

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Aplicación de Métodos Basados en Energía para el Diseño de
Dispositivos de Aislación Sísmica Friccional para Equipos de Baja Masa.

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

**MASTER EN INGENIERÍA CIVIL EN ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES**

Presentado por:

Alejandra Mera

Tutor:

Rodrigo Retamales Saavedra Ph. D

RIOBAMBA - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

Con gran amor dedico mi tesis a quien aún sin su presencia física, me ha escuchado, acompañado y cuidado en mis momentos más difíciles, con amor a mi Vilmis.

También, dedico esta tesis a mi yo del pasado, que, a pesar de sus inseguridades académicas, me permitió asumir el sueño de convertirme en Ingeniera Estructural como un reto y convertirlo en una victoria.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las circunstancias más complicadas que me permitieron discernir quienes son mi compañía en la vida, personas que de una u otra manera sumaron conmigo esfuerzos hasta llegar a este momento. Que de manera desinteresada y desde el amor hacia mí, me motivan, apoyan e impulsan, a ustedes, gracias.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; María Alejandra Mera Mosquera doy mi consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



María Alejandra Mera Mosquera

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
NADIA ROSAURA
QUIJANO ARTEAGA

.....
Nadia Quijano Arteaga, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:
SAMANTHA ELIZABETH
HIDALGO ASTUDILLO

.....
Samantha Hidalgo Astudillo, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Rodrigo Retamales Saavedra Ph. D

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La protección sísmica de equipos de baja masa, esenciales en diversas industrias, es crucial para garantizar su funcionalidad y operatividad durante e inmediatamente después de un evento sísmico. Este proyecto propone y desarrolla un procedimiento de diseño de dispositivos de aislación sísmica friccional (FPS) mediante la aplicación de métodos basados en energía. Tradicionalmente, los sistemas de aislación sísmica priorizan el control de las aceleraciones, verificando no se excedan aceleraciones que puedan afectar la funcionalidad de los equipos. Sin embargo, en entornos confinados, el control de los desplazamientos adquiere una relevancia significativa, planteando la interrogante: ¿cómo abordar eficazmente este desafío? El presente trabajo analiza la problemática desde una perspectiva energética, evaluando la transformación de la energía sísmica que ingresa al sistema en energía cinética, energía potencial y energía disipada por fricción. Estas componentes se parametrizan en función de variables clave como la velocidad relativa máxima, el desplazamiento relativo máximo, el radio de curvatura y el coeficiente de fricción del sistema de aislación sísmica. A través de esta metodología, se busca optimizar el diseño del sistema de aislamiento para lograr un equilibrio eficiente entre el control de aceleraciones y el manejo de desplazamientos.

Palabras Clave: Protección sísmica, Equipos de baja masa, Aislación sísmica friccional (FPS), Transformación de energía, Control de desplazamientos.

ABSTRACT

Seismic protection of low-mass equipment, essential in various industries, is crucial to ensuring their functionality and operability during and immediately after a seismic event. This project proposes and develops a design procedure for frictional seismic isolation devices (FPS) through the application of energy-based methods. Traditionally, seismic isolation systems prioritize acceleration control, ensuring that accelerations do not exceed levels that could compromise equipment functionality. However, in confined environments, displacement control becomes significantly more critical, raising the question: how can this challenge be effectively addressed? This study approaches the issue from an energy perspective, evaluating the transformation of seismic energy entering the system into kinetic energy, potential energy, and energy dissipated through friction. These components are parameterized based on key variables such as maximum relative velocity, maximum relative displacement, the radius of curvature, and the friction coefficient of the seismic isolation system. Through this methodology, the aim is to optimize the isolation system design to achieve an efficient balance between acceleration control and displacement management.

Keywords: *Seismic protection, Low-mass equipment, Frictional seismic isolation (FPS), Energy transformation, Displacement control*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	V
RESUMEN.....	VI
<i>ABSTRACT</i>	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS	X
SIMBOLOGÍA	XI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
CAPÍTULO 1	17
1. Introducción	18
1.1 Antecedentes.....	19
1.2 Definición del problema	21
1.3 Justificación	21
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo General	22
1.4.2 Objetivos Específicos	23
CAPÍTULO 2.....	24
2.1 Marco conceptual	25
2.2 Marco metodológico	31
2.2.1 Ecuación general de balance de energía	31
2.2.2 Energía cinética (Ec):.....	31
2.2.3 Energía potencial (Ep):.....	32
2.2.4 Energía disipada por fricción (Ef):.....	32
2.2.5 Balance dinámico	33
2.2.6 Relación entre fuerza inercial y aceleración espectral	34

2.2.7	Desplazamiento del sistema	35
2.2.8	Tabulación de datos	36
CAPÍTULO 3.....		50
3.	Resultados y discusión	51
3.1	Resultados.....	51
3.2	Análisis de resultados.....	63
CAPÍTULO 4.....		65
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	66
4.1	Conclusiones	66
4.2	Recomendaciones	67
BIBLIOGRAFÍA 5.....		68

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral.
FPS	Sistema de aislación Péndulo de Fricción.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

SIMBOLOGÍA

E_{total}	Energía total en un sistema sin fricción.
E_i	Energía sísmica de entrada.
E_c	Energía cinética.
E_p	Energía potencial.
E_f	Energía disipada por fricción
f	Frecuencia natural del sistema.
g	Aceleración de la gravedad.
m	Masa del sistema.
N	Fuerza normal (peso del sistema).
R	Radio de curvatura de la superficie esférica.
S_a	Aceleración espectral.
T	Periodo de vibración del sistema.
u	Desplazamiento del sistema relativo al aislador.
\dot{u}	Velocidad relativa del sistema aislado respecto al suelo.
\ddot{u}_{max}	Máxima aceleración absoluta del sistema.
μ	Coeficiente de fricción del aislador.
ds	Incremento de desplazamiento a lo largo del ciclo.
ω	Frecuencia angular.
θ	Ángulo de desplazamiento angular del péndulo respecto a la posición de equilibrio o vertical.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Geometría de un FPS de superficie esférica	27
Ilustración 2. Transformación de energía cinética en potencial.....	29
Ilustración 3. Espectro de respuesta requerida de alto nivel de rendimiento 1.00g ..	30
Ilustración 4. Espectro de respuesta requerida de moderado nivel de rendimiento 0.50g.....	31
Ilustración 5. Variación del radio de curvatura en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel moderado.	51
Ilustración 6. Variación del desplazamiento en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel moderado.	52
Ilustración 7. Variación del radio de curvatura en función de aceleraciones - IEEE nivel moderado, para diferentes coeficientes de fricción.....	53
Ilustración 8. Variación del desplazamiento en función de aceleraciones - IEEE nivel moderado, para diferentes coeficientes de fricción.....	54
Ilustración 9. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel moderado.....	55
Ilustración 10. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel moderado.....	56
Ilustración 11. Variación del radio de curvatura en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel alto.....	57
Ilustración 12. Variación del desplazamiento en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel alto.....	58
Ilustración 13. Variación del radio de curvatura en función de aceleraciones - IEEE nivel alto, para diferentes coeficientes de fricción.....	59
Ilustración 14. Variación del desplazamiento en función de aceleraciones - IEEE nivel alto, para diferentes coeficientes de fricción.	60
Ilustración 15. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel alto	61
Ilustración 16. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel alto.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.24g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	36
Tabla 2. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.26g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	37
Tabla 3. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.28g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	37
Tabla 4. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.30g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	37
Tabla 5. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.32g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	38
Tabla 6. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.34g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	38
Tabla 7. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.36g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	38
Tabla 8. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.38g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	39
Tabla 9. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.40g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	39
Tabla 10. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.47g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	39

Tabla 11. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.51g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	40
Tabla 12. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.55g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	40
Tabla 13. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.59g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	40
Tabla 14. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.63g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	41
Tabla 15. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.66g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	41
Tabla 16. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.70g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	41
Tabla 17. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.74g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	42
Tabla 18. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.78g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.....	42
Tabla 19. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.50%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	42
Tabla 20. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.60%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	43
Tabla 21. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.70%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	43

Tabla 22. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.80%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	43
Tabla 23. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.90%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	44
Tabla 24. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.00%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	44
Tabla 25. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.10%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	44
Tabla 26. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.20%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	45
Tabla 27. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.30%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	45
Tabla 28. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.40%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	45
Tabla 29. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.50%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.	46
Tabla 30. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.50%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	46
Tabla 31. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.60%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	46
Tabla 32. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.70%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	47

Tabla 33. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.80%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	47
Tabla 34. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.80%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	47
Tabla 35. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.00%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	48
Tabla 36. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.10%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	48
Tabla 37. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.20%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	48
Tabla 38. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.30%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	49
Tabla 39. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.40%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	49
Tabla 40. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.50%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.....	49

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de aislar sísmicamente equipos de baja masa ha estado presente en el campo de la ingeniería estructural por más de tres décadas. En el año de 1980 los equipos y transformadores en subestaciones eléctricas comenzaron a incorporar sistemas de aislamiento sísmico elastomérico para reducir daños en sismos y mantener la continuidad operativa en infraestructuras críticas como centrales eléctricas y hospitales. Diez años más tarde, la tecnología de péndulos de fricción, originalmente diseñada para estructuras de grandes dimensiones, se adaptó para equipos críticos de baja masa, como equipos médicos y eléctricos. Esto ocurrió principalmente en países como Japón y Estados Unidos (Kelly, 1997). A lo largo de este tiempo, se ha demostrado mediante análisis y ensayos de laboratorio que uno de los sistemas de aislación sísmica más efectivos son los basados en péndulos de fricción (FPS) (Mansouri & Chopra, 2010). Esto se debe a que su activación depende de la fricción del aislador, que, para el caso lubricado, varía típicamente entre 0.5 y 1.5%. En consecuencia, este sistema permite controlar la respuesta sísmica durante sismos frecuentes, moderados, severos y excepcionalmente severos. Además, después de un evento sísmico, la capacidad del sistema para volver a operar es altamente confiable, ya que, a pesar de las posibles variaciones en el coeficiente de fricción, el mecanismo del aislador permanece intacto.

Considerando los mencionados beneficios que ofrece el uso de dispositivos de aislación (FPS), es fundamental analizar cómo los equipos interactúan con su entorno debido a los desplazamientos inducidos por el desacople entre los equipos de baja masa y la estructura que los alberga. Surge entonces la interrogante de cómo mitigar los desplazamientos horizontales para evitar efectos colaterales adversos, tales como el riesgo potencial de impacto entre los equipos y los ocupantes del espacio, así como los problemas operativos que pueden presentarse cuando varios equipos coexisten y funcionan simultáneamente en un entorno confinado o de espacio limitado.

Mediante el diseño geométrico de los dispositivos de aislación (FPS) se propone controlar parcialmente los desplazamientos horizontales compensando al sistema con desplazamientos verticales. En términos de energía, se busca transformar la energía cinética inducida al sistema durante un evento sísmico a energía potencial, lo que se prevé lograr mediante la variación del radio de curvatura del dispositivo.

Se reconoce que el método de análisis estático equivalente descrito en el estándar ASCE/SEI 7-22 es el método más utilizado para el diseño de sistemas de péndulos de fricción (FPS). Sin embargo, es importante señalar que este método no considera la disipación de energía resultante de múltiples ciclos de histéresis, especialmente aquellos que exceden dos ciclos, lo que puede llevar a una subestimación del desempeño de los (FPS). En contraste, la metodología de diseño sísmico basada en energía propuesta por Akiyama permite determinar la geometría del (FPS) a partir de la demanda sísmica aplicada al sistema. Esto permitirá al presente proyecto de graduación determinar, de acuerdo con el input de energía que se espera en el sistema, el radio de curvatura óptimo en el diseño de sistemas de péndulos de fricción (FPS), para reducir aceleraciones controlando, simultáneamente, desplazamientos horizontales.

1.1 Antecedentes

La protección sísmica de estructuras ha sido un campo de investigación constante desde mediados del siglo XX. Inicialmente, los esfuerzos se centraron en mejorar la resistencia de las edificaciones a través de refuerzos estructurales convencionales. Sin embargo, se ha reconocido que no solo las edificaciones, sino también los equipos y componentes mecánicos y eléctricos deben ser protegidos ante eventos sísmicos. Estos equipos, especialmente aquellos de baja masa, son vulnerables a aceleraciones y desplazamientos, lo que puede comprometer su funcionalidad tras un sismo (Naeim & Kelly, 1999).

El concepto de aisladores sísmicos se fundamenta en desacoplar el movimiento del terreno respecto al objeto protegido, mediante dispositivos que permiten movimientos controlados y reducen significativamente las aceleraciones. Este enfoque ha sido implementado con éxito en edificios de gran escala, y su aplicación en equipos críticos ha ganado interés en las últimas décadas (Naeim & Kelly, 1999; Constantinou & Symans, 1993).

El aislamiento sísmico mediante dispositivos elastoméricos ha sido ampliamente utilizado en estructuras de gran masa, donde la flexibilidad de los aisladores elastoméricos proporciona una excelente reducción de las aceleraciones. Sin embargo, para equipos de baja masa, estos aisladores enfrentan desafíos debido a la relación entre la masa del equipo y la rigidez del aislador (Kelly, 1997). Este

problema ha motivado la exploración de sistemas alternativos como los péndulos friccionales (FPS), los cuales aprovechan las propiedades friccionales para transformar la energía cinética del sismo en energía potencial (Cardone & Dolce, 2006).

La protección de equipos esenciales en infraestructuras críticas, como plantas de energía, hospitales y sistemas de telecomunicaciones, ha llevado a la investigación en métodos más eficientes de aislamiento sísmico. Whittaker y Fenves (1994) señalaron la importancia del aislamiento sísmico en equipos y componentes no estructurales, resaltando que la funcionalidad de estos elementos es crucial para el funcionamiento continuo de las infraestructuras durante y después de un evento sísmico.

El desarrollo de métodos de diseño basados en energía, como lo mencionan Soong y Constantinou (1994), ha sido clave para comprender cómo la energía sísmica puede gestionarse de manera eficiente. Estos métodos no solo consideran la resistencia estructural, sino también cómo el sistema completo (estructura y equipo) puede disipar energía a través de dispositivos de aislamiento, logrando una protección integral.

Uno de los principales retos en el diseño de sistemas de aislamiento para equipos de baja masa radica en encontrar un equilibrio adecuado entre la reducción de aceleraciones y el control de desplazamientos. Constantinou y Symans (1993) analizaron el comportamiento de sistemas de aislamiento elastoméricos, destacando que, para equipos con bajas cargas verticales, la rigidez del aislador puede no ser suficiente para controlar los desplazamientos horizontales sin comprometer su efectividad.

Este problema ha impulsado el desarrollo de tecnologías como (FPS), los cuales pueden ajustar su radio de curvatura y características de fricción para optimizar la disipación de energía y el control de movimientos. La protección sísmica de estructuras ha sido objeto de investigación desde mediados del siglo XX, con un enfoque inicial en mejorar la resistencia de las edificaciones mediante refuerzos estructurales. Sin embargo, se ha identificado la necesidad de proteger también los equipos y componentes mecánicos y eléctricos, especialmente aquellos de baja masa, que son vulnerables ante aceleraciones que pueden comprometer la funcionalidad de la infraestructura tras un evento sísmico (Naeim & Kelly, 1999).

1.2 Definición del problema

Los sismos recientes ocurridos en diversas partes del mundo han dejado en evidencia la vulnerabilidad sísmica de equipos eléctricos y mecánicos, que resultan fundamentales para la continuidad de operación de la infraestructura civil, y que en general constituyen un alto costo de inversión económica. Esta problemática no solo afecta a la infraestructura crítica, sino que también tiene repercusiones económicas y sociales considerables. En los últimos años, se han desarrollado diversas técnicas avanzadas para la aislación sísmica de equipos, incluyendo sistemas elastoméricos y sistemas de péndulos friccionales. El aislamiento sísmico de equipos de baja masa mediante (FPS) plantea desafíos importantes, principalmente debido a los grandes desplazamientos horizontales que pueden ocurrir durante un evento sísmico. Estos desplazamientos no solo representan un riesgo potencial de que los equipos impacten a los ocupantes del espacio, sino que también pueden causar problemas cuando varios equipos operan simultáneamente en un entorno restringido o confinado.

El desafío principal de esta investigación radica en controlar simultáneamente aceleraciones y desplazamientos de los equipos aislados mediante sistemas (FPS), convirtiendo los desplazamientos horizontales en desplazamientos verticales. Esto implica, entonces, transformar la energía cinética inducida por el sismo sobre el sistema en energía potencial. Por tanto, surge la necesidad de estudiar y diseñar sistemas de aislamiento (FPS) utilizando métodos basados en energía, con el objetivo de determinar de manera eficiente la geometría óptima de los aisladores sísmicos. De esta manera, se busca controlar las deformaciones y aceleraciones que pudieran exceder los niveles tolerables por los equipos, permitiendo su funcionalidad incluso después de eventos sísmicos severos.

1.3 Justificación

La vulnerabilidad de equipos eléctricos y mecánicos en infraestructuras críticas ha sido ampliamente documentada tras eventos sísmicos en distintas partes del mundo (Whittaker, Constantinou & He, 1998). Estos equipos, a menudo esenciales para la operatividad de plantas de energía, hospitales y sistemas de telecomunicaciones, pueden sufrir daños irreversibles si no están adecuadamente protegidos (Whittaker y Fenves, 2006), por lo que persiste el desafío de reducir las

aceleraciones y controlar los desplazamientos horizontales resultantes. Esto es crucial para alcanzar la continuidad operativa, preservar la integridad de los equipos y proveer seguridad a los ocupantes, especialmente en entornos confinados. Los desplazamientos no solo pueden causar daños directos, sino también comprometer la interacción y el funcionamiento simultáneo de los equipos en espacios reducidos. El presente proyecto de graduación se justifica por la necesidad de mejorar el desempeño de los sistemas de aislamiento (FPS) para equipos de baja masa, reduciendo las aceleraciones y controlando los grandes desplazamientos horizontales mediante un diseño optimizado que transforme la energía cinética en energía potencial. Al aplicar métodos basados en energía, será posible evaluar cómo la geometría del sistema, particularmente el radio de curvatura de los aisladores, influye en la capacidad de mitigación de los desplazamientos horizontales y aceleraciones. Esto resultará en un enfoque más eficiente para diseñar sistemas de aislamiento sísmico, mejorando la seguridad y resiliencia de los equipos críticos.

Dada la vulnerabilidad sísmica demostrada en recientes terremotos alrededor del mundo y el alto costo económico asociado a la pérdida o disfunción de estos equipos, es imperativo desarrollar soluciones orientadas a alcanzar su operatividad durante e inmediatamente después de sismos.

Este proyecto no solo mejorará el entendimiento técnico sobre el comportamiento de los (FPS), sino que también ofrecerá herramientas prácticas para su implementación efectiva en la ingeniería estructural moderna. Además, contribuirá al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9 y 11, establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015, que se enfocan en construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y garantizar ciudades y comunidades sostenibles.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Aplicar métodos basados en energía para la selección de dispositivos de aislación sísmica en equipos de baja masa, mediante la variación del radio de curvatura de sistemas de péndulo friccional simples, lubricados, de baja fricción.

1.4.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos planteados en este proyecto están orientados a abordar de manera precisa los aspectos clave relacionados con el diseño (FPS) para equipos de baja masa. Cada objetivo busca responder preguntas técnicas fundamentales y establecer bases sólidas para la implementación y optimización de estos sistemas en ante eventos sísmicos.

- Determinar el radio de curvatura requerido por los (FPS) para la conversión de la energía cinética inducida durante un evento sísmico en energía potencial.
- Evaluar la relación entre la energía de un sismo y la geometría de péndulos de baja fricción para calcular la respuesta máxima de aceleraciones y desplazamientos en equipos de baja masa durante un evento sísmico.
- Verificar que la metodología simplificada propuesta de diseño de (FPS) es compatible con la metodología del análisis estático equivalente.

CAPÍTULO 2

2.1 Marco conceptual

Para el desarrollo de este proyecto de graduación, se define al sismo como un evento natural caracterizado por un movimiento brusco y repentino de la corteza terrestre, resultado de la liberación de energía acumulada por la interacción de las placas tectónicas. Estos movimientos sísmicos pueden provocar daños significativos en las infraestructuras y equipos, en particular en los de baja masa, si no se han implementado medidas adecuadas de protección (Bolt, 2004). Los sismos se miden mediante las escalas de magnitud Richter o de momento, que cuantifican la energía liberada durante el sismo.

Por lo concerniente a este proyecto, se definen los equipos de baja masa como aquellos que, debido a su diseño o función, tienen una masa reducida. Estos equipos suelen ser más vulnerables a los movimientos sísmicos, ya que pueden desplazarse o experimentar mayores aceleraciones durante un evento sísmico (Kelly, 1997). Ejemplos incluyen equipos eléctricos y mecánicos, sistemas de comunicación y computación, y equipos médicos.

En los últimos treinta años se ha considerado la vulnerabilidad a aceleraciones altas de los equipos de baja masa, por lo que se ha implementado tecnología de protección sísmica, que se refiere a los sistemas diseñados para minimizar los daños causados por los sismos. Esto incluye dispositivos como aisladores elastómeros, (FPS) y amortiguadores, estas tecnologías ayudan a disipar la energía sísmica y reducir las aceleraciones percibidas por los equipos de baja masa (Naeim & Kelly, 1999).

La aislación de base es una técnica de protección sísmica que implica el uso de dispositivos en la base de una estructura o equipo para desacoplar la interacción del suelo con los equipos y así reducir la transferencia de energía sísmica (Tatsuoka & Nakamura, 2002). En Japón, en el año 1980, se implementó el uso de aisladores elastómeros en equipos eléctricos y hospitalarios, sin embargo, la rigidez de estos aisladores con respecto a la rigidez del equipo no ofrecía grandes ventajas. Para el año de 1990 se implementan en Estados Unidos y Japón el uso en equipos de baja masa dispositivos de aislamiento (FPS) y se consigue que los equipos se muevan independientemente del movimiento del suelo, reduciendo así el impacto sísmico.

Los Sistema de Péndulo de Fricción (FPS) simples, son dispositivos utilizados en el aislamiento sísmico que emplea la fricción para disipar energía y controlar los

movimientos de una estructura durante un sismo (Kelly, 1997). El (FPS) convierte la energía cinética en energía potencial mediante el movimiento de un péndulo sobre un plato de metal curvo, cónico o polinómico.

Existen varios tipos de (FPS) simples, que se diferencian principalmente por su geometría y capacidad de adaptación a diferentes tipos de cargas sísmicas. Algunos de los tipos más comunes incluyen los (FPS) simples con superficie de fricción cónica y los (FPS) simples con superficie de fricción esférica, cada uno con características que mejoran el control de los desplazamientos horizontales y la disipación de energía.

Los (FPS) simples con superficie de fricción esférica son dispositivos de aislamiento sísmico que utilizan una esfera para generar fricción controlada durante un evento sísmico. Este sistema está compuesto por una esfera (usualmente de metal o material compuesto) que se desliza sobre una superficie esférica complementaria. La fricción entre las dos superficies actúa como un mecanismo de disipación de energía, transformando la energía cinética generada por el sismo en calor (Kelly, 1997).

Este tipo de aislador es particularmente efectivo para equipos de baja masa que experimentan movimientos multidimensionales durante un terremoto. La forma esférica permite que el sistema maneje desplazamientos en diferentes direcciones sin generar un aumento significativo en las aceleraciones percibidas por los equipos de baja masa (Naeim & Kelly, 1999). Además, su geometría asegura una fricción relativamente constante, lo que ayuda a mantener el control sobre los desplazamientos y las aceleraciones durante el evento sísmico, protegiendo así las estructuras de daños mayores (Tatsuoka & Nakamura, 2002). En el caso de los (FPS), la geometría del sistema, particularmente el radio de curvatura y el coeficiente de fricción, influyen directamente en su capacidad de mitigación de aceleraciones, por lo que son parámetros cruciales para su diseño.

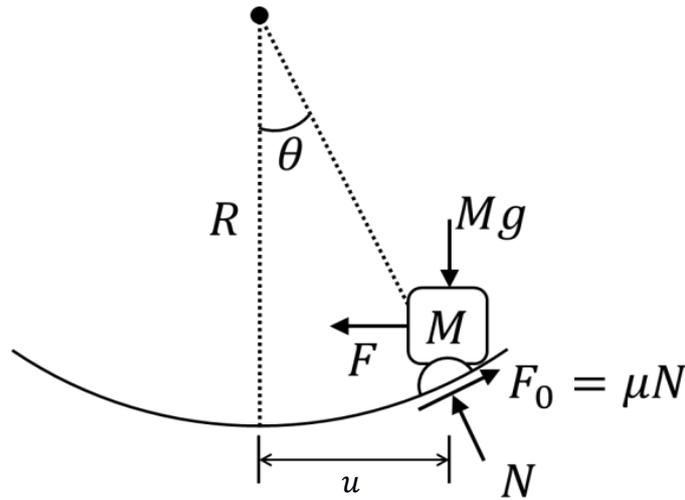


Ilustración 1. Geometría de un FPS de superficie esférica
Autores. (Kim & Hoon)

La siguiente ecuación (1), propuesta por (Akiyama, 1985), describe el movimiento para un sistema de péndulo de fricción esférico:

$$\ddot{u} + \frac{g}{R}u + (\mu g)\text{sgn}(\dot{u}) = \ddot{u}g \quad (1)$$

donde

\ddot{u} = aceleración del dispositivo

g = gravedad

R =radio de curvatura de la superficie de deslizamiento

u =desplazamiento relativo horizontal de dispositivo

μ =coeficiente de fricción

$\text{sgn}(\dot{u})$ =función de signo para la dirección del movimiento

$\ddot{u}g$ =aceleración horizontal del suelo

El radio de curvatura es la medida que determina la curvatura de un (FPS). Cuanto mayor sea el radio de curvatura, mayor será la capacidad del sistema para disipar energía (Takahashi & Sakai, 2009).

El coeficiente de fricción es una medida de la resistencia al deslizamiento entre dos superficies de contacto. En el caso de los (FPS), el coeficiente de fricción es crucial para determinar la eficiencia de la disipación de energía y el control de los desplazamientos durante un sismo (Hoshino & Tatsuoka, 2005).

De acuerdo a Chopra cuando se analiza un sistema con fricción de Coulomb el signo de la fuerza de fricción cambia con la dirección del movimiento; el signo positivo se aplica si el movimiento es de izquierda a derecha ($\dot{u} > 0$) y el signo negativo es para

el movimiento de derecha a izquierda ($\dot{u} < 0$). Cada una de las dos ecuaciones diferenciales es lineal, pero el problema global es no lineal debido a que la ecuación que controla cambia cada medio ciclo de movimiento. Por lo tanto, no es posible encontrar soluciones analíticas exactas, excepto en casos especiales.

El coeficiente de fricción está directamente relacionado con el amortiguamiento del sistema, ya que los materiales utilizados ofrecen resistencia al movimiento. El amortiguamiento se define como el proceso mediante el cual se disipa la energía del sistema en movimiento (Chopra, 2007). Esta energía disipativa se conoce como energía de fricción o histerética.

La metodología tradicional para el diseño de sistemas de aislamiento sísmico mediante péndulos de fricción (FPS) considera el análisis estático equivalente, descrito en el estándar ASCE/SEI 7-22 (ASCE, 2022), como un enfoque simplificado utilizado para evaluar las cargas sísmicas en una estructura. Este método se emplea principalmente cuando el análisis dinámico completo no es necesario debido a la simplicidad o las características de la estructura. En lugar de calcular la respuesta dinámica de la estructura ante un sismo, el análisis estático equivalente estima las fuerzas sísmicas actuando sobre la estructura utilizando un enfoque más directo y basado en un modelo simplificado (ASCE, 2022).

El análisis estático equivalente se basa en la suposición de que una estructura responde a un sismo como si estuviera sometida a una carga estática proporcional a las fuerzas sísmicas reales, pero con la diferencia de que estas fuerzas se calculan de acuerdo con las características de la estructura y las propiedades sísmicas del sitio, como la aceleración máxima esperada (Chopra, 2007).

Este enfoque se usa principalmente en edificaciones de baja a mediana altura o cuando la frecuencia de vibración de la estructura es relativamente alta y no se requiere un análisis detallado de la respuesta dinámica. Se considera adecuado para estructuras con respuestas lineales a las cargas sísmicas (Naeim & Kelly, 1999).

La metodología propuesta en este proyecto de graduación tiene el enfoque de diseño basado en energía, tal como lo propone Akiyama (1985), quien sugiere que la clave para proteger estructuras y equipos frente a sismos no reside únicamente en su resistencia, sino en su capacidad para disipar la energía sísmica. Este enfoque ha sido fundamental para entender cómo optimizar los sistemas de aislación sísmica en diversas aplicaciones, incluidos los equipos de baja masa. La metodología se centra en calcular la demanda de energía que un sismo impone sobre un sistema y, a partir

de ello, diseñar los elementos de protección que permitan disipar dicha energía de manera eficiente (Akiyama, 1985).

Para comprender este enfoque, es fundamental reconocer que la energía cinética está asociada al movimiento de un cuerpo. En el contexto de los sistemas sísmicos, esta energía se genera como resultado de los desplazamientos horizontales provocados por un sismo. Es crucial que dicha energía cinética sea convertida o disipada adecuadamente para evitar daños estructurales y proteger la integridad de los equipos y la infraestructura afectada por el evento sísmico (Tatsuoka & Nakamura, 2002).

Akiyama (1999) sugiere que la energía sísmica que ingresa a una estructura durante un sismo, compuesta principalmente de energía cinética y potencial, debe ser absorbida o disipada mediante deformaciones, amortiguamiento o dispositivos de disipación de energía como los (FPS) como se describe en la siguiente ecuación.

La energía potencial es la energía almacenada en un sistema debido a su posición, por ello en los (FPS), la energía cinética se transforma en energía potencial a medida que el péndulo se mueve.

Para comprender la interacción entre la energía cinética y potencial se considera en un inicio un sistema lineal elástico sin amortiguamiento viscoso ni histerético. En la ilustración 2, se muestra cómo estas energías interactúan de manera complementaria. En todo el trayecto del desplazamiento de la masa, la energía cinética incrementa directamente proporcional cuando la velocidad incrementa hasta llegar a su máximo valor, mientras que la energía potencial disminuye hasta anularse.

Por el contrario, al llegar al punto más alto de la trayectoria, la energía potencial es máxima y la energía cinética se anula. Este intercambio constante entre ambas formas de energía resalta su interdependencia y su rol fundamental en la dinámica del sistema.

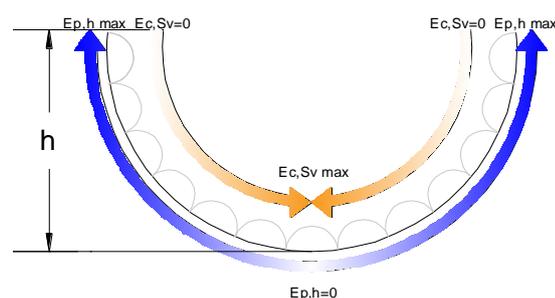


Ilustración 2. Transformación de energía cinética en potencial.

Para evaluar la demanda sísmica a la que serán sometidos los sistemas de aislamiento sísmico basados en péndulos de fricción (FPS) en el presente proyecto de graduación, se ha considerado la utilización del espectro de aceleraciones establecido por el estándar IEEE 693 del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Este espectro se emplea para representar la respuesta dinámica de equipos de baja masa ante eventos sísmicos, permitiendo simular el comportamiento de los equipos en función de diferentes niveles de aceleración, como los casos de aceleración alta 1.00g y moderada 0.50g. El espectro IEEE proporciona una curva que caracteriza la aceleración máxima esperada en un sistema estructural a través de un rango de frecuencias, lo cual es esencial para comprender cómo los equipos interactúan con las fuerzas sísmicas.

La integración del espectro IEEE en el proceso de diseño de sistemas de aislamiento sísmico permite el cumplimiento de las normativas sísmicas internacionales. Dichas normativas requieren que los equipos eléctricos sean diseñados para soportar los efectos de un sismo sin comprometer su funcionalidad, asegurando su integridad y operatividad durante y después del evento sísmico.

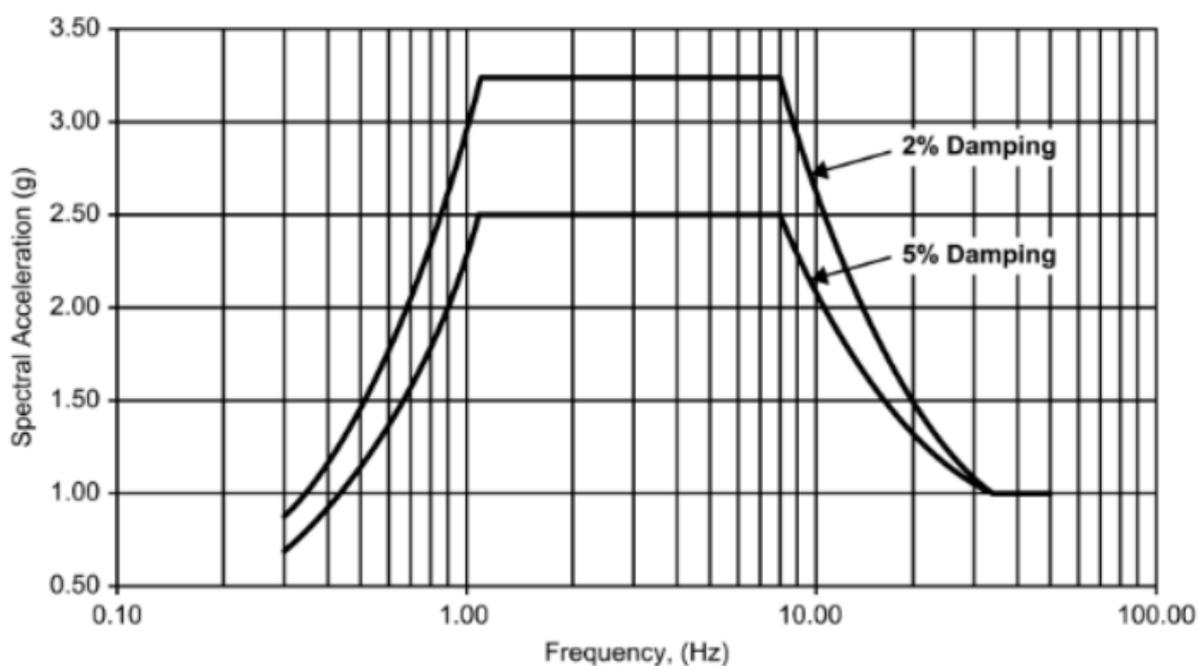


Ilustración 3. Espectro de respuesta requerida de alto nivel de rendimiento 1.00g

Autor. (IEEE)

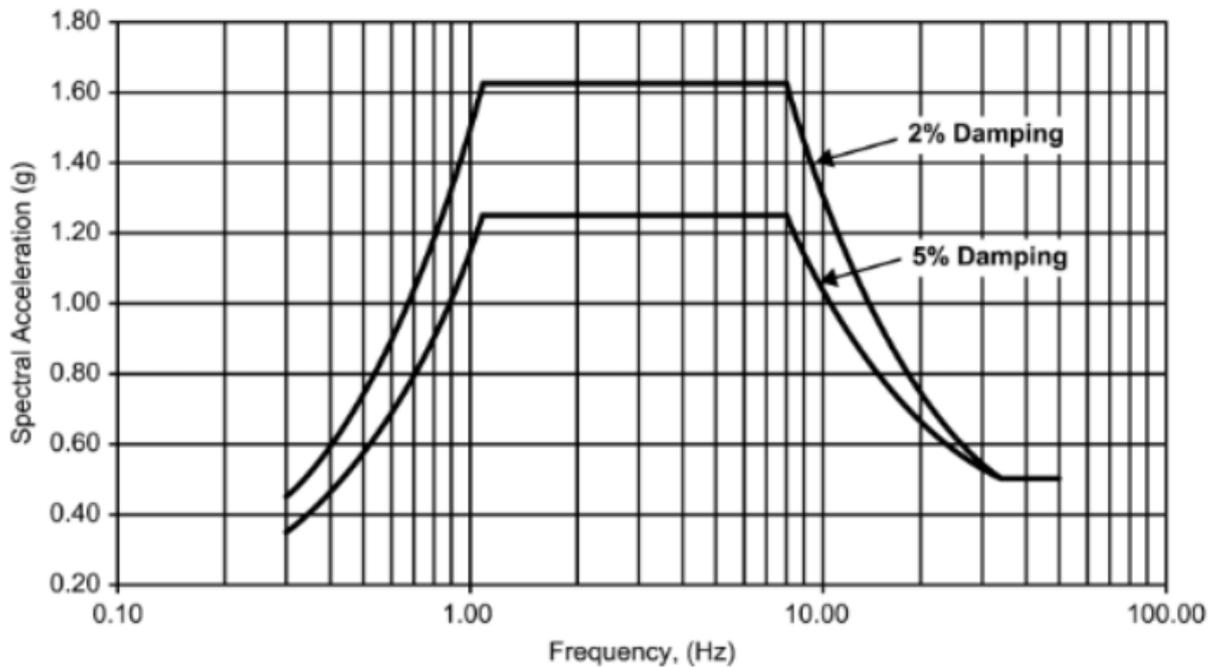


Ilustración 4. Espectro de respuesta requerida de moderado nivel de rendimiento 0.50g
 Autor. (IEEE)

2.2 Marco metodológico

La ecuación de balance de energía se basa en las siguientes componentes:

Energía cinética (E_c): asociada al movimiento del sistema.

Energía potencial (E_p): almacenada debido a la elevación de la masa.

Energía disipada por fricción (E_f): disipada por el mecanismo de fricción.

Energía input (E_i): energía sísmica que ingresa al sistema, usualmente asociada a las condiciones iniciales del movimiento sísmico.

2.2.1 Ecuación general de balance de energía

$$E_i = E_c + E_p + E_f \quad (2)$$

La ecuación cumple que la energía input de entrada se transforma en diferentes componentes al interactuar con el sistema.

Para un sistema (FPS) de superficie de fricción esférica:

2.2.2 Energía cinética (E_c):

$$E_c = \frac{1}{2} m \dot{u}^2 \quad (3)$$

donde

m : masa del sistema.

\dot{u} : velocidad relativa del sistema aislado respecto al suelo.

2.2.3 Energía potencial (E_p):

$$E_p = mgR(1 - \cos\theta) \quad (4)$$

donde

g : aceleración de la gravedad.

R : radio de curvatura de la superficie esférica.

θ : ángulo de desplazamiento angular del péndulo respecto a la posición de equilibrio o vertical.

Usando la conservación de la energía mecánica, la energía total en un sistema sin fricción es constante. Si el objeto parte de reposo en el punto más bajo (donde $\theta = 0$), entonces toda la energía se convierte en energía potencial cuando el objeto sube:

$$E_{total} = E_c + E_p \quad (5)$$

$$E_{total} = \frac{1}{2}m\dot{u}^2 + mgR(1 - \cos\theta) \quad (6)$$

donde

E_{total} : Energía total en un sistema sin fricción.

Para variaciones de θ graduales, se puede considerar aproximar $\cos\theta$ usando la serie de Taylor en torno a $\theta = 0$:

$$\cos(\theta) \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (7)$$

$$E_p = mgR(1 - \cos\theta) \approx mgR(1 - (1 - \frac{\theta^2}{2})) = mgR\frac{\theta^2}{2} \quad (8)$$

$$\theta \approx \frac{u}{R} \quad (9)$$

Usando la aproximación de θ , se puede relacionar u con el ángulo, con lo que la energía potencial se puede escribir como:

$$E_p = \frac{1}{2}mg\frac{u^2}{R} \quad (10)$$

donde

u : desplazamiento del sistema relativo al aislador.

2.2.4 Energía disipada por fricción (E_f):

$$E_f = \int \mu N ds \quad (11)$$

donde

μ : coeficiente de fricción del aislador.

N : fuerza normal (peso del sistema).

ds : incremento de desplazamiento a lo largo del ciclo.

El desplazamiento ds depende de la amplitud del movimiento Δu .

$$N = mg = 1 \quad (12)$$

donde

N : normal.

$$E_f = \mu mg u \quad (13)$$

2.2.5 Balance dinámico

Ecuaciones (3), (10) y (13) en (2):

$$\frac{1}{2} m \dot{u}^2 + \frac{1}{2} mg \frac{u^2}{R} + \mu mg u = E_i \quad (14)$$

La ecuación (14) muestra que:

La energía cinética depende de la velocidad relativa del sistema \dot{u} .

La energía potencial depende del desplazamiento relativo del sistema u y del radio de curvatura R , controlando la capacidad del sistema para almacenar energía.

La energía disipada es directamente proporcional al coeficiente de fricción μ .

Relación entre aceleración espectral y fuerzas sísmicas

La aceleración espectral S_a representa la respuesta máxima de aceleración de un oscilador armónico simple con una frecuencia y amortiguamiento específicos bajo un movimiento sísmico. Esta se utiliza para calcular la fuerza de inercia máxima:

$$F = m S_a \quad (15)$$

donde

S_a : aceleración espectral.

La energía que ingresa al sistema se puede expresar como el trabajo realizado por la fuerza de inercia a lo largo del desplazamiento relativo máximo.

$$E_i = \int F du \quad (16)$$

Ecuación (15) en (16)

$$E_i = m \int S_a du \quad (17)$$

El desplazamiento y velocidad relativo máximo (u_{max}) y (\dot{u}_{max}) se puede calcular usando la relación entre aceleración espectral S_a , desplazamiento espectral S_d y frecuencia angular ω :

$$u_{max} = S_d = \frac{S_a}{\omega^2} = \frac{S_a}{4\pi^2 f^2} \quad (18)$$

$$\dot{u}_{max} = \omega S_d = \frac{\omega S_a}{\omega^2} = \frac{S_a}{\omega} = \frac{S_a}{2\pi f} \quad (19)$$

donde

$\omega = 2\pi f$: frecuencia angular.

f : frecuencia natural del sistema.

$$Ei = m \frac{Sa^2}{\omega^2} \quad (20)$$

2.2.6 Relación entre fuerza inercial y aceleración espectral

La fuerza inercial generada en un sistema sometido a un movimiento sísmico es proporcional a la masa del sistema y a su aceleración relativa máxima:

La energía ingresada al sistema sería entonces

$$F_{inercial} = m\ddot{u}_{max} \quad (21)$$

donde

\ddot{u}_{max} : es la máxima aceleración absoluta del sistema.

En un espectro de diseño, esta aceleración es representada por Sa , es decir:

$$F_{inercial} = mSa \quad (22)$$

La energía ingresada al sistema está relacionada con el trabajo realizado por la fuerza inercial a través del desplazamiento relativo u_{max}

$$Ei = F_{inercial}u_{max} = mSau_{max} \quad (23)$$

$$Ei = m \frac{Sa^2}{\omega^2} \quad (24)$$

$$Ei = \frac{mSa^2}{4\pi^2 f^2} \quad (25)$$

El amortiguamiento del sistema está inherentemente presente debido al coeficiente de fricción μ entre las superficies deslizantes. Este tipo de amortiguamiento es no lineal y depende del nivel de desplazamiento. En este caso, no se requiere una consideración de amortiguamiento adicional; simplemente se trabaja con el μ definido en el diseño.

Las ecuaciones que conforman el balance de energía en función de Sa se expresan como:

$$Ec = \frac{1}{2}m\dot{u}^2 = m \frac{Sa^2}{8\pi^2 f^2} \quad (26)$$

$$Ep \approx \frac{1}{2}mg \frac{u^2}{R} \approx m \frac{gSa^2}{32\pi^4 f^4 R} \quad (27)$$

$$Ef = \mu mg u = \mu mg \frac{Sa}{4\pi^2 f^2} \quad (28)$$

$$Ei = \frac{mSa^2}{4\pi^2 f^2} = m \frac{Sa^2}{8\pi^2 f^2} + m \frac{gSa^2}{32\pi^4 f^4 R} + \mu mg \frac{Sa}{4\pi^2 f^2} \quad (29)$$

$$\frac{Ei}{m} = \frac{Sa^2}{4\pi^2 f^2} = \frac{Sa^2}{8\pi^2 f^2} + \frac{gSa^2}{32\pi^4 f^4 R} + \mu g \frac{Sa}{4\pi^2 f^2} \quad (30)$$

La ecuación (30) de balance de energía, expresada en función de la aceleración espectral Sa , permite identificar las cuatro variables clave que controlan el comportamiento dinámico del sistema: la frecuencia del aislador f , el radio de curvatura R , el coeficiente de fricción μ , y la propia aceleración espectral Sa . Esta formulación proporciona una base sólida para el desarrollo de un método de diseño basado en energía, orientado a la optimización del dispositivo de aislación sísmica. La ecuación integra explícitamente los términos que describen la transformación de la energía de entrada en energía potencial, energía disipada por fricción y energía cinética. Esta descomposición permite diseñar dispositivos de aislación que optimicen simultáneamente el control de desplazamientos y aceleraciones, maximizando la eficiencia del sistema.

Considerando que cualquier espectro de aceleración definido por normativa, como el espectro especificado en la IEEE, establece una relación entre la aceleración espectral Sa y la frecuencia del aislador f , es posible reformular la ecuación de balance de energía para determinar parámetros de diseño clave, como el radio de curvatura R o el coeficiente de fricción μ . Este enfoque permite adaptar el diseño del sistema de aislación a las demandas específicas del espectro normativo y optimizar su desempeño frente a eventos sísmicos.

La ecuación para determinar el radio de curvatura de la superficie esférica R se expresa como:

$$\frac{Sa^2}{4\pi^2 f^2} = \frac{Sa^2}{8\pi^2 f^2} + \frac{gSa^2}{32\pi^4 f^4 R} + \mu g \frac{Sa}{4\pi^2 f^2} \quad (31)$$

$$Sa^2 = \frac{Sa^2}{2} + \frac{gSa^2}{8\pi^2 f^2 R} + \mu g Sa \quad (32)$$

$$\frac{gSa^2}{8\pi^2 f^2 R} = Sa^2 - \frac{Sa^2}{2} - \mu g Sa \quad (33)$$

$$\frac{gSa^2}{8\pi^2 f^2 R} = 0.5Sa^2 - \mu g Sa \quad (34)$$

$$R = \frac{gSa^2}{8\pi^2 f^2 (0.5Sa^2 - \mu g Sa)} \quad (35)$$

$$R = \frac{gSa}{4\pi^2 f^2 Sa - 8\mu g \pi^2 f^2} \quad (36)$$

2.2.7 Desplazamiento del sistema

Para calcular el desplazamiento del sistema se calcula primero el periodo T a partir del radio R con la siguiente ecuación.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (37)$$

donde

T : es el periodo de vibración del sistema

Se calcula la frecuencia angular

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (38)$$

Utilizando la ecuación (38), y a partir de la aceleración espectral, se calcula u_{max} como:

$$u_{max} = \Delta = Sd = \frac{Sa}{\omega^2} \quad (39)$$

2.2.8 Tabulación de datos

Para validar el método de cálculo desarrollado a base de métodos de energía se han procesado datos a partir del uso del espectro de aceleraciones descrito en el estándar IEEE, en donde se define dos niveles de demanda, el nivel moderado de 0.50g y el nivel de demanda alto de 1.00g para aceleraciones y coeficientes de fricción variables, se obtuvo la siguiente información:

Tabla 1. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.24g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	0.50%	570	139
	0.60%	574	140
	0.70%	579	141
	0.80%	585	143
	0.90%	590	144
	1.00%	595	145
	1.10%	600	146
	1.20%	606	148
	1.30%	611	149
	1.40%	617	151
	1.50%	623	152

Tabla 2. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.26g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.26	0.50%	489	129
	0.60%	493	130
	0.70%	497	131
	0.80%	501	132
	0.90%	505	133
	1.00%	509	134
	1.10%	513	135
	1.20%	517	136
	1.30%	522	137
	1.40%	526	138
	1.50%	531	140

Tabla 3. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.28g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.28	0.50%	424	120
	0.60%	427	120
	0.70%	430	121
	0.80%	434	122
	0.90%	437	123
	1.00%	440	124
	1.10%	444	125
	1.20%	447	126
	1.30%	450	127
	1.40%	454	128
	1.50%	458	129

Tabla 4. Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.30g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.30	0.50%	371	112
	0.60%	374	113
	0.70%	376	113
	0.80%	379	114
	0.90%	382	115
	1.00%	384	116
	1.10%	387	117
	1.20%	390	117
	1.30%	393	118
	1.40%	396	119
	1.50%	399	120

Tabla 5.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.32g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.32	0.50%	328	105
	0.60%	330	106
	0.70%	332	106
	0.80%	334	107
	0.90%	337	108
	1.00%	339	108
	1.10%	341	109
	1.20%	343	110
	1.30%	346	111
	1.40%	348	111
	1.50%	350	112

Tabla 6.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.34g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.34	0.50%	292	99
	0.60%	293	99
	0.70%	295	100
	0.80%	297	101
	0.90%	299	101
	1.00%	301	102
	1.10%	303	103
	1.20%	305	103
	1.30%	306	104
	1.40%	308	105
	1.50%	310	105

Tabla 7.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.36g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.36	0.50%	261	93
	0.60%	263	94
	0.70%	264	95
	0.80%	266	95
	0.90%	267	96
	1.00%	269	96
	1.10%	270	97
	1.20%	272	97
	1.30%	274	98
	1.40%	275	99
	1.50%	277	99

Tabla 8.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.38g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.38	0.50%	235	89
	0.60%	236	89
	0.70%	238	90
	0.80%	239	90
	0.90%	240	91
	1.00%	242	91
	1.10%	243	92
	1.20%	244	92
	1.30%	246	93
	1.40%	247	93
	1.50%	249	94

Tabla 9.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.40g del espectro IEEE nivel moderado, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.40	0.50%	213	84
	0.60%	214	85
	0.70%	215	85
	0.80%	216	86
	0.90%	217	86
	1.00%	218	86
	1.10%	220	87
	1.20%	221	87
	1.30%	222	88
	1.40%	223	88
	1.50%	224	89

Tabla 10.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.47g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	0.50%	594	281
	0.60%	597	282
	0.70%	599	283
	0.80%	602	285
	0.90%	604	286
	1.00%	607	287
	1.10%	610	288
	1.20%	613	290
	1.30%	615	291
	1.40%	618	292
	1.50%	621	294

Tabla 11.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.51g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.51	0.50%	508	260
	0.60%	510	261
	0.70%	512	262
	0.80%	514	263
	0.90%	516	264
	1.00%	518	265
	1.10%	521	266
	1.20%	523	267
	1.30%	525	268
	1.40%	527	269
	1.50%	529	270

Tabla 12.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.55g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.55	0.50%	440	241
	0.60%	441	242
	0.70%	443	243
	0.80%	445	244
	0.90%	446	245
	1.00%	448	246
	1.10%	450	247
	1.20%	451	248
	1.30%	453	249
	1.40%	455	250
	1.50%	457	251

Tabla 13.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.59g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.59	0.50%	384	225
	0.60%	385	226
	0.70%	387	227
	0.80%	388	228
	0.90%	389	229
	1.00%	391	229
	1.10%	392	230
	1.20%	394	231
	1.30%	395	232
	1.40%	396	233
	1.50%	398	234

Tabla 14.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.63g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.63	0.50%	338	212
	0.60%	340	212
	0.70%	341	213
	0.80%	342	214
	0.90%	343	214
	1.00%	344	215
	1.10%	345	216
	1.20%	346	216
	1.30%	347	217
	1.40%	349	218
	1.50%	350	219

Tabla 15.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.66g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.66	0.50%	300	199
	0.60%	301	200
	0.70%	302	200
	0.80%	303	201
	0.90%	304	202
	1.00%	305	202
	1.10%	306	203
	1.20%	307	204
	1.30%	308	204
	1.40%	309	205
	1.50%	310	206

Tabla 16.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.70g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.70	0.50%	269	188
	0.60%	269	189
	0.70%	270	189
	0.80%	271	190
	0.90%	272	190
	1.00%	272	191
	1.10%	273	192
	1.20%	274	192
	1.30%	275	193
	1.40%	276	193
	1.50%	277	194

Tabla 17.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.74g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.74	0.50%	241	178
	0.60%	242	179
	0.70%	243	179
	0.80%	243	180
	0.90%	244	180
	1.00%	245	181
	1.10%	246	181
	1.20%	246	182
	1.30%	247	182
	1.40%	248	183
	1.50%	248	183

Tabla 18.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para aceleración de 0.78g del espectro IEEE nivel alto, en coeficientes de fricción de 0.50% a 1.50%.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.78	0.50%	218	170
	0.60%	219	170
	0.70%	219	170
	0.80%	220	171
	0.90%	221	171
	1.00%	221	172
	1.10%	222	172
	1.20%	222	173
	1.30%	223	173
	1.40%	224	174
	1.50%	224	174

Tabla 19.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.50%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	0.50%	570	139
0.26		489	129
0.28		424	120
0.30		371	112
0.32		328	105
0.34		292	99
0.36		261	93
0.38		235	89
0.40		213	84

Tabla 20.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.60%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	0.60%	574	140
0.26		493	130
0.28		427	120
0.30		374	113
0.32		330	106
0.34		293	99
0.36		263	94
0.38		236	89
0.40		214	85

Tabla 21.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.70%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	0.70%	579	141
0.26		497	131
0.28		430	121
0.30		376	113
0.32		332	106
0.34		295	100
0.36		264	95
0.38		238	90
0.40		215	85

Tabla 22.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.80%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	0.80%	585	143
0.26		501	132
0.28		434	122
0.30		379	114
0.32		334	107
0.34		297	101
0.36		266	95
0.38		239	90
0.40		216	86

Tabla 23.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.90%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	0.90%	590	144
0.26		505	133
0.28		437	123
0.30		382	115
0.32		337	108
0.34		299	101
0.36		267	96
0.38		240	91
0.40		217	86

Tabla 24.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.00%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	1.00%	595	145
0.26		509	134
0.28		440	124
0.30		384	116
0.32		339	108
0.34		301	102
0.36		269	96
0.38		242	91
0.40		218	86

Tabla 25.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.10%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	1.10%	600	146
0.26		513	135
0.28		444	125
0.30		387	117
0.32		341	109
0.34		303	103
0.36		270	97
0.38		243	92
0.40		220	87

Tabla 26.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.20%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	1.20%	606	148
0.26		517	136
0.28		447	126
0.30		390	117
0.32		343	110
0.34		305	103
0.36		272	97
0.38		244	92
0.40		221	87

Tabla 27.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.30%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	1.30%	611	149
0.26		522	137
0.28		450	127
0.30		393	118
0.32		346	111
0.34		306	104
0.36		274	98
0.38		246	93
0.40		222	88

Tabla 28.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.40%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	1.40%	617	151
0.26		526	138
0.28		454	128
0.30		396	119
0.32		348	111
0.3		308	105
0.36		275	99
0.38		247	93
0.40		223	88

Tabla 29.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.50%, para aceleración de 0.24g a 0.40g del espectro IEEE nivel moderado.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.24	1.50%	623	152
0.26		531	140
0.28		458	129
0.30		399	120
0.32		350	112
0.34		310	105
0.36		277	99
0.38		249	94
0.40		224	89

Tabla 30.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.50%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	0.50%	594	281
0.51		508	260
0.55		440	241
0.59		384	225
0.63		338	212
0.66		300	199
0.70		269	188
0.74		241	178
0.78		218	170

Tabla 31.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.60%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	0.60%	597	282
0.51		510	261
0.55		441	242
0.59		385	226
0.63		340	212
0.66		301	200
0.70		269	189
0.74		242	179
0.78		219	170

Tabla 32.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.70%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	0.70%	599	283
0.51		512	262
0.55		443	243
0.59		387	227
0.63		341	213
0.66		302	200
0.70		270	189
0.74		243	179
0.78		219	170

Tabla 33.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.80%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	0.80%	602	285
0.51		514	263
0.55		445	244
0.59		388	228
0.63		342	214
0.66		303	201
0.70		271	190
0.74		243	180
0.78		220	171

Tabla 34.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 0.90%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	0.90%	604	286
0.51		516	264
0.55		446	245
0.59		389	229
0.63		343	214
0.66		304	202
0.70		272	190
0.74		244	180
0.78		221	171

Tabla 35.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.00%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	1.00%	607	287
0.51		518	265
0.55		448	246
0.59		391	229
0.63		344	215
0.66		305	202
0.70		272	191
0.74		245	181
0.78		221	172

Tabla 36.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.10%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	1.10%	610	288
0.51		521	266
0.55		450	247
0.59		392	230
0.63		345	216
0.66		306	203
0.70		273	192
0.74		246	181
0.78		222	172

Tabla 37.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.20%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	1.20%	613	290
0.51		523	267
0.55		451	248
0.59		394	231
0.63		346	216
0.66		307	204
0.70		274	192
0.74		246	182
0.78		222	173

Tabla 38.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.30%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	1.30%	615	291
0.51		525	268
0.55		453	249
0.59		395	232
0.63		347	217
0.66		308	204
0.70		275	193
0.74		247	182
0.78		223	173

Tabla 39.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.40%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	1.40%	618	292
0.51		527	269
0.55		455	250
0.59		396	233
0.63		349	218
0.66		309	205
0.70		276	193
0.74		248	183
0.78		224	174

Tabla 40.Radio de curvatura y desplazamiento relativo de dispositivo FPS, para coeficientes de fricción de 1.50%, para aceleración de 0.47g a 0.78g del espectro IEEE nivel alto.

Sa [g]	μ	R [cm]	Δ [cm]
0.47	1.50%	621	294
0.51		529	270
0.55		457	251
0.59		398	234
0.63		350	219
0.66		310	206
0.70		277	194
0.74		248	183
0.78		224	174

CAPÍTULO 3

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados

Para el espectro de diseño de moderado nivel de rendimiento de IEEE se obtuvieron los siguientes resultados:

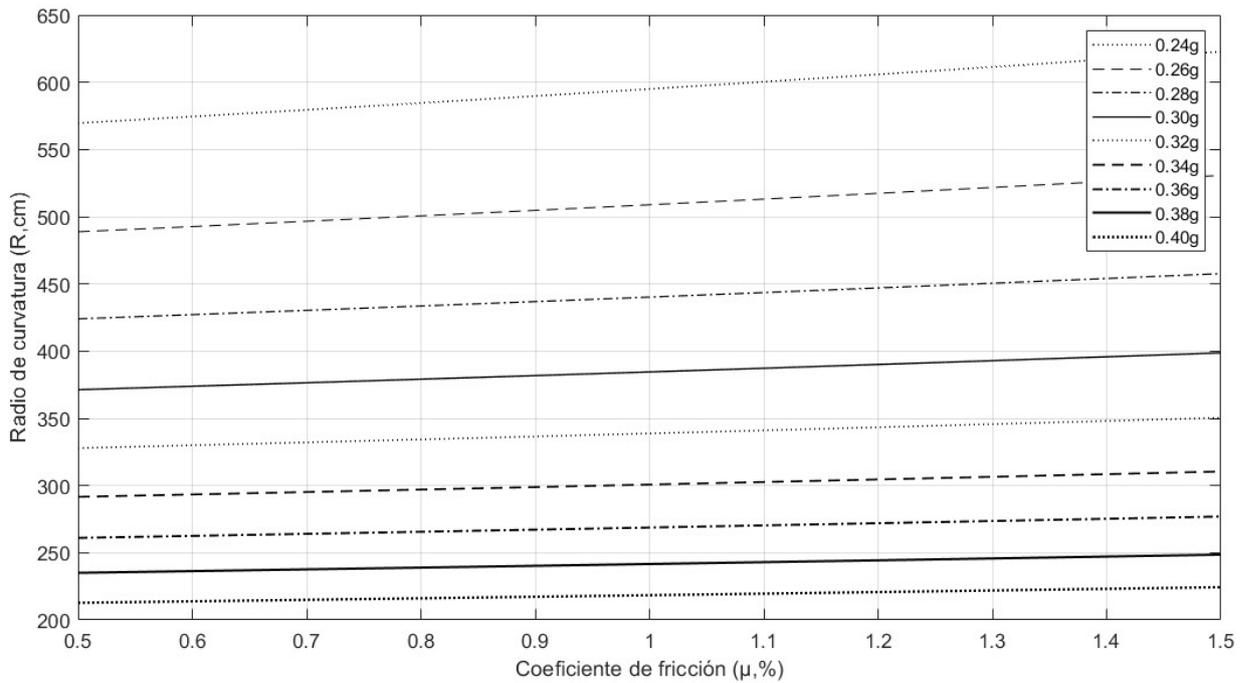


Ilustración 5. Variación del radio de curvatura en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel moderado.

La gráfica muestra cómo varía el radio de curvatura R en función del coeficiente de fricción μ , que varía entre 0.50 y 1.50%, para diferentes niveles de aceleración Sa del espectro de aceleraciones de la IEEE con la demanda de nivel moderado.

Se observa la tendencia al aumento del radio de curvatura con el aumento del coeficiente de fricción, además, el radio de curvatura, también aumenta a mayores aceleraciones.

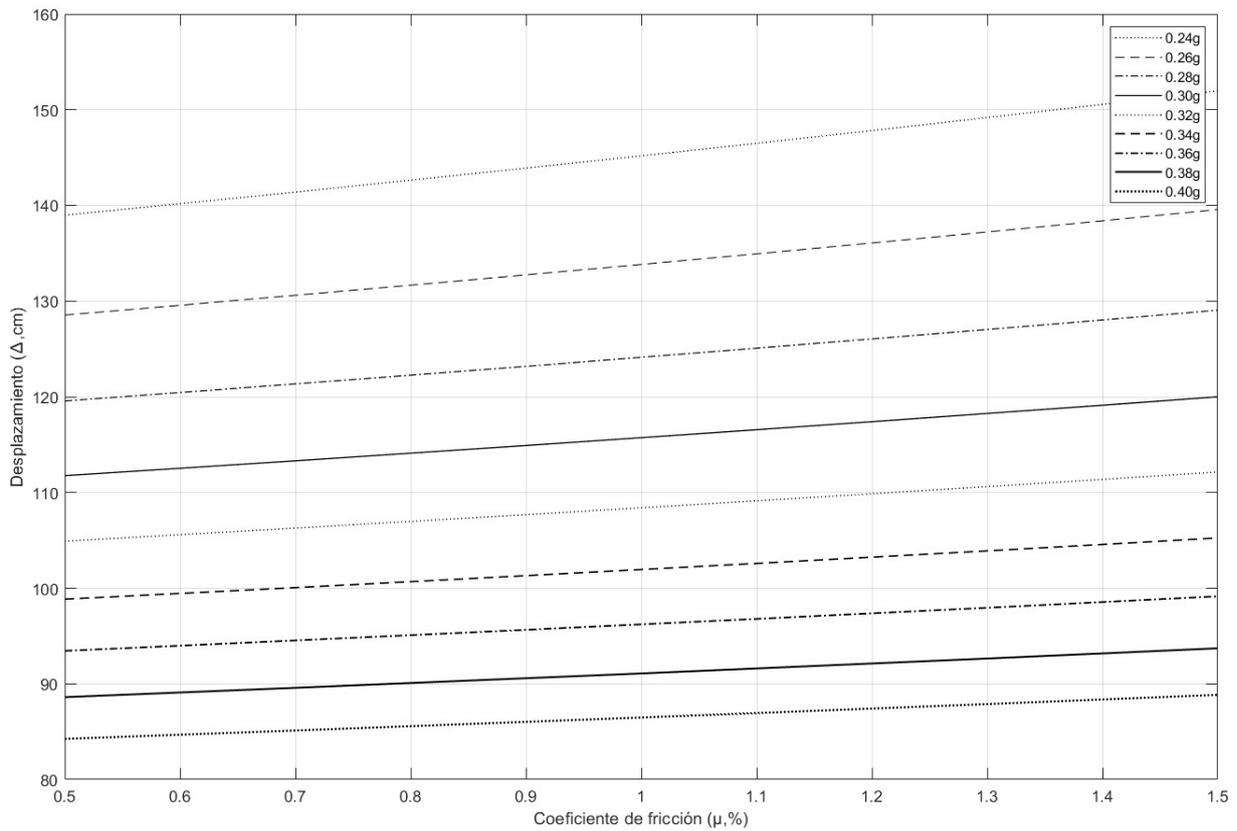


Ilustración 6. Variación del desplazamiento en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel moderado.

La gráfica muestra cómo varían los desplazamientos relativos Δ en función del coeficiente de fricción μ , que varía entre 0.50 y 1.50%, para diferentes niveles de aceleración S_a del espectro de aceleraciones del estándar IEEE con la demanda de nivel moderado.

Se observa la tendencia en el incremento de los desplazamientos en el incremento del coeficiente de fricción, pero a medida que las aceleraciones incrementan los desplazamientos disminuyen.

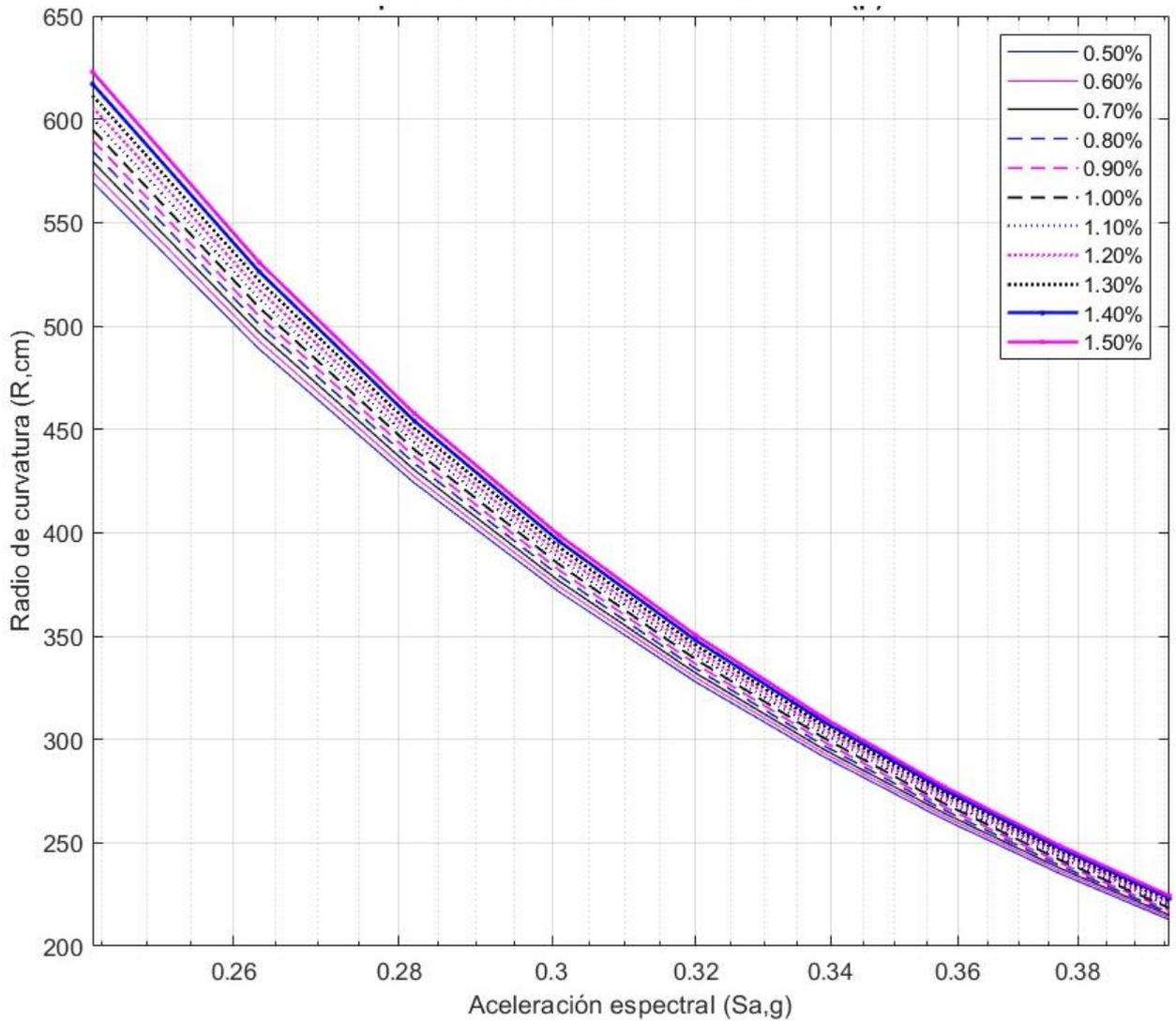


Ilustración 7. Variación del radio de curvatura en función de aceleraciones - IEEE nivel moderado, para diferentes coeficientes de fricción.

En la gráfica se analiza la variación del radio de curvatura R en función de la aceleración espectral S_a del espectro de aceleraciones definido por la IEEE para una demanda de nivel moderado, considerado aceleraciones en un rango de 0.24 a 0.40g, considerando coeficientes de fricción μ entre 0.50 y 1.50%.

La tendencia observada indica que el radio de curvatura disminuye progresivamente con el incremento de la aceleración espectral. Asimismo, aunque la influencia del coeficiente de fricción es relativamente menor, se evidencia que un aumento en este parámetro genera un incremento en el radio de curvatura.

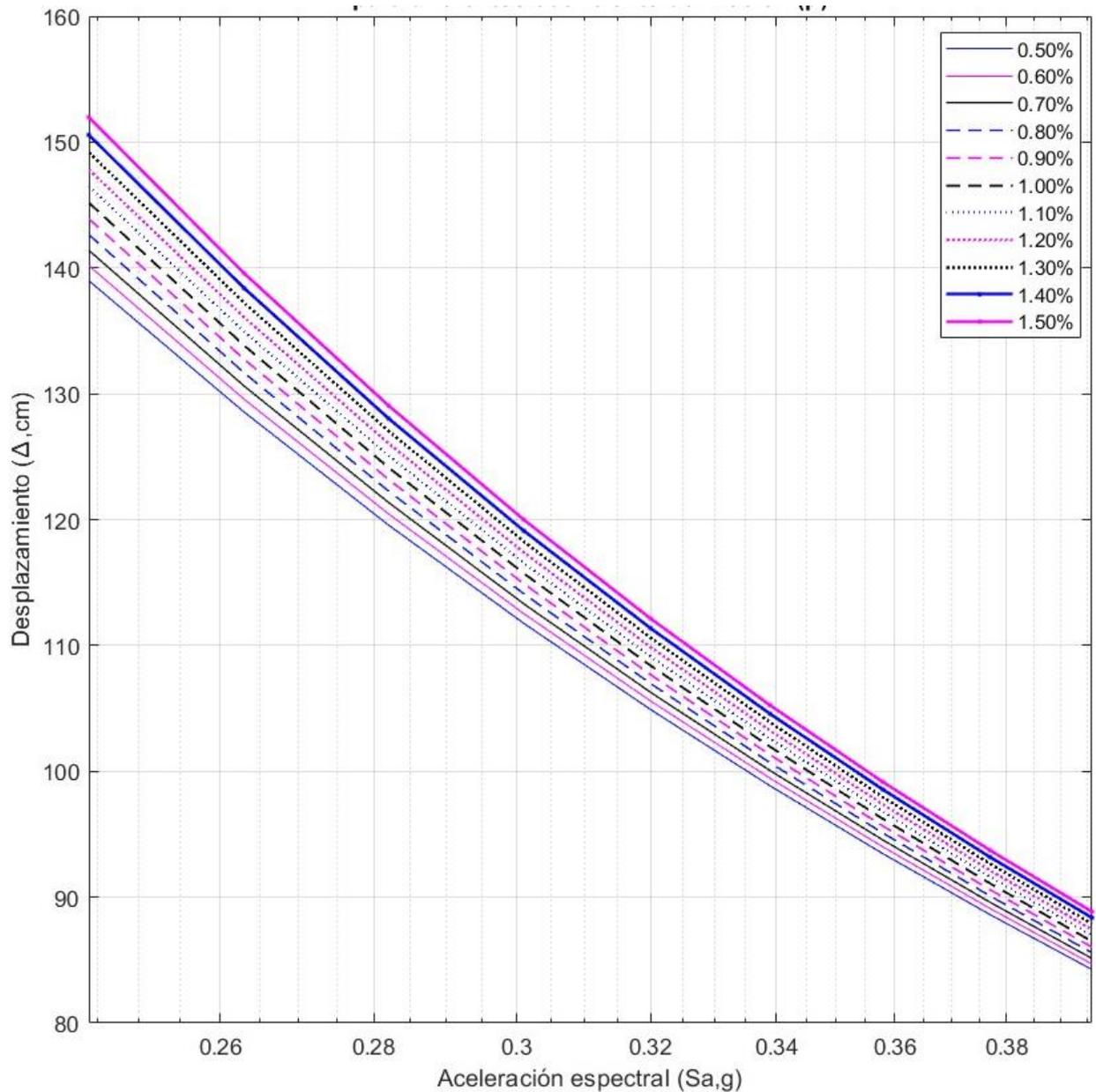


Ilustración 8. Variación del desplazamiento en función de aceleraciones - IEEE nivel moderado, para diferentes coeficientes de fricción.

En la gráfica se analiza la variación de desplazamientos relativos Δ en función de la aceleración espectral S_a del espectro de aceleraciones definido por el estándar IEEE para una demanda de nivel moderado, considerado aceleraciones en un rango de 0.24 a 0.40g, considerando coeficientes de fricción μ entre 0.50 y 1.50%.

La tendencia observada indica que el desplazamiento decrece progresivamente con el incremento de la aceleración espectral. Se observa también que, aunque la influencia del coeficiente de fricción es relativamente menor, se evidencia que un aumento en este parámetro genera un incremento en los desplazamientos.

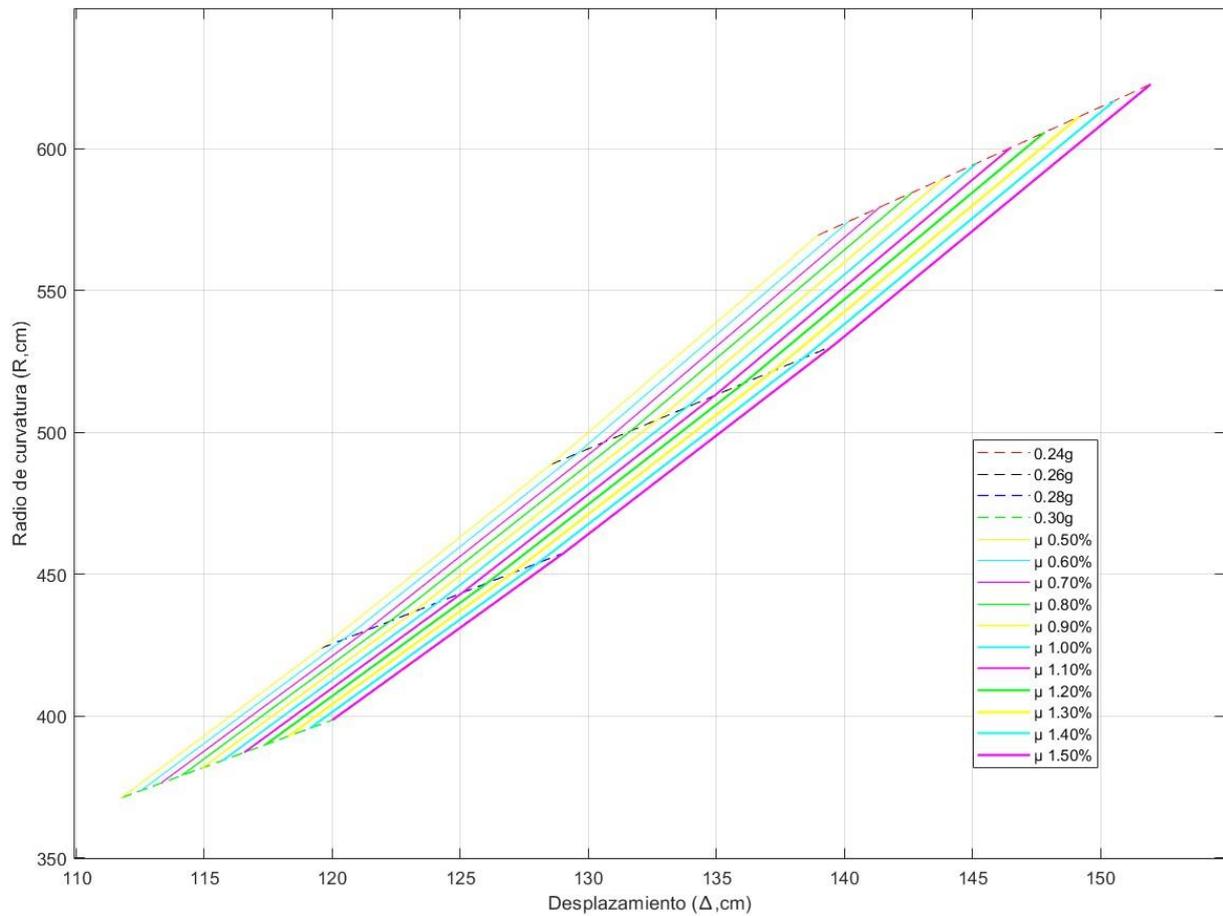


Ilustración 9. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel moderado.

La ilustración muestra a partir de una demanda de aceleración de diseño de entre 0.24 a 0.30g y coeficientes de fricción de 0.50 a 1.50%, los radios de curvatura óptimos y el desplazamiento.

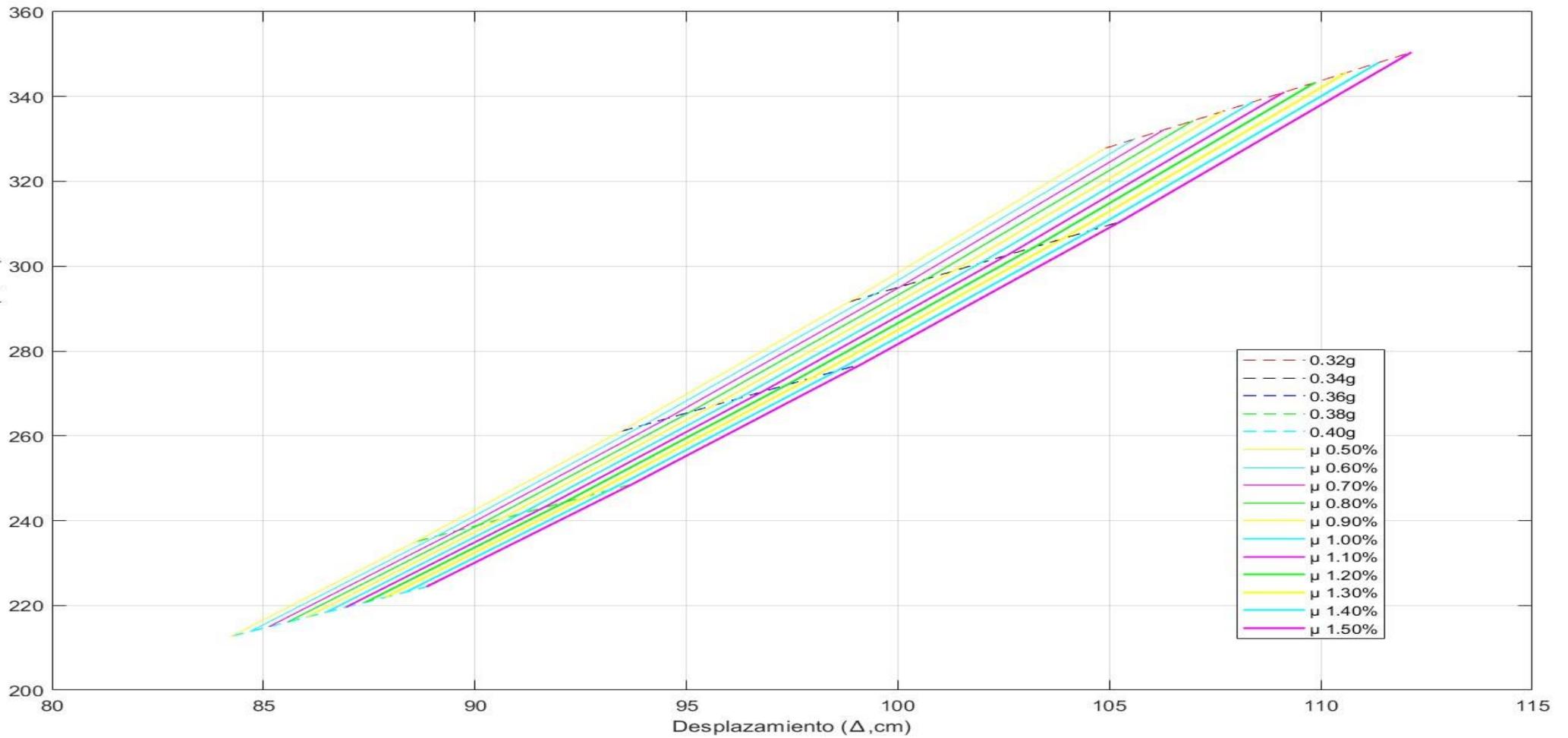


Ilustración 10. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel moderado.

La ilustración muestra a partir de una demanda de aceleración de diseño de entre 0.32 a 0.40g y coeficientes de fricción de 0.50 a 1.50 %, los radios de curvatura óptimos y el desplazamiento.

Para el Espectro de respuesta de alto nivel de rendimiento de IEEE se obtuvo los siguientes resultados:

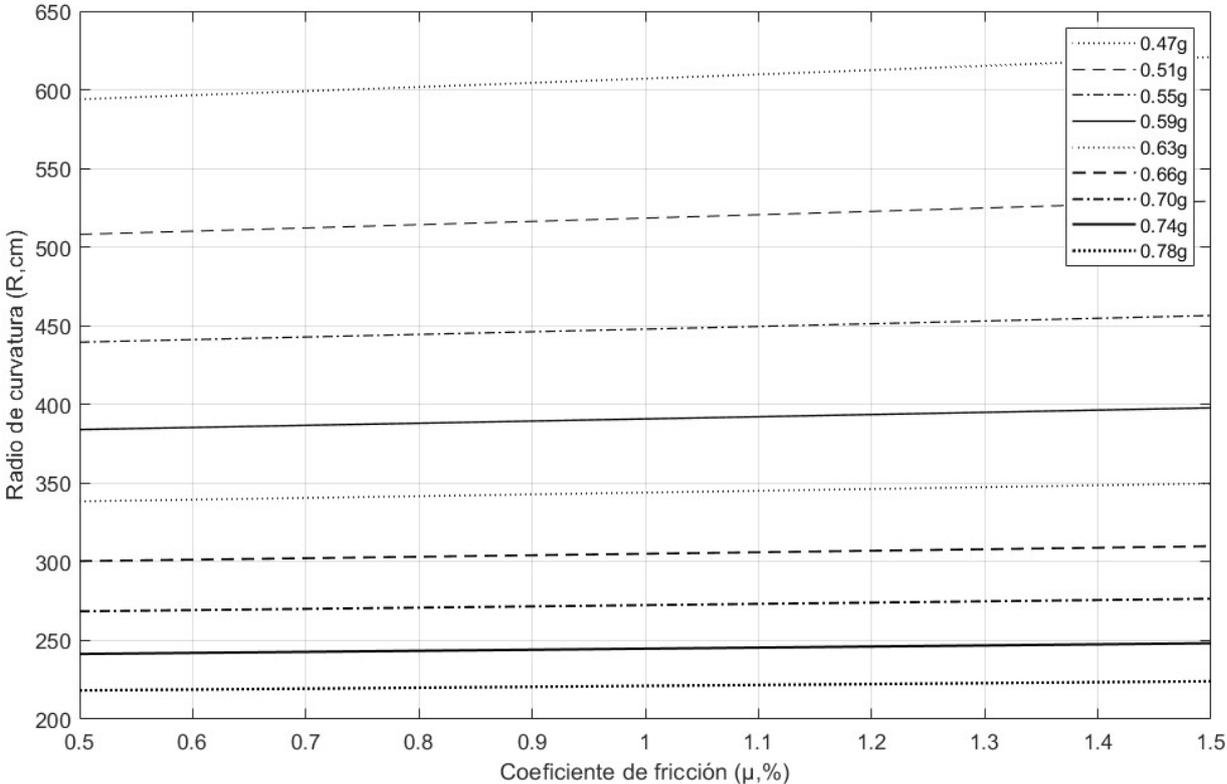


Ilustración 11. Variación del radio de curvatura en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel alto.

La gráfica muestra la variación del radio de curvatura R en función del coeficiente de fricción μ , que oscila entre 0.50 y 1.50%, considerando diferentes niveles de aceleración S_a del espectro de aceleraciones de la IEEE para una demanda de nivel alto.

Se observa una tendencia al incremento del radio de curvatura tanto con el aumento del coeficiente de fricción como con el incremento de las aceleraciones.

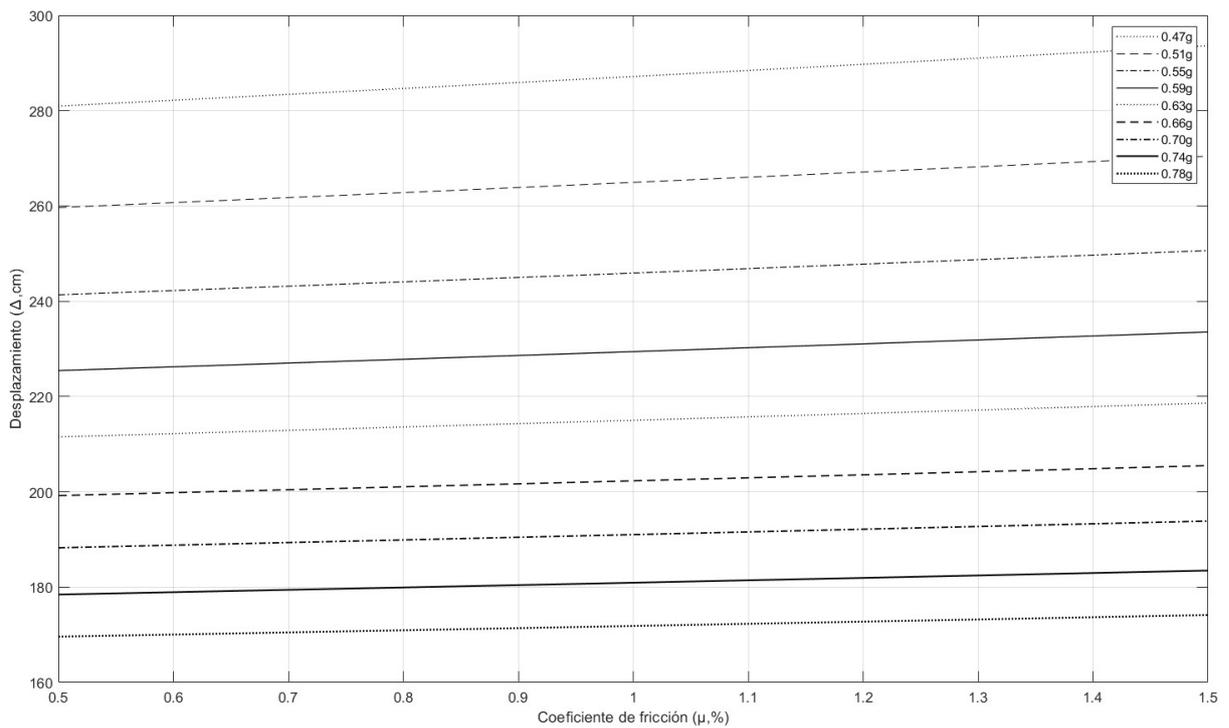


Ilustración 12. Variación del desplazamiento en función del coeficiente de fricción para diferentes aceleraciones - IEEE nivel alto.

La gráfica ilustra la variación de los desplazamientos relativos Δ en función del coeficiente de fricción μ , el cual oscila entre 0.50 y 1.50%, considerando diferentes niveles de aceleración S_a según el espectro de aceleraciones de la IEEE para una demanda de nivel alto.

Se evidencia que, al aumentar el coeficiente de fricción, los desplazamientos tienden a incrementarse. Sin embargo, este efecto se reduce a medida que las aceleraciones aumentan, resultando en un decrecimiento de los desplazamientos.

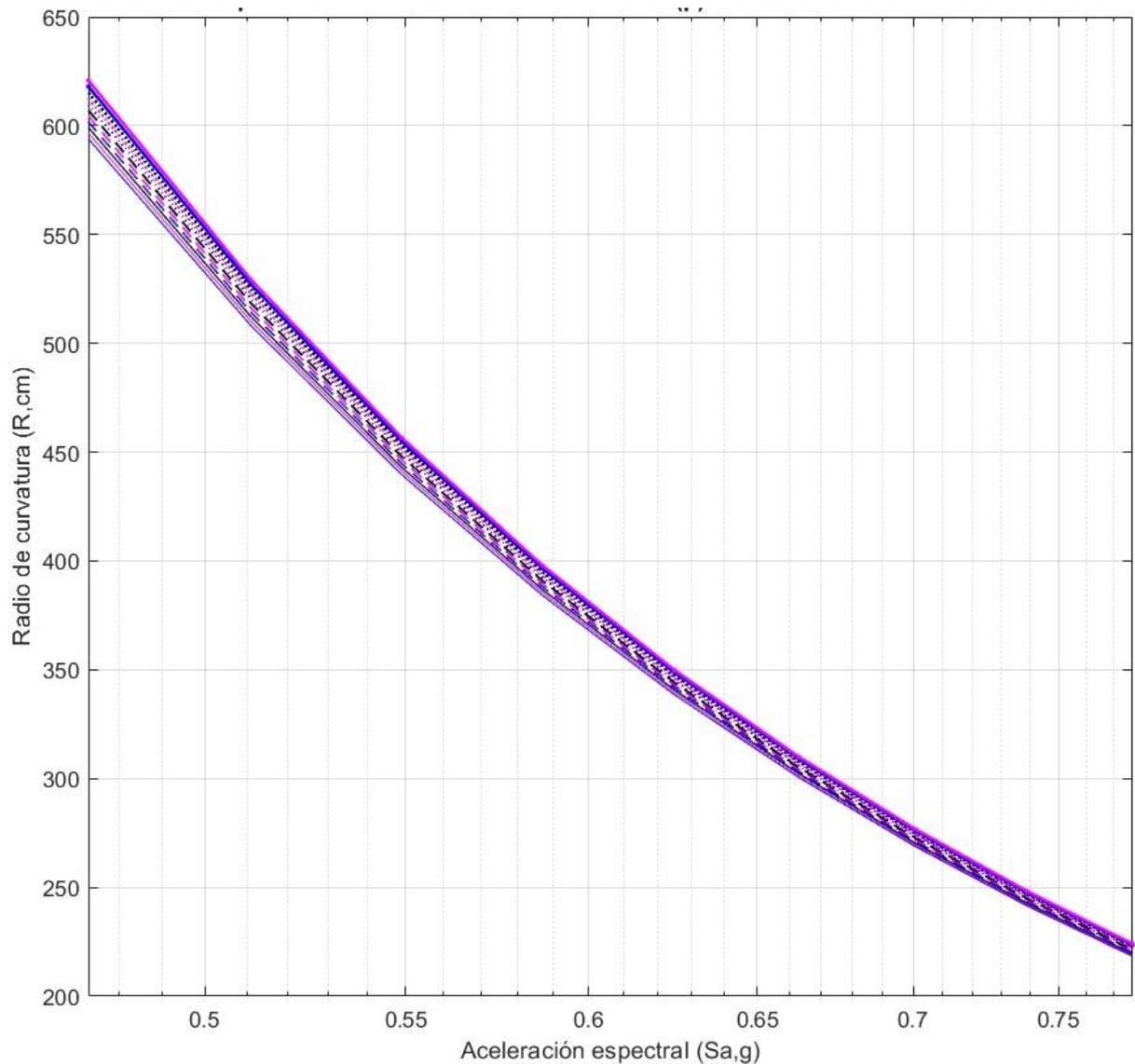


Ilustración 13. Variación del radio de curvatura en función de aceleraciones - IEEE nivel alto, para diferentes coeficientes de fricción.

La gráfica presenta la variación del radio de curvatura R en función de la aceleración espectral S_a , conforme al espectro de aceleraciones definido por la IEEE para una demanda de nivel alto, con valores comprendidos entre 0.47 y 0.78g, y coeficientes de fricción μ que varían de 0.50 a 1.50%.

Los resultados muestran una disminución progresiva del radio de curvatura a medida que aumenta la aceleración espectral. Adicionalmente, aunque la influencia del coeficiente de fricción es menos significativa, se observa que un incremento en este parámetro provoca un aumento del radio de curvatura.

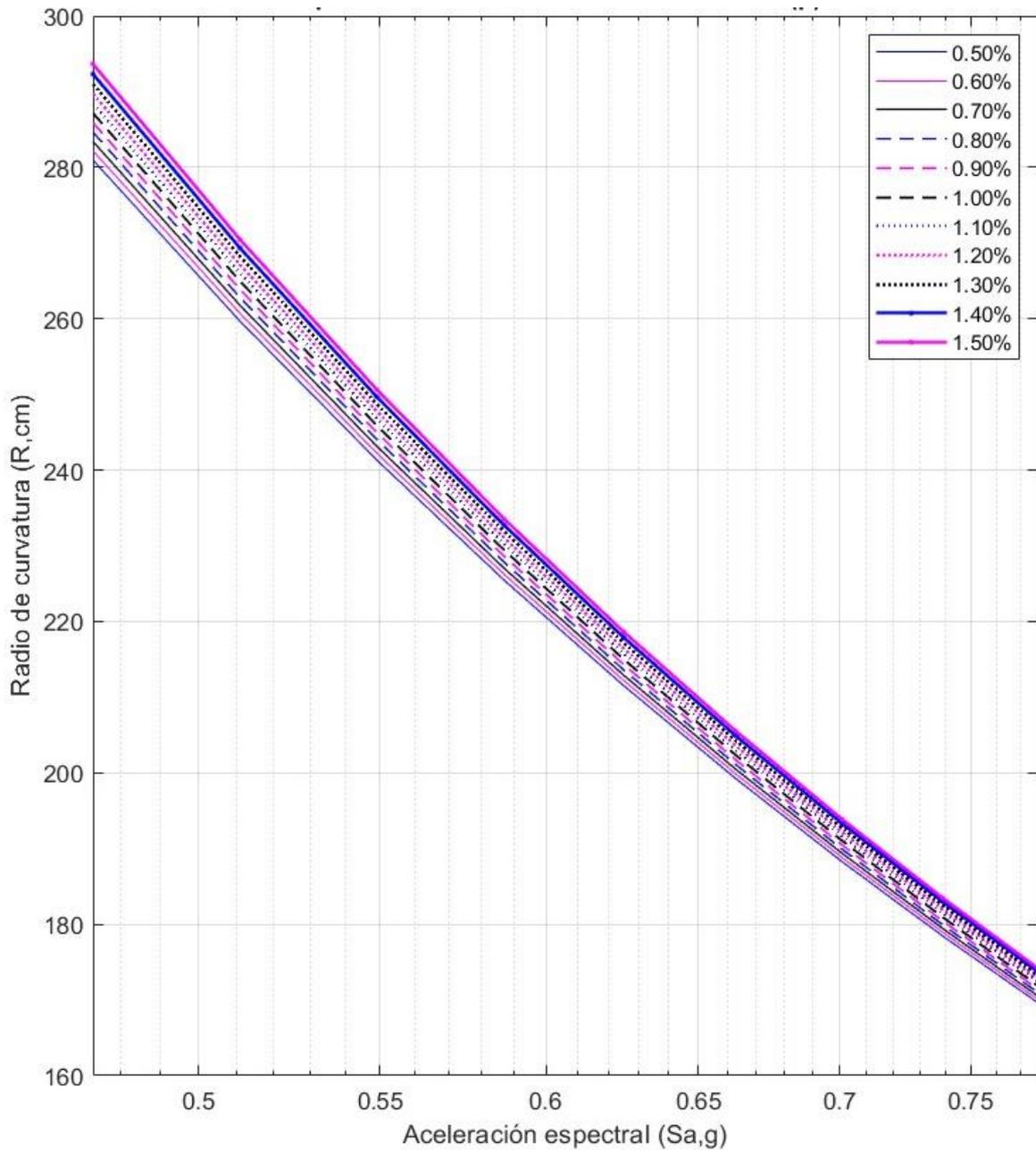


Ilustración 14. Variación del desplazamiento en función de aceleraciones - IEEE nivel alto, para diferentes coeficientes de fricción.

La gráfica muestra la variación de los desplazamientos relativos Δ en función de la aceleración espectral Sa , según el espectro de aceleraciones definido por el estándar IEEE para una demanda de nivel alto, con valores comprendidos entre 0.47 y 0.78g, y coeficientes de fricción μ que oscilan entre 0.50 y 1.50%.

Los resultados evidencian que los desplazamientos relativos disminuyen progresivamente a medida que aumenta la aceleración espectral. Asimismo, aunque la influencia del coeficiente de fricción es menos significativa, se observa que un incremento en este parámetro conlleva un aumento en los desplazamientos relativos.

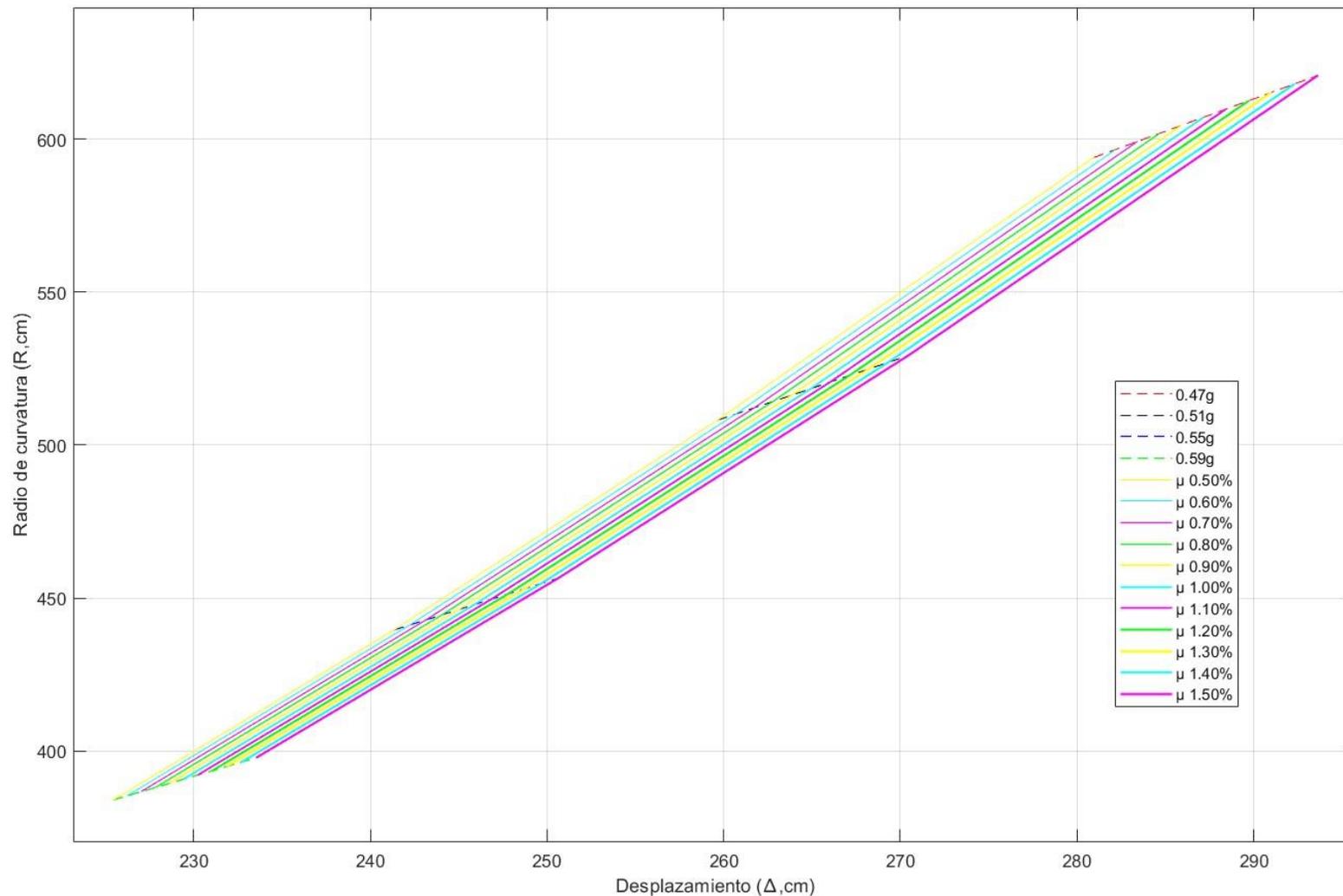


Ilustración 15. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel alto

La ilustración muestra a partir de una demanda de aceleración de diseño de entre 0.47 a 0.59g y coeficientes de fricción de 0.50 a 1.50 %, los radios de curvatura óptimos y el desplazamiento.

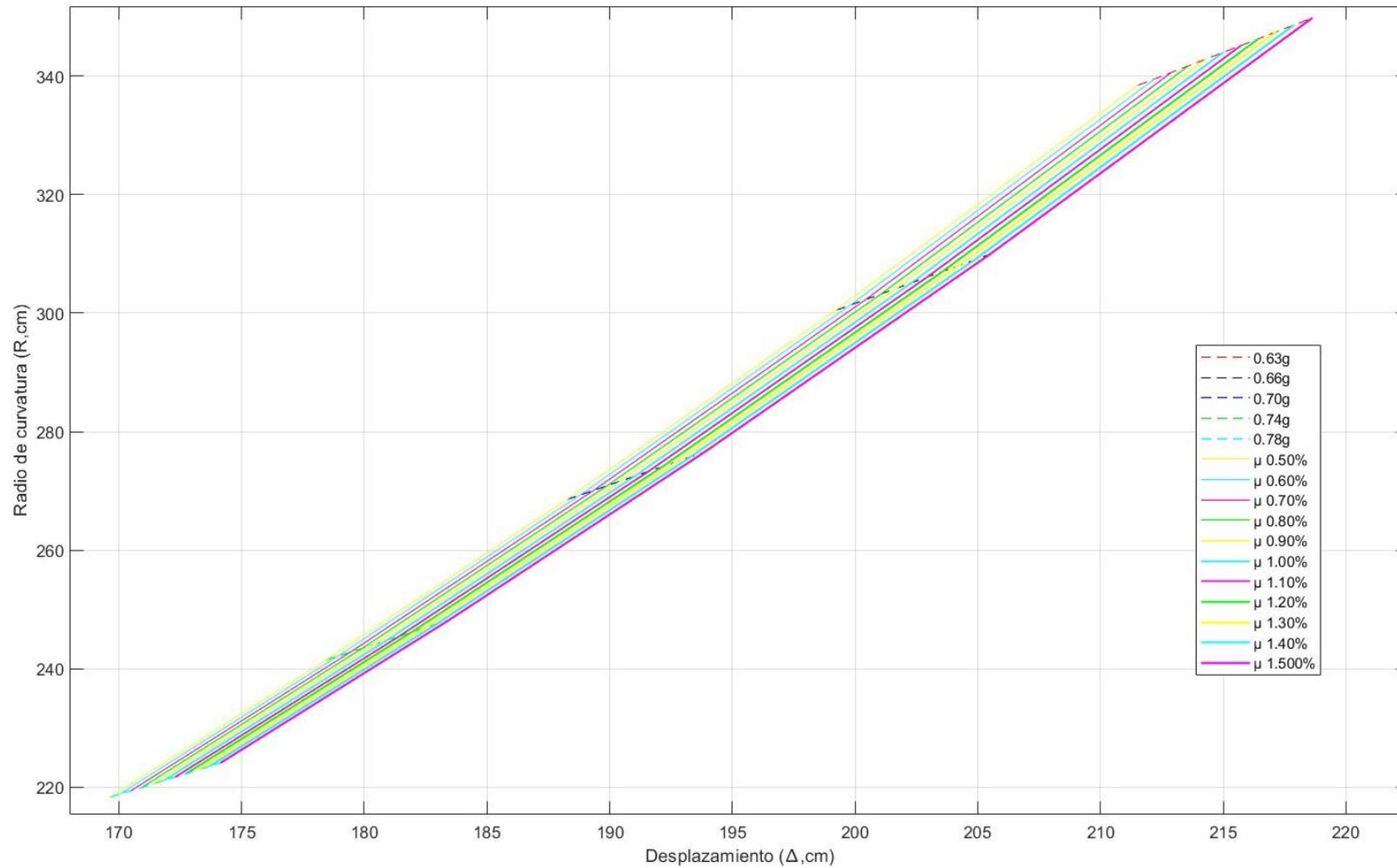


Ilustración 16. Diagrama de capacidad de aceleración y desplazamiento de respuesta espectral ADRS - IEEE nivel alto.

La ilustración muestra a partir de una demanda de aceleración de diseño de entre 0.63 a 0.78g y coeficientes de fricción de 0.50 a 1.5%, los radios de curvatura óptimos y el desplazamiento.

3.2 Análisis de resultados

Los resultados presentados reflejan una relación coherente entre las variables estudiadas: radio de curvatura R , desplazamientos relativos Δ , coeficiente de fricción μ , y aceleración espectral S_a , por lo que son consistentes con principios fundamentales de los sistemas de aislamiento sísmico (FPS).

A continuación, se presenta un análisis detallado de las tendencias observadas para los valores de aceleración en dos niveles de demanda del espectro de aceleraciones IEEE:

Nivel de demanda moderado: aceleraciones entre 0.24 y 0.40g.

Nivel de demanda alto: aceleraciones entre 0.47 y 0.78g.

Ambos casos se analizan considerando coeficientes de fricción que varían entre 0.50 y 1.50%.

Sobre la variación del radio de curvatura R y los desplazamientos relativos Δ en función del coeficiente de fricción μ , al analizarlo con respecto a las aceleraciones se identifica que:

Nivel de demanda moderado:

- El radio de curvatura necesario considerando una aceleración de 0.40g y un coeficiente de fricción de 0.50% es de 213cm siendo este el menor valor de radio registrado, el cual genera un desplazamiento de 84 cm.
- El radio de curvatura necesario considerando una aceleración de 0.24g y un coeficiente de fricción de 1.50% es de 623cm siendo este el mayor valor de radio registrado, el cual genera un desplazamiento de 152 cm.
- Los radios necesarios para una aceleración de 0.24g, considerando coeficientes de fricción de 0.50 y 1.50% son, 570 y 623 cm, respectivamente. Estos radios, a su vez, generan desplazamientos de 139 y 152 cm.

Nivel de demanda alto:

- El radio de curvatura necesario considerando una aceleración de 0.78g y un coeficiente de fricción de 0.50% es de 219cm siendo este el menor valor de radio registrado, el cual genera un desplazamiento de 170cm.
- El radio de curvatura necesario considerando una aceleración de 0.47g y un coeficiente de fricción de 1.50% es de 621cm siendo este el mayor valor de radio registrado, el cual genera un desplazamiento de 294cm.

- Los radios necesarios para una aceleración de 0.47g, considerando coeficientes de fricción de 0.50 y 1.50% son, 594 y 621cm, respectivamente. Estos radios, a su vez, generan desplazamientos de 281 y 294cm.

Análisis:

- Estos comportamientos se atribuyen a la relación directa entre la fricción y la capacidad del sistema de disipar energía, que requiere un mayor radio de curvatura para garantizar la transformación eficiente de energía cinética en energía potencial.
- La disminución en la aceleración conlleva un incremento en el radio de curvatura necesario, debido a que menores aceleraciones reducen la demanda cinética sobre el sistema, permitiendo que mayores radios sean efectivos para la disipación de energía.
- El aumento en el coeficiente de fricción implica un incremento en la disipación de energía por fricción, lo que exige un radio mayor para mantener el balance entre las fuerzas de fricción y la transformación de energía en el sistema.
- Para ambos niveles de demanda los desplazamientos relativos Δ aumentan imperceptiblemente con el incremento de μ .
- Los desplazamientos decrecen conforme la aceleración aumenta. Esto refleja una mayor capacidad del sistema para restringir movimientos relativos en condiciones de mayores aceleraciones.
- El coeficiente de fricción tiene un impacto moderado tanto en el radio como en los desplazamientos, pero su efecto es más relevante en sistemas con demandas de aceleración espectral moderadas.
- El incremento de la aceleración espectral genera tendencias opuestas en el radio y los desplazamientos obtenidos, lo que resalta la importancia de optimizar los parámetros de diseño para cada rango de demanda.
- La relación entre los parámetros evidencia que, para alcanzar un diseño sísmico eficiente, es crucial encontrar un equilibrio entre el coeficiente de fricción y el radio de curvatura, considerando las demandas específicas del espectro de aceleraciones y las características dinámicas del equipo.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

En esta sección se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo de este proyecto, enfocadas en la evaluación y optimización de (FPS) para equipos de baja masa. Estas conclusiones sintetizan los hallazgos más relevantes, destacando la efectividad de los métodos basados en energía para el diseño y análisis de dispositivos.

- a) Se confirma que los métodos basados en energía son efectivos para la implementación de (FPS). Para nivel de demanda moderado los resultados muestran que, con un coeficiente de fricción bajo de 0.50%, se obtuvieron radios de curvatura que varían entre 213 y 570cm, permitiendo optimizar la respuesta sísmica en aceleraciones espectrales de 0.40 a 0.24g, y controlando desplazamientos relativos en un rango de 84 a 139cm, de forma similar para nivel de demanda alto los resultados muestran que, con un coeficiente de fricción bajo de 0.50%, se obtuvieron radios de curvatura que varían entre 218 y 594cm, permitiendo optimizar la respuesta sísmica en aceleraciones espectrales de 0.47 a 0.78g, y controlando desplazamientos relativos en un rango de 170 cm a 281 cm.
- b) La variación del radio de curvatura en los (FPS) demostró que radios mayores favorecen una transformación más eficiente de energía cinética en energía potencial, lo que resulta en una reducción significativa de aceleraciones, con un leve incremento en los desplazamientos lo cual se puede controlar.
- c) La relación entre el radio de curvatura y el coeficiente de fricción muestra que, a medida que disminuye el coeficiente de fricción, se requiere un radio de curvatura menor, lo que a su vez contribuye a una reducción en los desplazamientos máximos del sistema.
- d) Se identifica configuraciones geométricas óptimas en función del radio de curvatura de la superficie de fricción, que minimizan los efectos del sismo, logrando un equilibrio entre control de desplazamientos y la transformación y disipación de energía.
- e) La metodología simplificada para el diseño de (FPS) a base de métodos de energía probó ser consistente con los resultados obtenidos mediante análisis estático equivalente, mostrando una alta correlación entre ambos enfoques.

4.2 Recomendaciones

A continuación, se expone una serie de recomendaciones diseñadas para fortalecer el desarrollo y la implementación de sistemas (FPS) aplicables a equipos de baja masa. Estas sugerencias están orientadas a abordar los desafíos identificados a lo largo de este estudio, así como a fomentar la exploración de nuevas líneas de investigación que contribuyan a la optimización del desempeño de dichos sistemas en diversos contextos. El propósito principal es promover soluciones más eficientes, versátiles y ajustadas a las características específicas de los equipos y las demandas sísmicas proyectadas.

- a) Explorar materiales avanzados para la superficie de fricción de los (FPS), que permitan reducir aún más los coeficientes de fricción.
- b) Proponer lineamientos simplificados para el diseño de sistemas (FPS) aplicables a equipos de baja masa, con recomendaciones específicas sobre la selección del radio de curvatura y el coeficiente de fricción según las condiciones del espectro sísmico, para lo cual los ADRS desarrollados en este proyecto de graduación pueden servir como una herramienta clave para guiar el proceso de diseño.
- c) Investigar el desempeño de los sistemas (FPS) en escenarios donde se combinen demandas sísmicas con otros factores como vibraciones por viento, cargas dinámicas de operación o impactos.
- d) Estudiar sistemas (FPS) con radios de curvatura que varíen de forma polinómica a lo largo de su recorrido.

BIBLIOGRAFÍA 5

- Akiyama, H. (1999). *Earthquake-resistant design method for buildings based on energy balance*. Gihodo Shuppan.
- Akiyama, H. (1985). *Earthquake-resistant limit-state design for buildings*. University of Tokyo Press.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2022). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-22)*. ASCE.
- ASCE. (2022). *ASCE/SEI 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- Bhuiyan, A. R., Okui, Y., Mitamura, H., & Imai, T. (2009). A rheology model of high damping rubber bearings for seismic analysis: Identification of nonlinear viscosity. *International Journal of Solids and Structures*, 46(7-8), 1778-1792.
- Bolt, B. A. (2004). *Earthquakes* (5th ed.). W.H. Freeman and Company.
- Cardone, D., & Dolce, M. (2005). Seismic isolation of light secondary systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 9(2), 137-171.
- Cardone, D., & Dolce, M. (2006). Mechanical behaviour of a seismic isolator for equipment with low vertical load. *Engineering Structures*, 28(4), 531-545.
- Constantinou, M. C., & Symans, M. D. (1993). Seismic response of structures with elastomeric isolation bearings. *Journal of Structural Engineering*, 119(5), 1610-1631.
- Chopra, A. K. (2007). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (3rd ed.). Pearson.
- Dolce, M., Cardone, D., & Ponzo, F. C. (2005). Shaking table tests on slender base-isolated objects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(6), 727-744.
- Foti, D., & Bozzo, L. (2011). Base isolation for seismic protection of electrical transformer equipment. *Shock and Vibration*, 18(6), 789-802.
- Housner, G. W., & Jennings, P. C. (1982). *Earthquake Design Criteria for Structures and Equipment in Nuclear Power Plants*. National Academy of Sciences.
- Hoshino, H., & Tatsuoka, F. (2005). Friction-based seismic isolation systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(13), 1619-1637.
- Kelly, J. M. (1997). *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. Springer.
- Mansouri, I., & Chopra, A. K. (2010). Seismic protection of sensitive equipment in critical facilities. En *Seismic design for safety and reliability: A handbook for engineers* (pp. 357-375). Wiley.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). Seismic isolation: History, applications, and future trends. *Journal of Structural Engineering*, 125(5), 511-521.
- Soong, T. T., & Constantinou, M. C. (1994). *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*. Springer.
- Sullivan, T. J., Priestley, M. J. N., & Calvi, G. M. (2012). *A model code for the displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.
- Tatsuoka, F., & Nakamura, S. (2002). Base isolation and seismic design for high-rise buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(10), 1819-1839.
- Takahashi, A., & Sakai, M. (2009). Analysis of friction pendulum system for seismic isolation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(11), 1277-1292.

- Whittaker, A. S., & Fenves, G. L. (1994). Seismic Isolation of Equipment and Nonstructural Components. Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering.
- Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., & He, T. (1998). Seismic performance of equipment and nonstructural components. *Journal of Structural Engineering*, 124(9), 1021-1028.
- Whittaker, A. S., & Fenves, G. L. (2006). Seismic isolation of critical infrastructure. In M. C. Constantinou & A. S. Whittaker (Eds.), *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Control* (pp. 437-459). Springer.
- Zayas, V. A., Low, S. S., & Mahin, S. A. (1990). The FPS earthquake resisting system: Experimental report. *Earthquake Spectra*, 6(2), 223-236.

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Santiago, 20 de diciembre de 2024

Ph. D.

Natividad Leonor García Troncoso

Coordinador(a) del Programa

Maestría en Estructuras Civiles Sismorresistentes

En su Despacho

De mi consideración:

Yo, **Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra**, de nacionalidad chilena, portador del pasaporte No. **F57267093**, en mi calidad de Tutor del Proyecto de Titulación correspondiente a la Maestría en **Estructuras Civiles Sismorresistentes**, I Cohorte, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), certifico lo siguiente:

Con fecha 5 de agosto del 2024, acepté la tutoría del/la estudiante María Alejandra Mera Mosquera con CI: 0605351923, para el desarrollo del proyecto de titulación denominado: “*Aplicación de Métodos Basados en Energía para Diseño de Dispositivos de Aislación Sísmica Friccional para Equipos de Baja Masa*”.

Certifico que este trabajo de titulación fue supervisado de manera continua durante todo su desarrollo, revisado en cada una de sus etapas y, finalmente, aprobado por mi persona en su versión final, entregada el día 17 de diciembre del 2024.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines pertinentes.

Atentamente,

Powered by  Firma electrónica avanzada
RODRIGO ALFONSO
RETAMALES SAAVEDRA
2024.12.21 16:55:29 -0300

Rodrigo Alfonso Retamales Saavedra

Tutor del Proyecto

Correo electrónico: roretama@espol.edu.ec; rodrigo.retamales@gmail.com