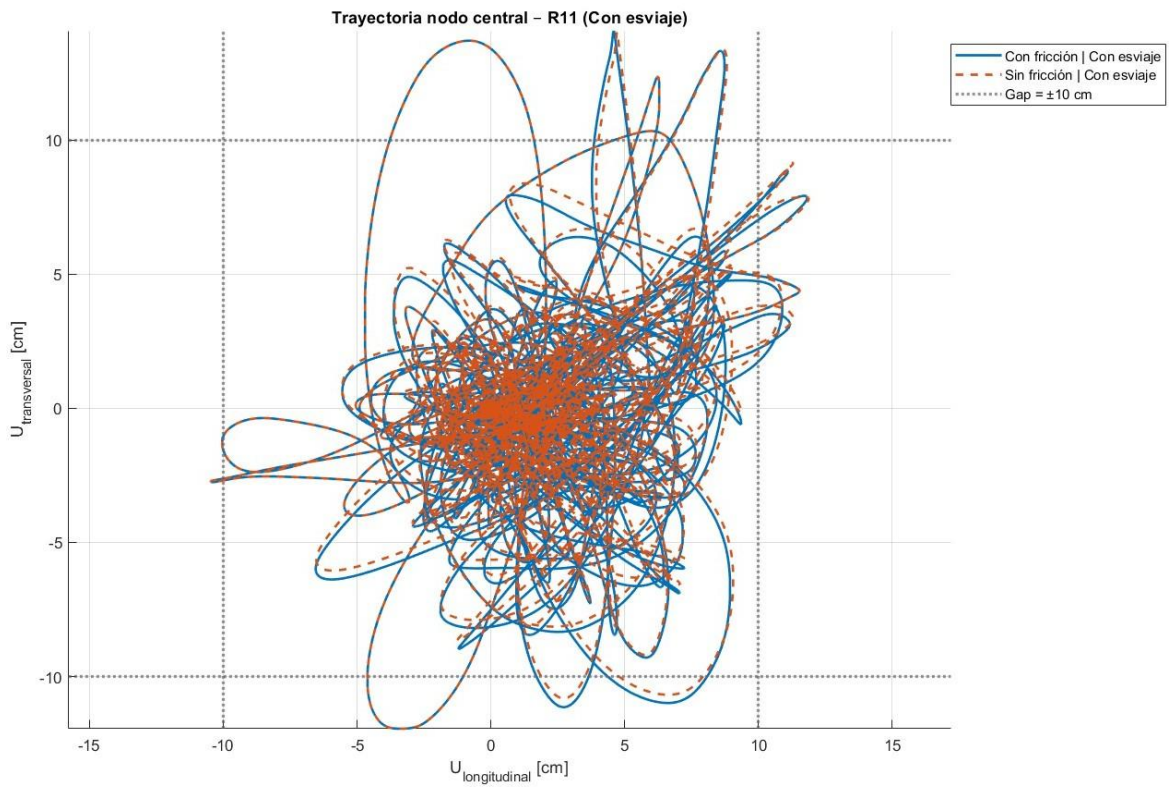


Figura 40: Trayectoria del tablero para el registro R11.

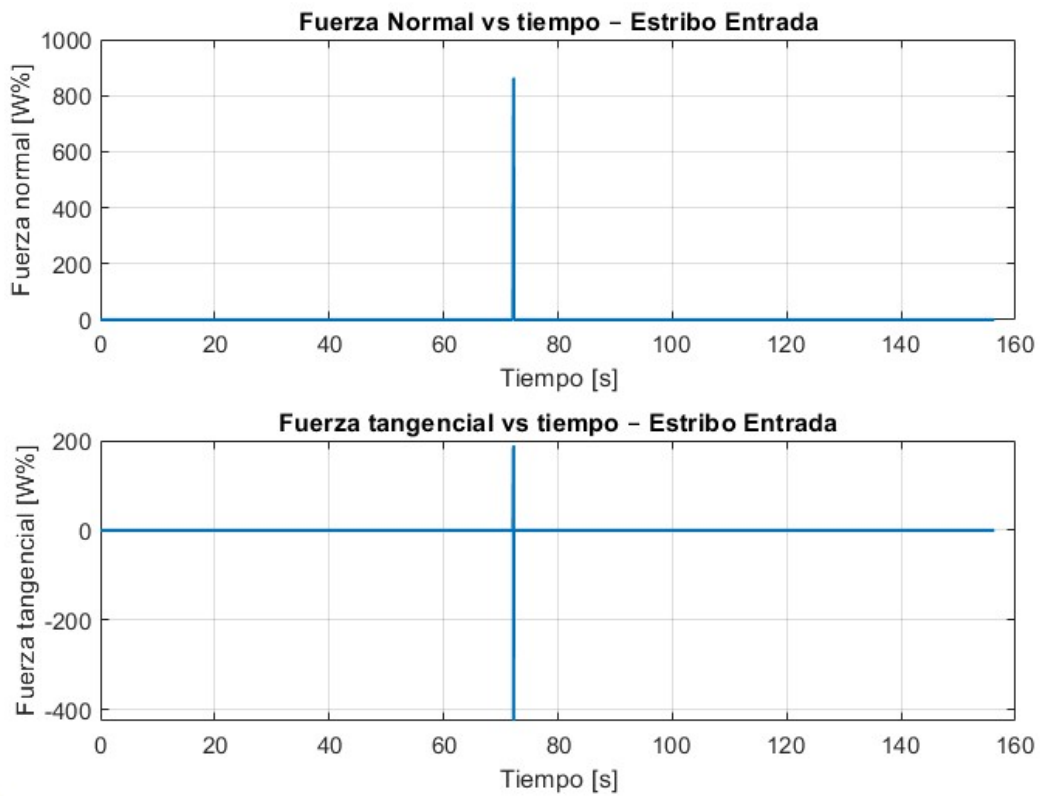


Figura 41: Impacto con esviate y fricción en el estribo de entrada para el registro R01.

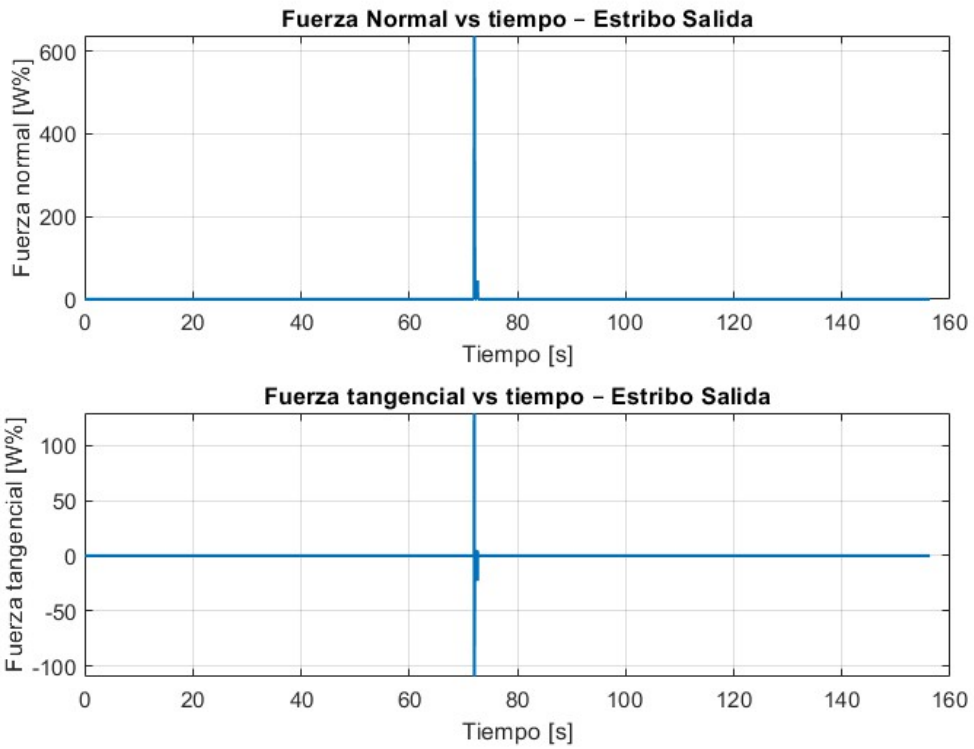


Figura 42: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R01.

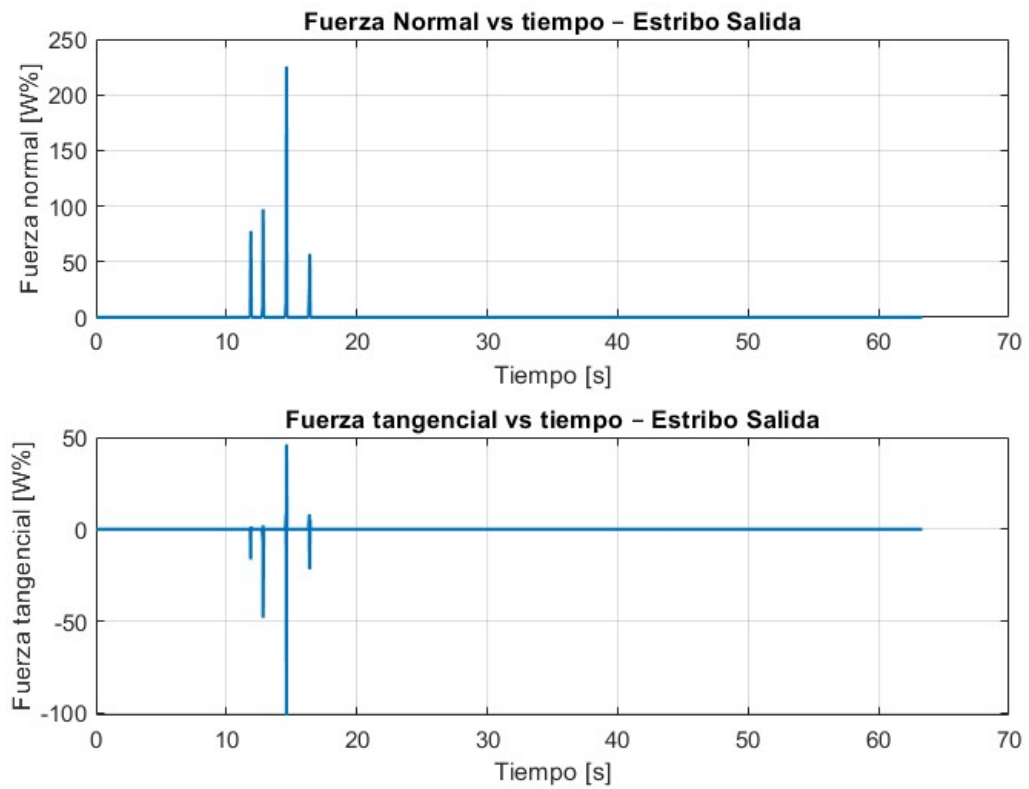


Figura 43: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R02.

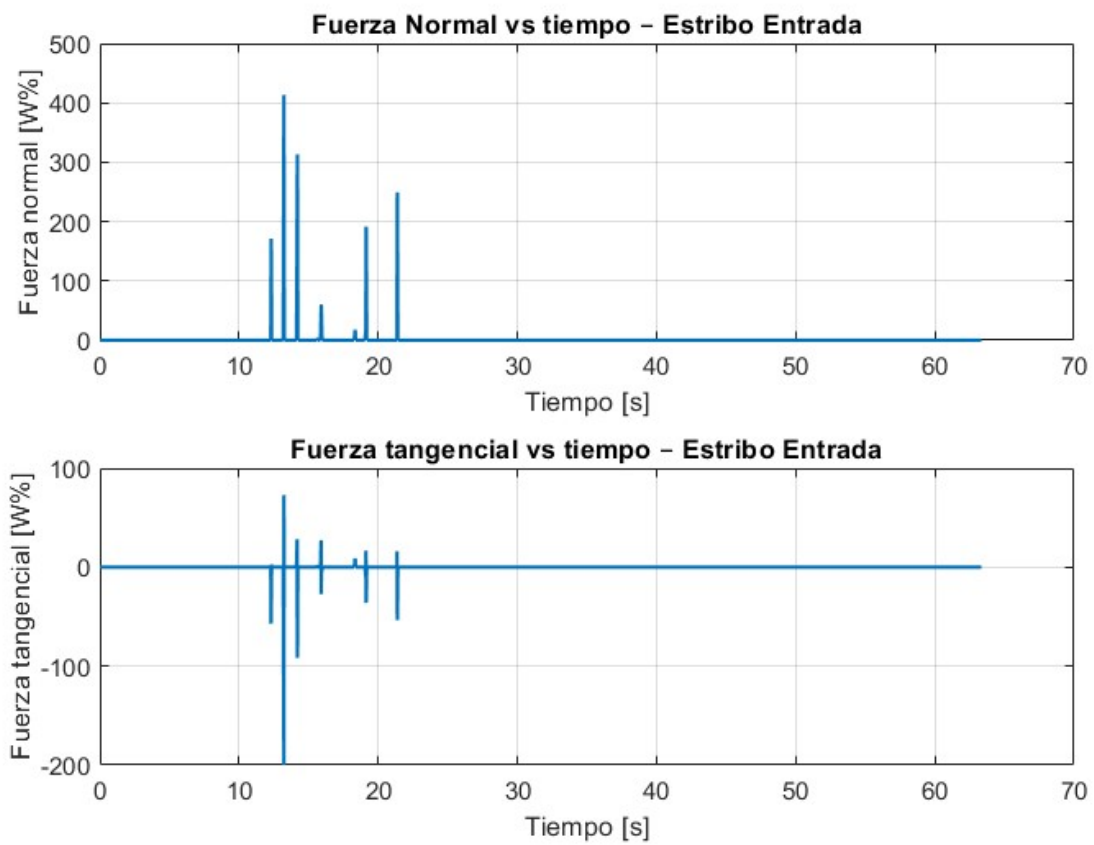


Figura 44: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R02.

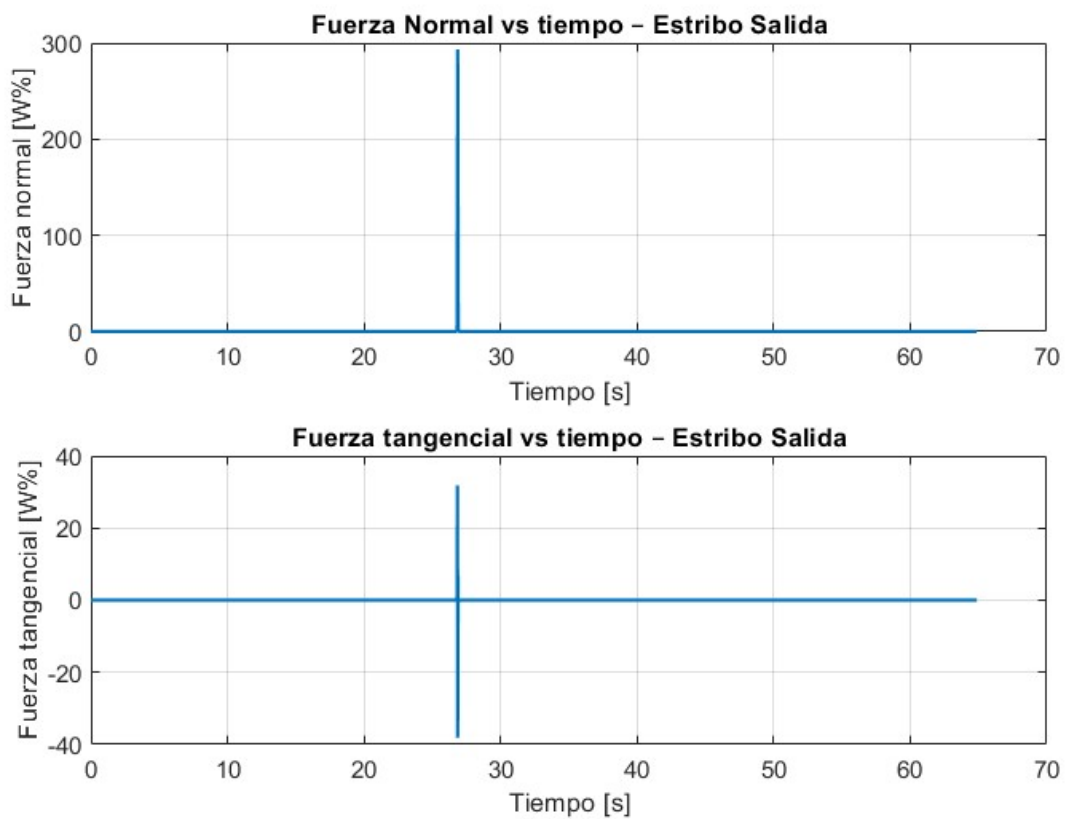


Figura 45: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R03.

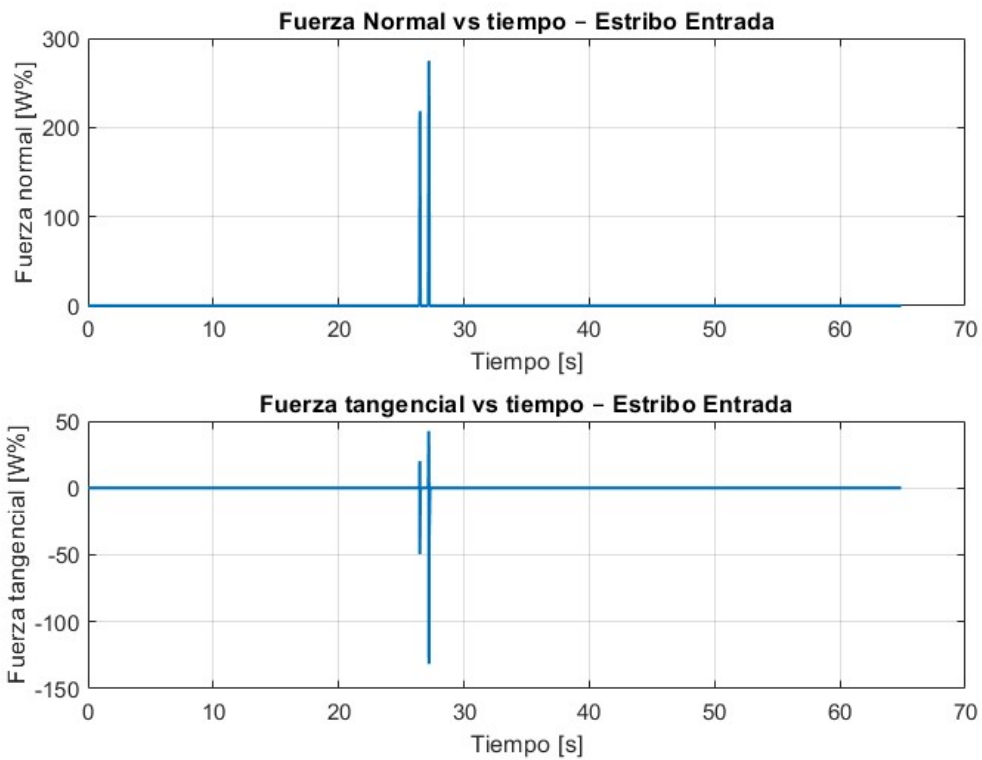


Figura 46: Impacto con esvaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R03.

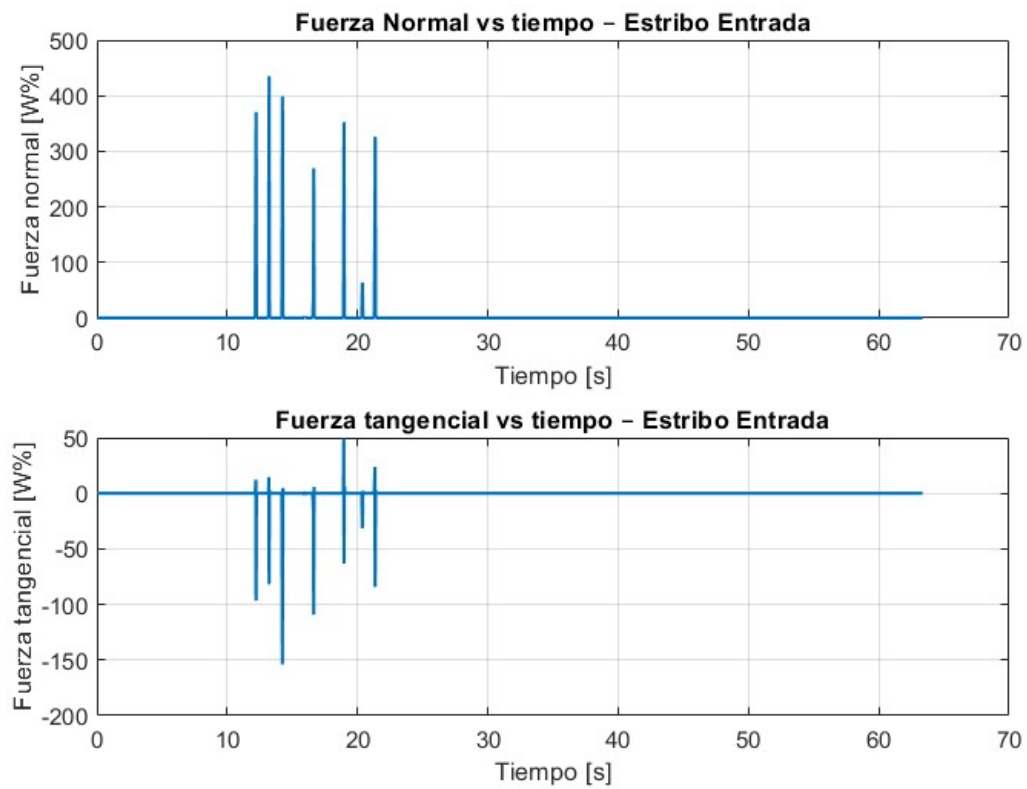


Figura 47: Impacto con esvaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R04.

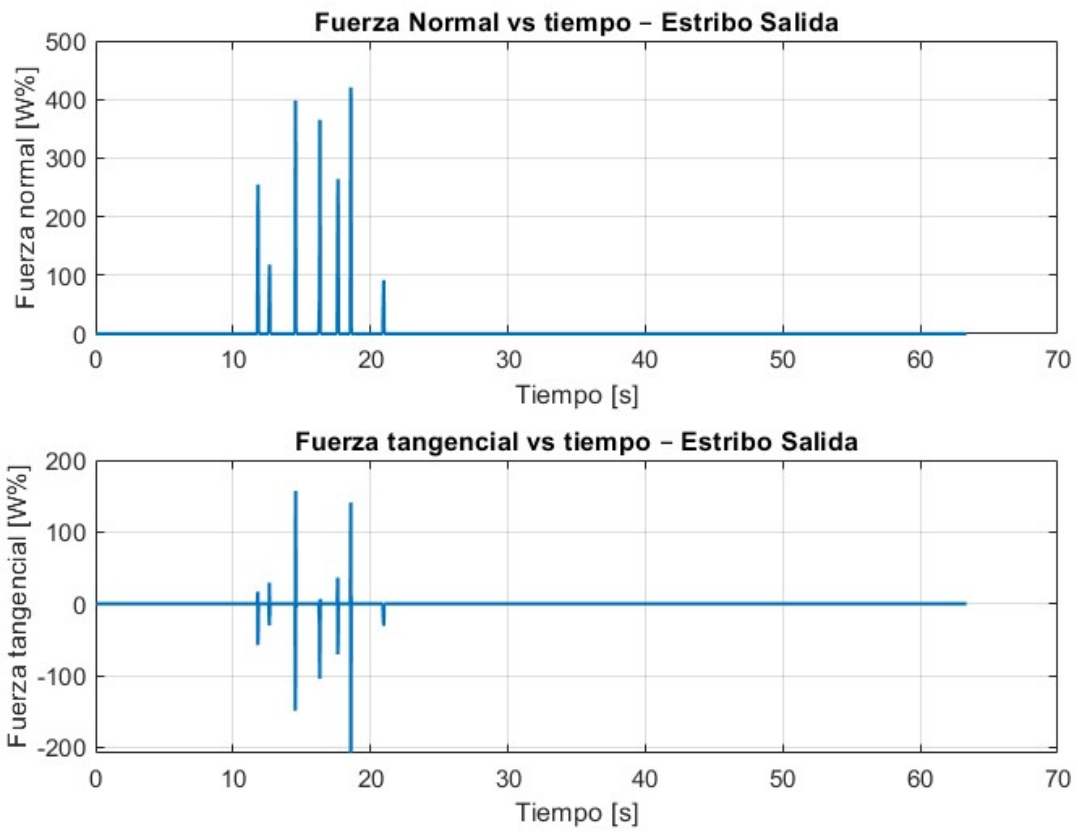


Figura 48: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R04.

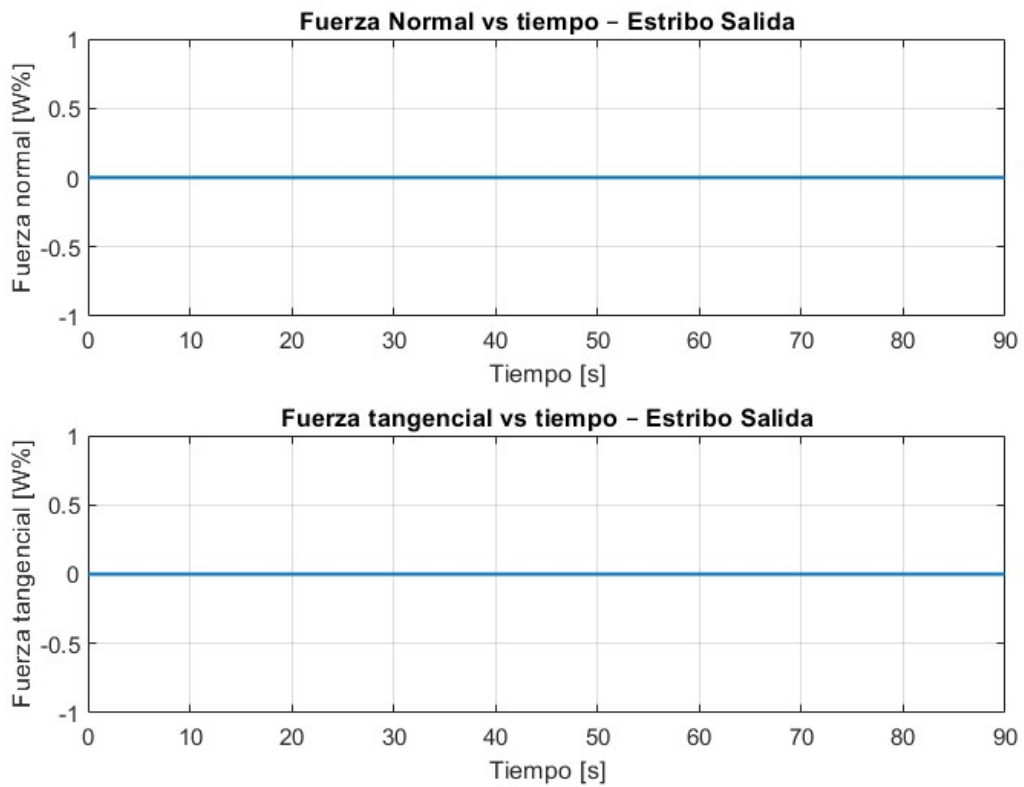


Figura 49: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R05.

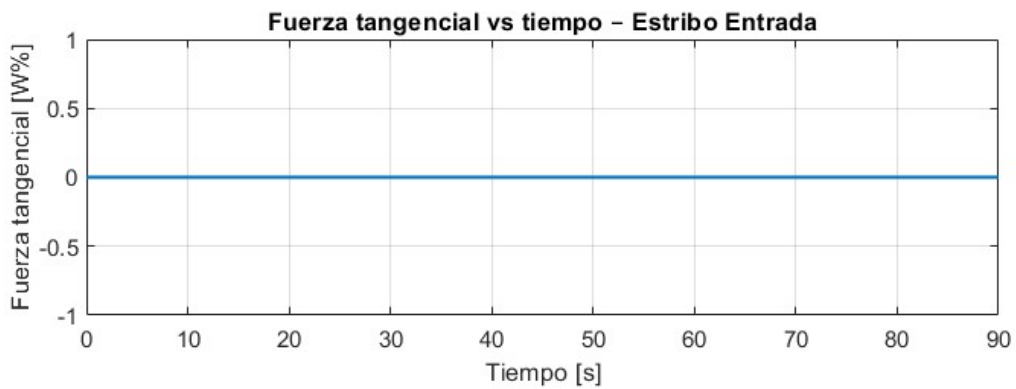
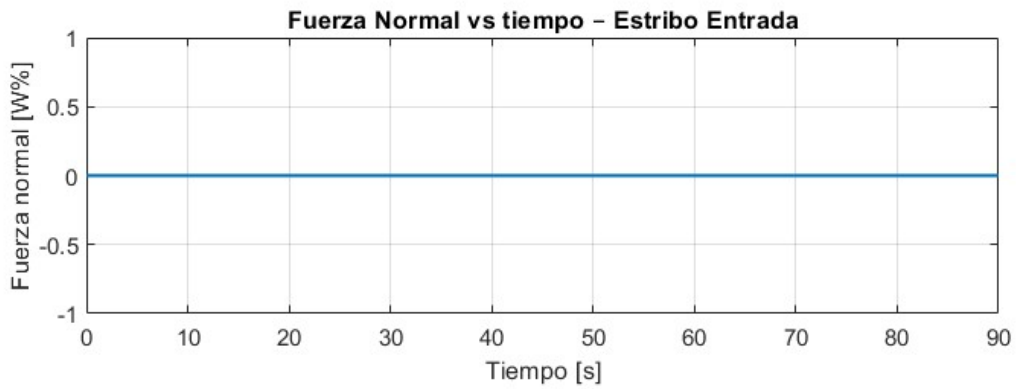


Figura 50: Impacto con esviate y fricción en el estribo de entrada para el registro R05.

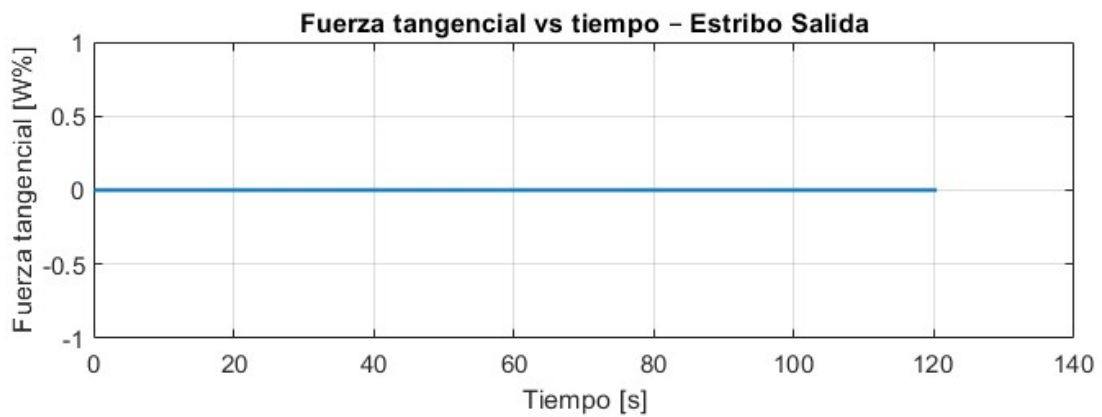
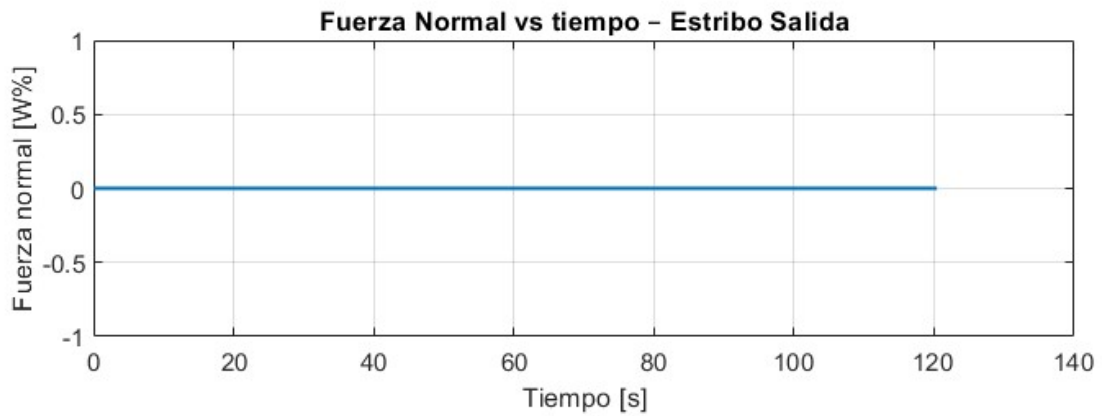


Figura 51: Impacto con esviate y fricción en el estribo de salida para el registro R06.

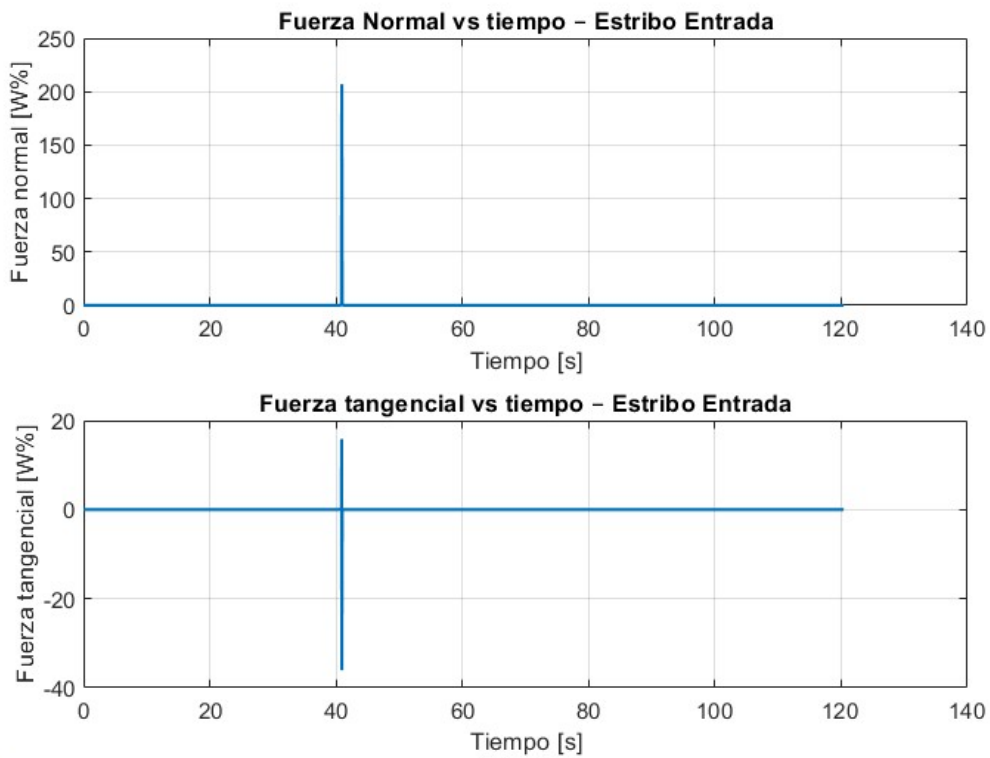


Figura 52: Impacto con esviate y fricción en el estribo de entrada para el registro R06.

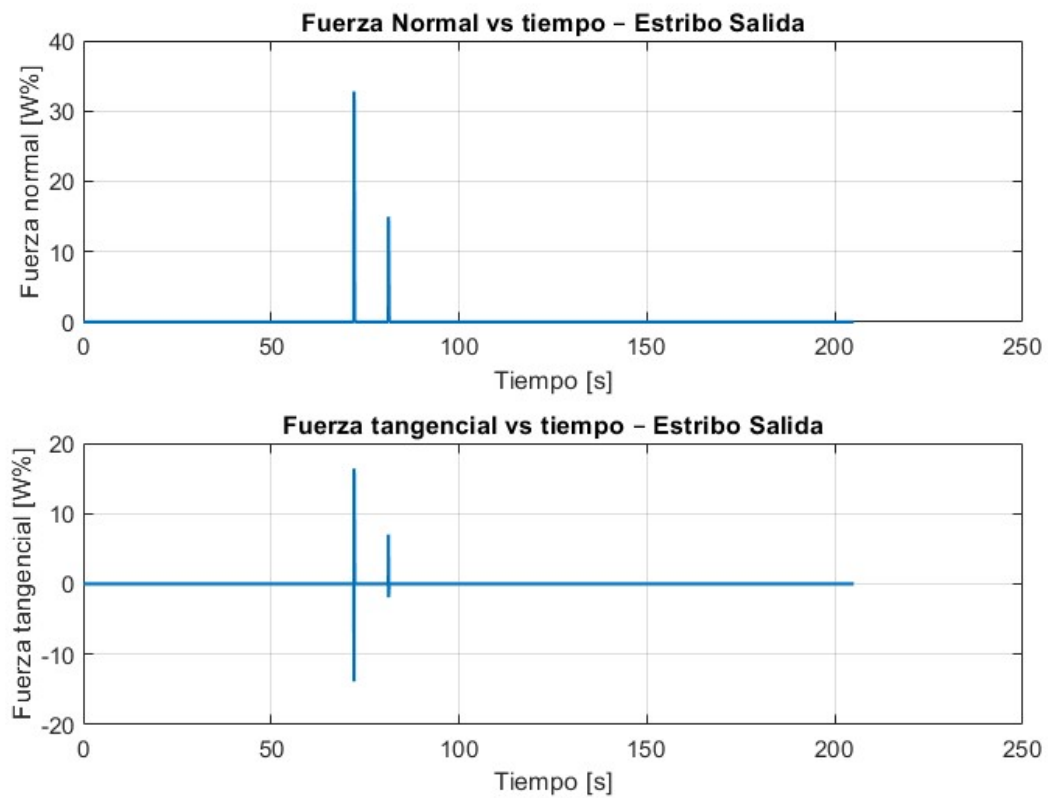


Figura 53: Impacto con esviate y fricción en el estribo de salida para el registro R07.

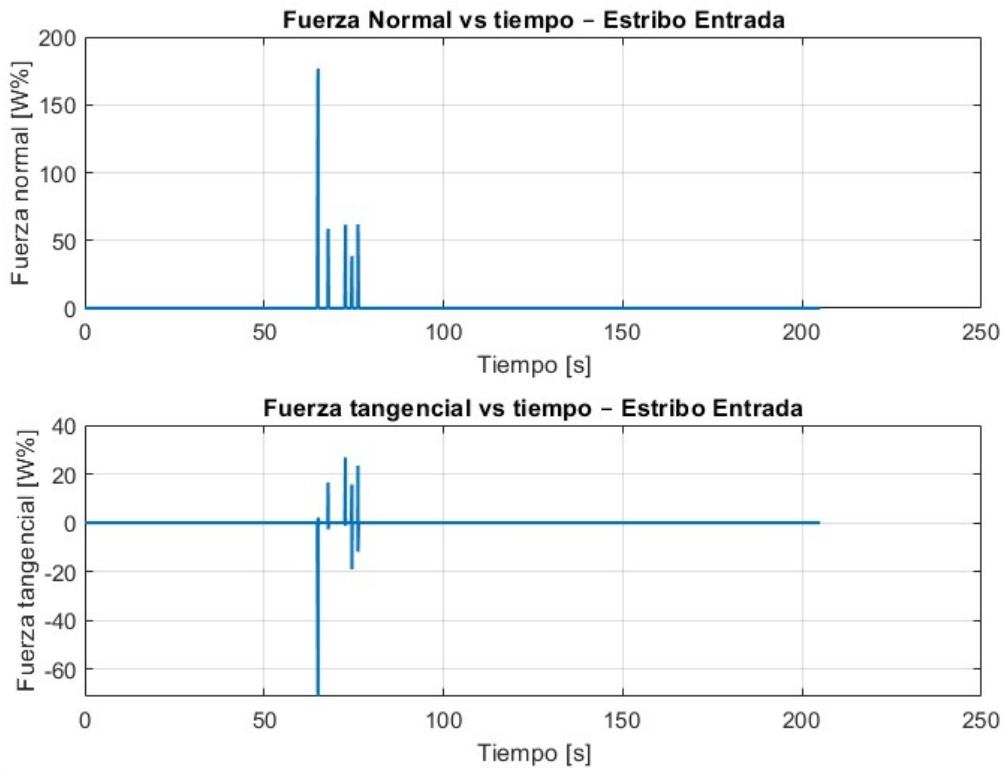


Figura 54: Impacto con esviate y fricción en el estribo de entrada para el registro R07.

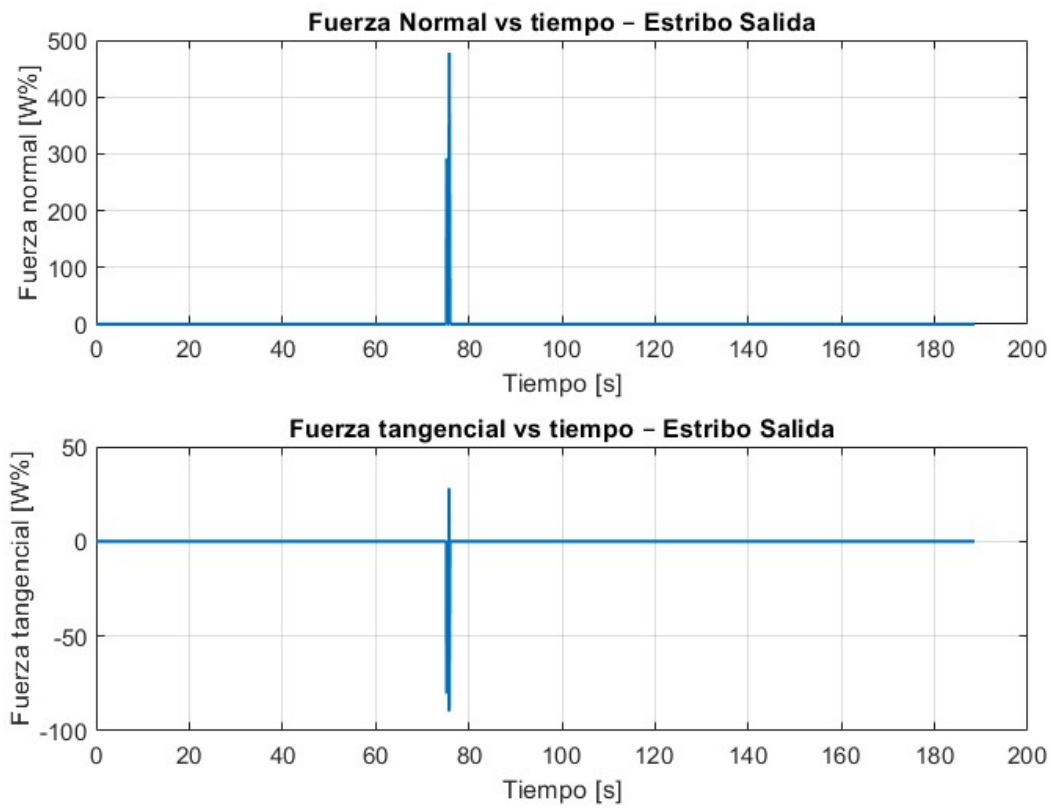


Figura 55: Impacto con esviate y fricción en el estribo de salida para el registro R08.

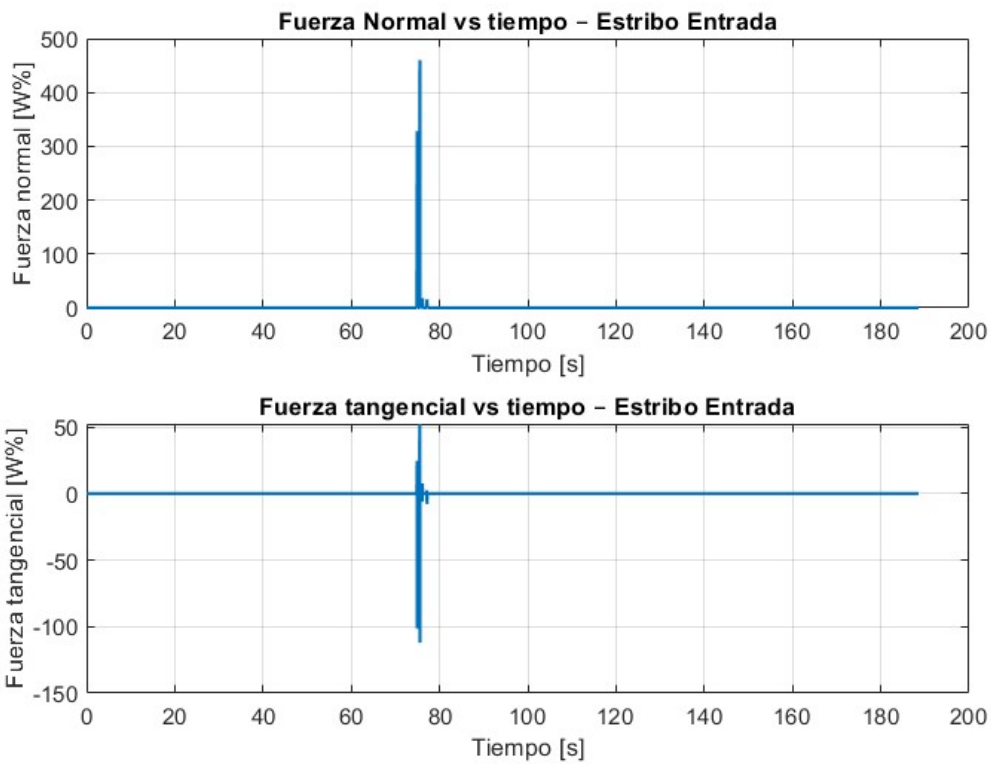


Figura 56: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R08.

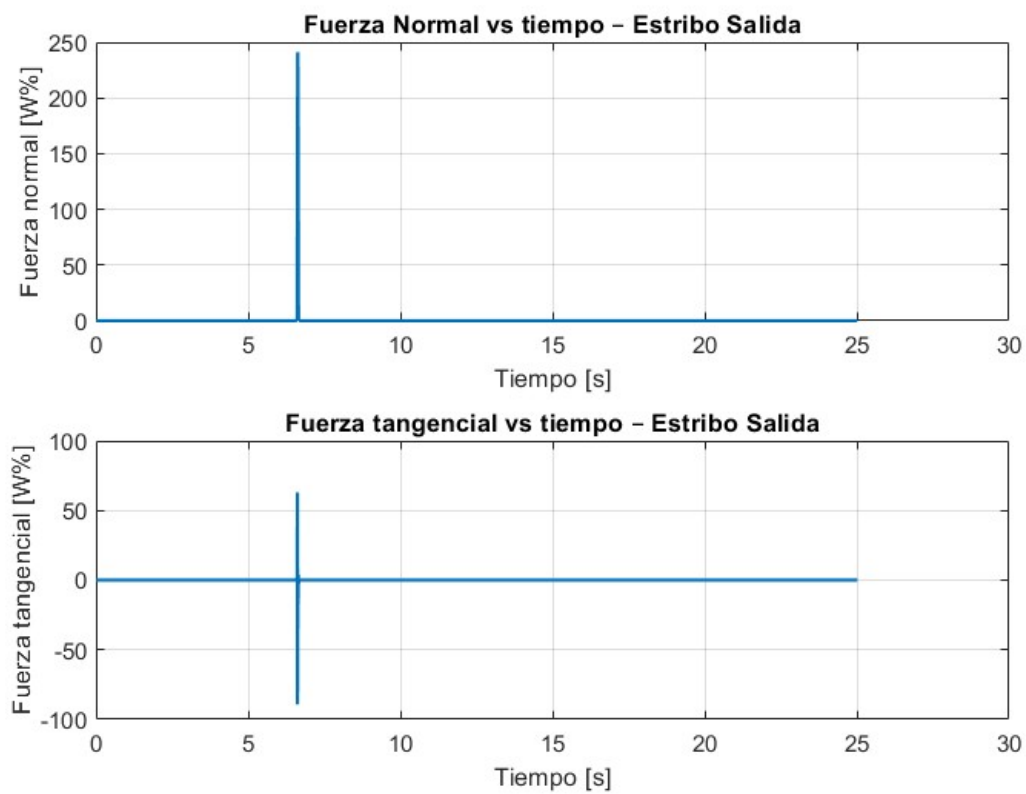


Figura 57: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R09.

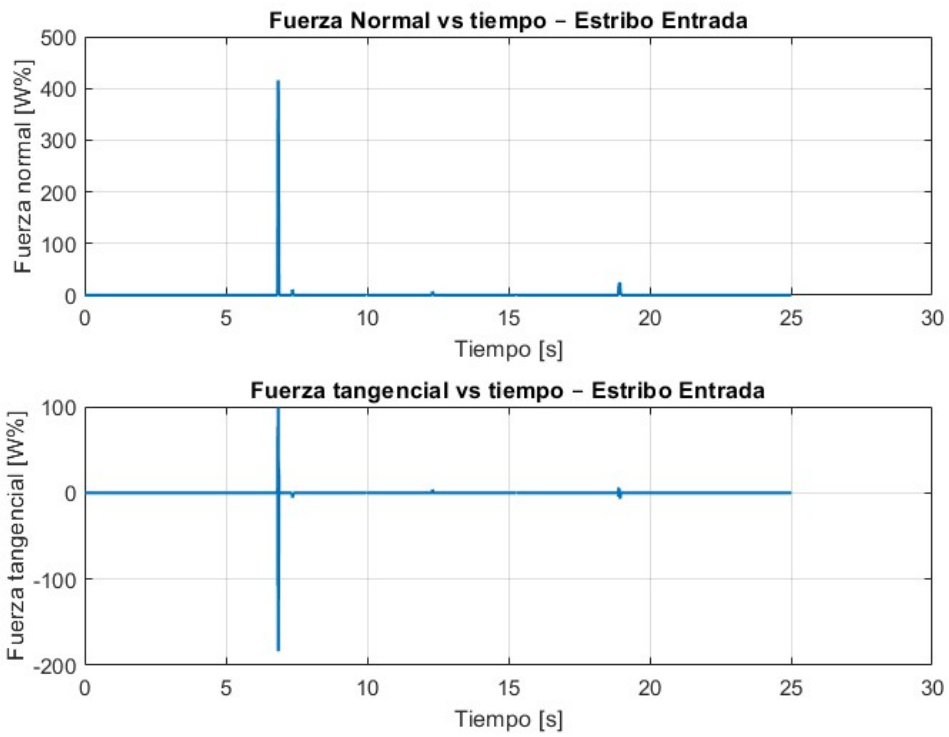


Figura 58: Impacto con esvaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R09.

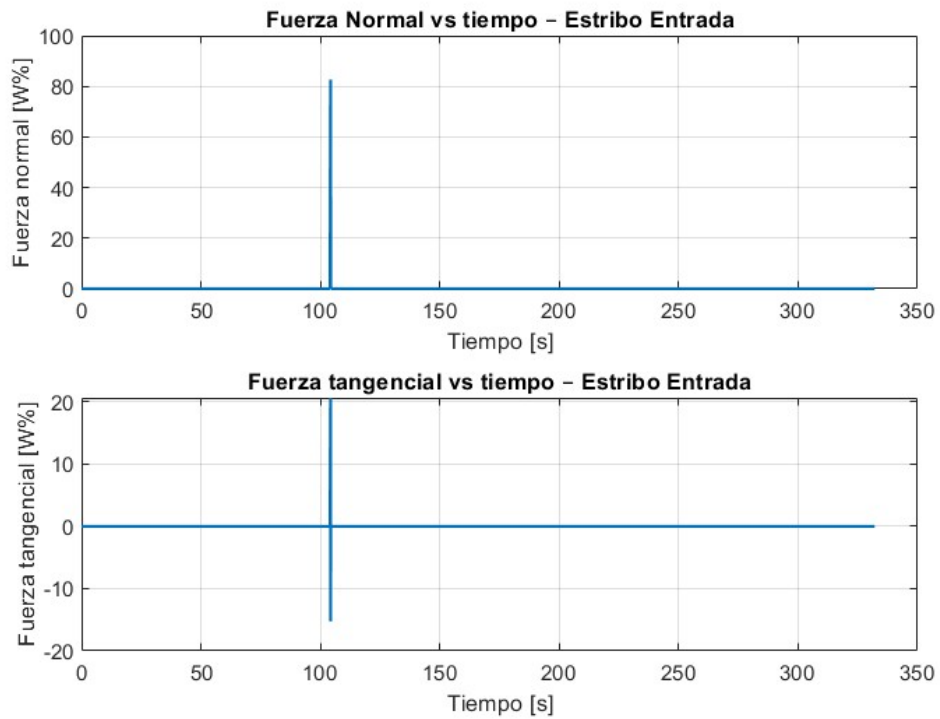


Figura 59: Impacto con esvaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R10.

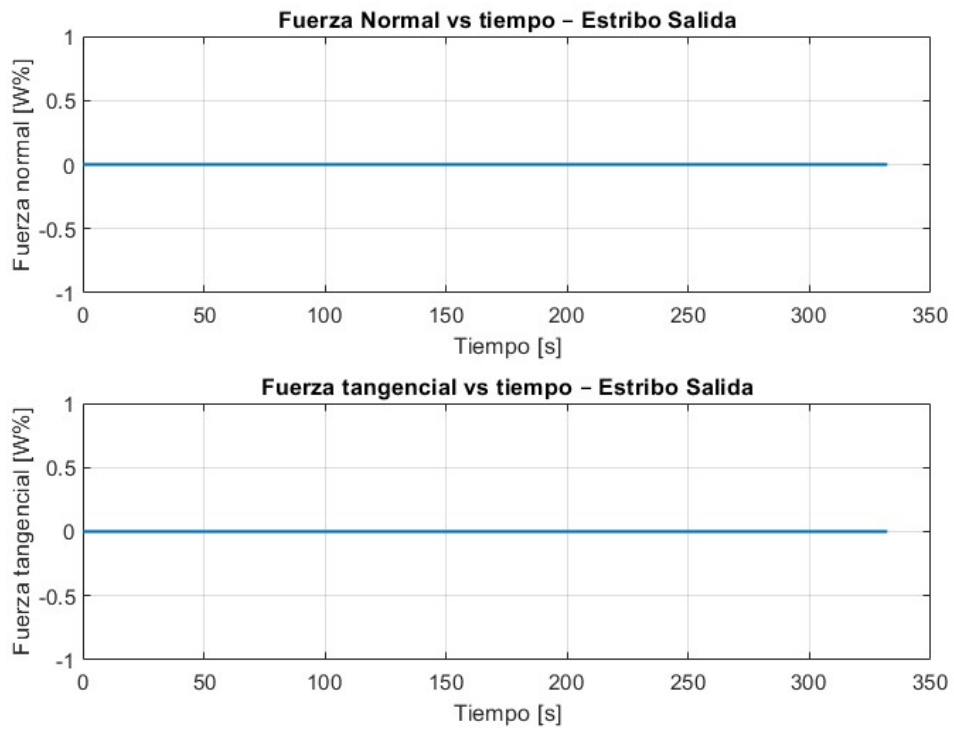


Figura 60: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R10.

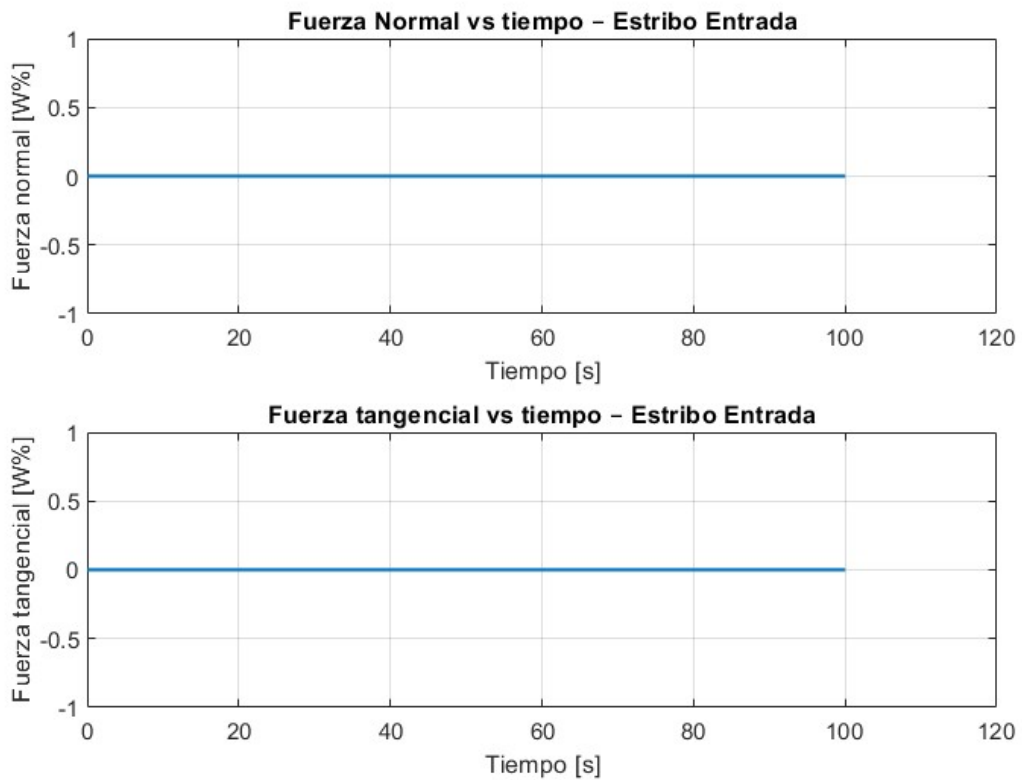


Figura 61: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de entrada para el registro R11.

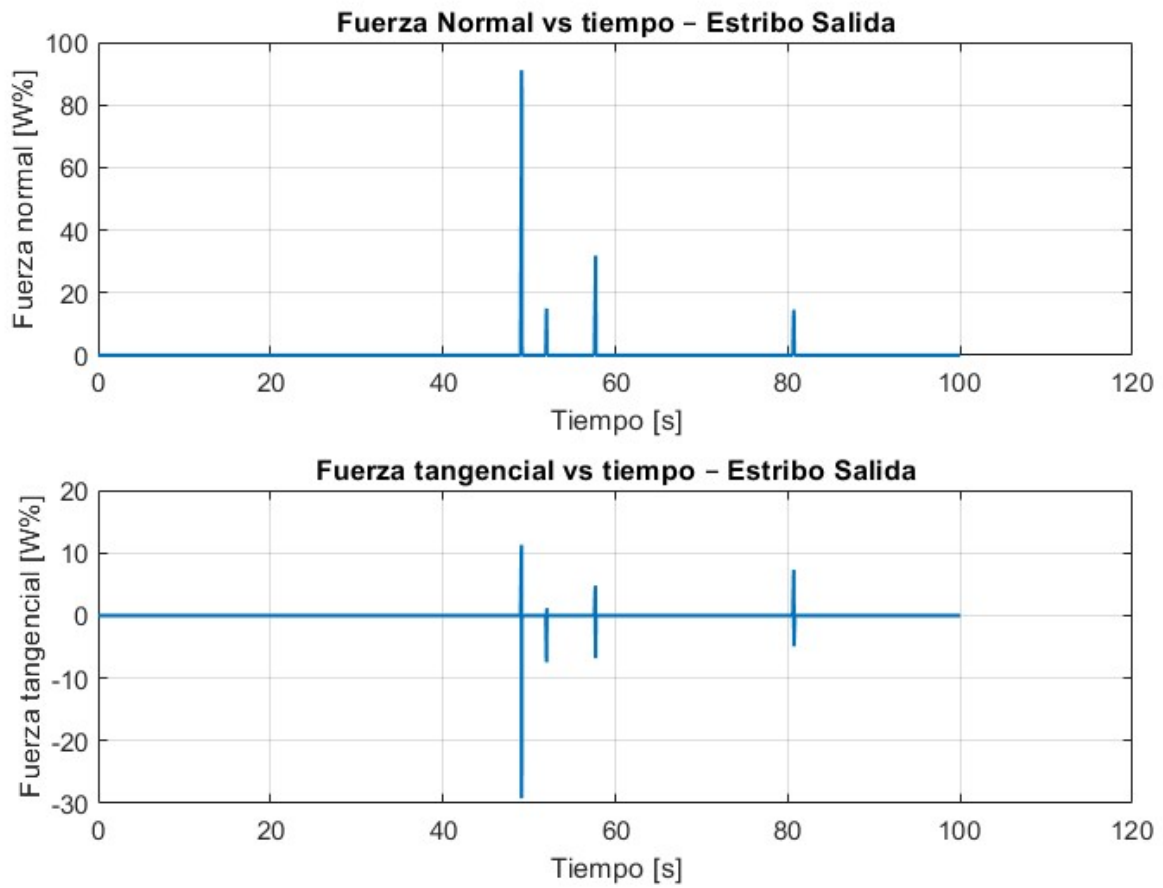


Figura 62: Impacto con esviaje y fricción en el estribo de salida para el registro R11.