

Efectos de la variabilidad de factores estructurales y sísmicos en la fragilidad sísmica de postes de concreto armado en subestaciones eléctricas peruanas

Effects of variability in structural and seismic factors on the seismic fragility of reinforced concrete poles in Peruvian electrical substations

RECIBIDO: 24 DE MARZO DE 2025 | REVISADO: 25 DE AGOSTO DE 2025 | ACEPTADO: 03 DE SETIEMBRE DE 2025

JOSE OSCAR RUIZ ESQUIVEL¹

ABSTRACT

This study analyzes the seismic fragility of Peruvian electrical substations by applying fragility functions generated with multiple nonlinear dynamic time-history analyses, with respect to the structural variability of concrete compressive strength (f_c) and yield strength of the reinforcing steel (f_y), and the uncertainty in a seismic factor of peak ground acceleration (PGA). The study, with a quantitative approach and experimental design, was applied and explanatory in scope. The random method was considered for the generation of 2000 samples of structural factors and 2000 artificial accelerograms of spectro-compatible earthquakes compatible with real Peruvian signals. The calculations reveal that maximum displacements (D_{max}), maximum drifts (Δ_{max}) and shear forces at the base (V_b) are more conservative than in previous studies, attributable to nonlinear modeling with plastic hinges of different typologies and the cyclic effect of the earthquake. To define fragility, four damage states (ED) were proposed, with ED1 and ED2 presenting damage probabilities (PD) like those in previous studies. Upon inspection, ED3 and ED4 represent yielding and collapse, and it was observed that 50% of their PD are exceeded for PGA values greater than 0.24g and 0.53g, respectively. The proposed methodology demonstrated the influence of concrete and reinforcing steel on the structural response, generating coherent fragility curves that strengthen seismic assessment and earthquake risk management.

Keywords: fragility functions, electrical substation, structural and seismic variability

RESUMEN

El presente estudio analiza la fragilidad sísmica de subestaciones eléctricas peruanas mediante la aplicación de funciones de fragilidad generadas con múltiples análisis dinámicos de tiempo-historia no lineales, respecto a la variabilidad estructural de la resistencia a la compresión del concreto (f_c) y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (f_y), y la incertidumbre en un factor sísmico definido como la aceleración máxima del suelo (PGA). El estudio, de enfoque cuantitativo y diseño experimental, fue de tipo aplicado y alcance explicativo. Se consideró el método aleatorio para la generación de 2000 muestras de factores estructurales y 2000 acelerogramas artificiales de sismos espectro compatibles con señales reales peruanas. Los cálculos revelan desplazamientos máximos ($D_{máx}$), distorsiones angulares máximas ($\Delta_{máx}$) y fuerzas cortantes en la base (V_b) más conservadoras que en estudios previos, atribuibles al modelamiento no lineal con rótulas plásticas de distinta tipología y al efecto cíclico del sismo. Para definir la fragilidad, se propusieron cuatro estados de daño (ED) donde ED1 y ED2 presentaron probabilidades de daño (PD) similares a estudios pasados. Por inspección, ED3 y ED4 representan fluencia y colapso, y se observó que el 50% de sus PD son excedidos para valores de PGA superiores a 0.24g y 0.53g, respectivamente. La metodología propuesta evidenció la influencia del concreto y del acero de refuerzo en la respuesta estructural, generando curvas de fragilidad coherentes que fortalecen la evaluación sísmica y la gestión del riesgo frente a terremotos.

Palabras clave: funciones de fragilidad, subestación eléctrica, incertidumbre estructural y sísmica

¹Filiación institucional: Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú
Correspondencia: 2021007869@unfv.edu.pe
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2082-2496>

DOI: <https://doi.org/10.24039/rcv20251311938>

Introducción

La red de energía eléctrica (infraestructura) es uno de los sistemas más extensos y esenciales del mundo (Hinostroza, 2008), pues su eficiencia es crucial para el progreso económico, el bienestar público y la seguridad de cada nación. Sin embargo, la estabilidad de las redes de distribución eléctrica podría verse amenazada por factores como el cambio climático, los desastres naturales (Preston et al., 2016, p. 10), el aumento en la producción de energías renovables y la posibilidad de ataques cibernéticos (Marston, 2018). En particular, los terremotos pueden dañar múltiples elementos de la infraestructura eléctrica (Takada et al., 2004) y suelen ser los eventos con mayor probabilidad de provocar cortes de energía que duren varios días. Por ejemplo, el terremoto que sacudió Pisco (Ica) el 15 de agosto de 2007 fue uno de los peores desastres sísmicos que ha vivido Perú en los últimos tiempos (Organización Panamericana de Salud [OMS], 2010, p. 42).

En Perú, las principales redes de electrificación carecen de estudios y planes para evaluar y reducir su fragilidad sísmica, especialmente aplicados en subestaciones eléctricas (Baghmisheh & Mahsuli, 2021). Debemos reconocer que la operatividad de una red eléctrica es vital pasado un sismo y está fuertemente influenciada por la resistencia de los postes que soportan el cableado y los transformadores eléctricos (Office of Technology Assessment [OTA], 1990, p. 9). En la actualidad, existen estudios que se enfocan principalmente en la resistencia estática de los postes frente a la acción sísmica (Zeynalian & Khorasgani, 2018), por lo que esta investigación desarrolló modelos estructurales dinámicos para simular el comportamiento de postes de concreto armado ante sismos.

La capacidad y vulnerabilidad de un poste de concreto armado frente a un terremoto se ven afectadas por varios elementos como la arquitectura, el tipo de estructura, la calidad de los materiales (Marie-Victorie et al., 2006), el proceso constructivo, la edad, las alteraciones posteriores, etc. En este estudio, se analizó la calidad de la construcción aplicando la variabilidad en algunas propiedades mecánicas de los materiales como f'_c y f_y . Por otro lado, para considerar la incertidumbre en la acción sísmica (Bonett, 2003), se utilizaron acelerogramas artificiales creados con distintos niveles PGA.

El objetivo del estudio fue evaluar los efectos que produce la variabilidad de parámetros estructurales (f'_c y

f_y) y sísmicos (PGA) sobre la fragilidad sísmica de postes de concreto armado pertenecientes a subestaciones eléctricas peruanas.

El estudio aporta al marco teórico de la ingeniería sísmica al caracterizar probabilísticamente la fragilidad de subestaciones eléctricas mediante análisis no lineales tiempo-historia, incorporando variabilidad estructural y de demanda sísmica (Bakalis & Vamvatsikos, 2018). Metodológicamente, se empleó un enfoque probabilístico robusto con 2000 combinaciones aleatorias de propiedades mecánicas y acelerogramas espectro-compatibles, superando las limitaciones de modelos lineales (Pujades et al., 2025). En el ámbito profesional, los resultados constituyen insumos clave para ingenieros estructurales y autoridades, permitiendo definir umbrales de intervención y reforzamiento (Zareei et al., 2017).

Socialmente, este trabajo contribuye a la resiliencia de los sistemas energéticos, garantizando la continuidad del suministro tras sismos y alineándose con tres Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): la investigación aporta al fortalecimiento de infraestructuras resilientes, en particular las subestaciones eléctricas, que son vitales para la continuidad del suministro energético en el país (ODS 9: Industria, innovación e infraestructura); las subestaciones eléctricas forman parte del sistema urbano y regional, y su falla en caso de terremoto puede desencadenar apagones, afectando servicios críticos como hospitales, telecomunicaciones y transporte (ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles); y aunque enfocado en sismos, la metodología desarrollada se inscribe en la lógica de adaptación y resiliencia ante amenazas naturales, que se agudizan con el cambio climático (ODS 13: Acción por el clima).

Método

Enfoque, diseño, tipo y alcance de estudio

El estudio corresponde al tipo aplicado, de diseño experimental (Supo & Caverro, 2014), con enfoque cuantitativo y alcance explicativo (Hernández et al., 2014), para esclarecer causas en los fenómenos estudiados, de forma específica en la validación de correlaciones entre los indicadores f'_c con $D_{máx}$, f_y con $\Delta_{máx}$ y el PGA con el PD.

Población y muestra

Se aplicó la técnica de muestreo probabilístico aleatorio simple para determinar la proporción

poblacional de una cantidad infinita de subestaciones eléctricas (Arias, 2012). El tamaño mínimo de la muestra calculada fue de 1068 subestaciones eléctricas y se estimó a partir de la siguiente formulación:

$$n_0 = \frac{Z^2 P Q}{E^2}$$

Se aplicó la simulación Monte Carlo para generar 2000 muestras, incorporando la variabilidad de las propiedades estructurales (f'_c y f_y) y la incertidumbre sísmica (PGA). Se realizaron 100 repeticiones para cada uno de los 20 niveles de PGA elegidos, empleando acelerogramas artificiales ajustados al espectro

de diseño sísmico peruano. Dada la instalación independiente de los postes de concreto armado, se modeló un único poste como representación estructural conservadora. El modelamiento matemático se basó en los planos de diseño proporcionados por la empresa CCP Concreto Centrifugado Perú, cuyas características geométricas y mecánicas se muestran en la Tabla 1. Dichas características se relacionan con las especificaciones técnicas mínimas recomendadas por las instituciones peruanas de Luz del Sur (1987, 2005, 2008, 2010, 2011, 2012) y el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI, 2008).

Tabla 1

Propiedades físico-mecánicas de componentes estructurales en postes de concreto

Característica	Valor	Unidad	Fuente
Longitud total	13	m	
Longitud enterrada	2	m	
Diámetro interior en la base	215	mm	
Diámetro exterior en la base	375	mm	
Diámetro interior en la cima	40	mm	Luz del Sur (2010)
Diámetro exterior en la cima	180	mm	
Espesor del anillo en la base	80	mm	
Espesor del anillo en la cima	70	mm	
Peso del poste	16004	N	
Peso del transformador	18830	N	Luz del Sur (2012)
Peso de la plataforma	1765	N	Luz del Sur (2011)
Peso de la palomilla	1275	N	Luz del Sur (1987)
Peso de la ménsula	588	N	Luz del Sur (2005)
f'_c del poste	28	MPa	INDECOPI (2008)
f_y del poste	412	MPa	INDECOPI (2008)

La investigación consideró los valores de peso más críticos para cada elemento de concreto armado que soporta un poste: peso propio, mitad de transformador, una plataforma de soporte, mitad de palomilla y dos ménsulas, alcanzando un peso total aproximado de 28 998 N (2 957 kgf). Su sección transversal es troncocónica de concreto y acero de refuerzo longitudinal y transversal como se aprecia en la Figura 1, conforme a la norma NTP 341.031 – Grado 420, con varillas dispuestas de forma radial y uniforme.

Figura 1

Sección transversal reforzada en la base del poste de concreto armado



Análisis de las variables

La variable principal en estudio es la fragilidad sísmica de subestaciones eléctricas peruanas, definida como la estimación probabilística en términos de deterioro o falla estructural frente a solicitaciones sísmicas. La fragilidad sísmica ha sido medida en términos de la PD y sus magnitudes dependen de los indicadores $D_{\max}$, $\Delta_{\max}$ y ED. Se aplicaron fichas técnicas de recolección de datos que fueron validadas a través del "V" de Aiken aplicando la calificación dicotómica de tres jueces expertos. El "V" fue de 0.967, suficiente para aceptar la confiabilidad del instrumento, así como de los resultados que se colocaron dentro de las fichas técnicas.

La investigación apuntó a desarrollar una metodología que permitiera estimar la fragilidad sísmica de subestaciones eléctricas frente a la alteración de factores estructurales y sísmicos. La investigación definió cinco etapas metodológicas: modelamiento y definición de parámetros de comportamiento no lineal, estimación de curva de capacidad, generación de acelerogramas artificiales espectro-compatibles, análisis tiempo-historia no lineal y estudio de fragilidad sísmica. Para el análisis estadístico de los resultados, luego de aplicar el procedimiento antes descrito, se emplearon las regresiones lineal simple y polinómica, aplicadas a través de las herramientas proporcionadas por el programa Real Statistics como parte de una extensión gratuita y descargable para el software Microsoft Excel.

El comportamiento estructural de las subestaciones eléctricas, influenciado por las propiedades no lineales del concreto reforzado, se modeló mediante un enfoque fenomenológico con rótula plástica para simular la respuesta histerética (Haselton et al., 2016). Este método considera la aplicación de tres parámetros no lineales: rigidez efectiva (EI_y/EI_g) y las rotaciones plásticas inicial ($\theta_{cap.pl}$) y post colapso (θ_{pc}). El análisis se centró en la base del poste, zona de mayor degradación de resistencia y rigidez, según estudios previos (Baghmisheh & Mahsuli, 2021) y observaciones en el sismo de Ica de 2007.

Otro de los parámetros del modelo aplicado es el momento de fluencia M_y , cuyo valor se obtuvo a partir de la teoría de compatibilidad de deformaciones entre el concreto simple y el acero de refuerzo, considerando modelos constitutivos no lineales de los materiales. Haselton et al. (2016) recomiendan que se debe asumir

una relación de 1.13 para la proporción entre el momento máximo nominal (M_c) y M_y . Además, sugieren reducir la capacidad de rotación plástica en un 70% para $\theta_{cap.pl}$ y 50% en θ_{pc} para definir un comportamiento cíclico que simule la degradación de la rótula plástica luego de varios ciclos histeréticos (comportamiento cíclico del sismo).

La información obtenida permitió desarrollar un análisis no lineal de postes en subestaciones eléctricas mediante modelos con propiedades no lineales, simulación de fallas y riesgo de colapso progresivo (Guevara et al., 2006). Los puntos de fluencia y máxima capacidad se determinaron mediante un análisis estático no lineal (Pushover) implementado en un script para facilitar su procesamiento. El procedimiento incluyó un análisis gravitacional con propiedades físico-mecánicas típicas y cargas de la Tabla 1, seguido de 1000 pasos de Pushover con desplazamiento máximo de 1 m, aplicando la carga a 5.40 m de altura, donde se concentra la mayor masa.

El comportamiento no lineal de los materiales se modeló mediante una rótula plástica en la base, usando modelos trilineales para estimar el deterioro de resistencia y rigidez bajo respuesta histerética (Ibarra et al., 2005). La Figura 2 presenta la curva de capacidad y una subestación eléctrica típica soportada por dos postes de concreto armado. En la gráfica se identifican ED vinculados a niveles de desempeño sísmico, estimados según el deterioro o destrucción estructural, la seguridad de las personas y la funcionalidad posterior al evento (Rojas, 2019).

A partir de la observación en campo y la estimación de la capacidad de postes de concreto en subestaciones eléctricas construidas en Cañete (Ica), se plantearon cuatro ED definidos como ED1, ED2, ED3 y ED4 (Rojas, 2019). Este estudio consideró los lineamientos anteriores para delimitar la curva Pushover, tal como se puede apreciar en la Figura 2, donde los dos últimos ED representarían la fluencia y el colapso de la estructura.

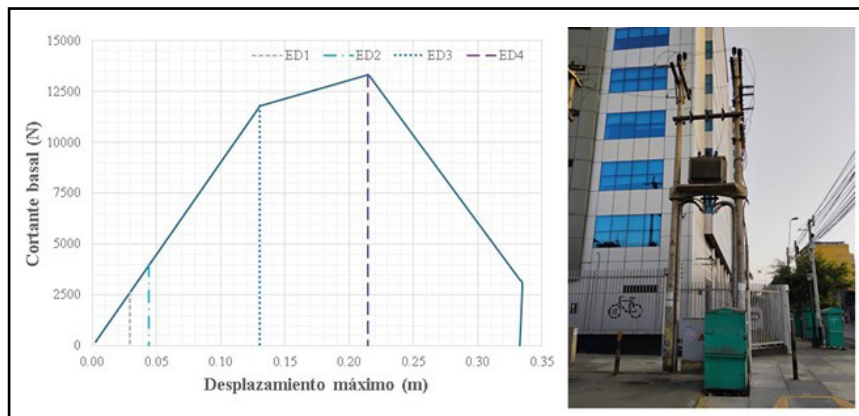
El componente estructural es tan esencial para el análisis como lo es el componente sísmico, y ante la limitada disponibilidad de registros peruanos, se generaron acelerogramas artificiales ajustados al espectro de diseño y a señales sísmicas reales de la zona de interés (Ferreira et al., 2020). El proceso consistió en calcular el espectro de respuesta de un registro real, obtener su Transformada de Fourier y modificar cada frecuencia según la relación entre la aceleración espectral

objetivo y la original. Tras iteraciones necesarias, se aplicó la Transformada de Fourier Invertida para

obtener el acelerograma final.

Figura 2

Poste de concreto armado (derecha) y su curva típica pushover (izquierda)



Para representar la variabilidad del movimiento sísmico, se seleccionaron 50 registros sísmicos peruanos, con componentes norte-sur y este-oeste, obteniendo 100 señales que fueron escaladas a 20 niveles de PGA (0.05g a 1.00g), generando 2000 muestras. Los registros, procedentes de REDACIS y con magnitudes Mw, Mb y MI, cubren eventos entre 1966 y 2024. Tras crear acelerogramas artificiales, se ejecutó un análisis tiempo-historia no lineal, calculando $D_{m\acute{a}x}$ y $\Delta_{m\acute{a}x}$ en la cima del poste de concreto armado. Con los $\Delta_{m\acute{a}x}$ se desarrollaron funciones de fragilidad asociadas a los estados de daño de la Figura 2.

Entre los métodos disponibles para la estimación de funciones de fragilidad, los analíticos suelen emplear un ajuste lognormal de parámetros de daño, como $D_{m\acute{a}x}$ o $\Delta_{m\acute{a}x}$, para estimar la PD de un ED ante una variable sísmica, como el PGA (Bonett, 2003). Este concepto puede ser expresado a partir de la siguiente ecuación:

$$P(ED \geq ED_i / PIS) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{PIS, ED_i}} \ln \left(\frac{PIS}{PIS_i} \right) \right]$$

Donde $P(ED \geq ED_i / PIS)$ viene a ser la probabilidad de excedencia de un cierto ED_i ; y PIS y β_{PIS, ED_i} representan la media y la desviación estándar del logaritmo natural del parámetro de intensidad sísmica (PIS).

Como parte del desarrollo del estudio, se elaboraron scripts en Python utilizando las librerías OpenSees (McKenna et al., 2010) y OpenSeesPy, los cuales permitieron, en primer lugar, calcular el momento de fluencia (My) mediante el método de fibras de materiales no lineales conformantes, para luego llevar a cabo el análisis Pushover y la simulación tiempo-

historia no lineal, asegurando la automatización y la reproducibilidad del proceso computacional.

Resultados

Curva de capacidad

El primer resultado obtenido es la curva de capacidad de un poste de concreto armado con propiedades físicas y mecánicas, de acuerdo con las especificaciones técnicas de la empresa CCP Concreto Centrifugado Perú. En la Tabla 2 se pueden apreciar límites de $D_{m\acute{a}x}$, V_b y $\Delta_{m\acute{a}x}$ que definieron cuatro ED sugeridos por Rojas (2019), que van de la mano con lo observado en la Figura 2 (izquierda).

Tabla 2

Resultados del análisis Pushover en términos de indicadores de daño

ED	$D_{m\acute{a}x}$ (m)	V_b (N)	$\Delta_{m\acute{a}x}$ (m/m)
ED1	0.0295	2669	0.002657
ED2	0.0442	4004	0.003986
ED3	0.1305	11806	0.011753
ED4	0.2147	13346	0.019341

Funciones de fragilidad

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 2, es posible estimar funciones de fragilidad relacionadas con los límites de $\Delta_{m\acute{a}x}$, tal como se aprecia en la Figura 3. Por medio de estas gráficas se obtuvieron PD para cada ED definido con anterioridad. En la Tabla 3 se presentan ciertos valores de PD calculados para los 20 niveles de PGA que representan la acción dinámica del sismo.

Figura 3
Funciones de fragilidad para cuatro diferentes ED

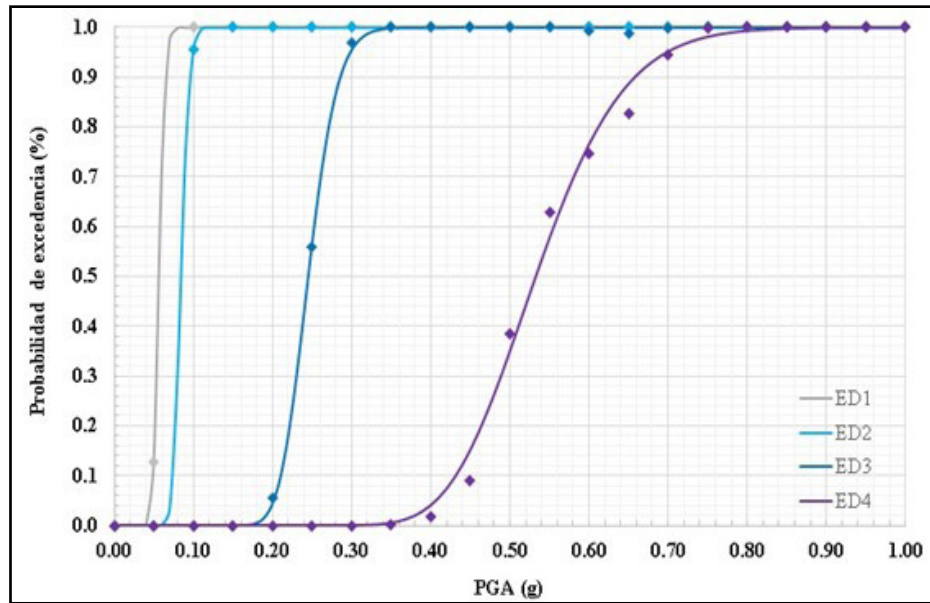


Tabla 3
Valores de PD para cuatro diferentes ED

PGA	ED1	ED2	ED3	ED4	PGA	ED1	ED2	ED3	ED4
0.05	12.87%	0.00%	0.00%	0.00%	0.55	0.00%	0.00%	42.27%	57.73%
0.10	4.39%	95.61%	0.00%	0.00%	0.60	0.00%	0.00%	23.43%	76.57%
0.15	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.65	0.00%	0.00%	11.27%	88.73%
0.20	0.00%	95.61%	4.39%	0.00%	0.70	0.00%	0.00%	4.81%	95.19%
0.25	0.00%	43.46%	56.54%	0.00%	0.75	0.00%	0.00%	1.86%	98.14%
0.30	0.00%	4.51%	95.46%	0.02%	0.80	0.00%	0.00%	0.66%	99.34%
0.35	0.00%	0.14%	99.33%	0.53%	0.85	0.00%	0.00%	0.22%	99.78%
0.40	0.00%	0.00%	95.94%	4.06%	0.90	0.00%	0.00%	0.07%	99.93%
0.45	0.00%	0.00%	84.77%	15.23%	0.95	0.00%	0.00%	0.02%	99.98%
0.50	0.00%	0.00%	65.00%	35.00%	1.00	0.00%	0.00%	0.01%	99.99%

Pruebas de correlación y ajuste de indicadores

Ahora que contamos con todos los resultados, es posible desarrollar pruebas estadísticas de regresiones lineales y polinómicas entre las variables para observar su relación. Los resultados en términos de f^c , f_y , PGA, $D_{máx}$, $\Delta_{máx}$ y PD fueron sometidos a un análisis estadístico, donde se comprobó su normalidad a través de la prueba Kolmogorov-Smirnov bajo un nivel de significancia del 5%.

En la Figura 4 se observan ejemplos del ajuste en regresión lineal entre las variables f^c y $D_{máx}$ con dos PGA de 0.10g y 0.25g. El ajuste entre estos indicadores presenta un modelo adecuado, a pesar de que el coeficiente R^2 es bajo; ello se evidencia en la

homocedasticidad dentro de la distribución de sus residuos (derecha). Además, los valores de probabilidad para los coeficientes independientes y dependientes son menores al 5% como porcentaje de significancia.

La Figura 5 muestra ejemplos del ajuste lineal para las variables f_y y $\Delta_{máx}$ con dos PGA de 0.15g y 0.30g. En el caso de estos indicadores, a pesar de tener homocedasticidad en la distribución de sus residuos (derecha), se aprecian muy bajos valores en los coeficientes R^2 y los valores de la probabilidad varían en más del 5% para el término dependiente y en menos del 5% para el término independiente dentro de la regresión lineal.

Figura 4
Regresión lineal de f_c vs $D_{máx}$ (0.10g y 0.25g de intensidad)

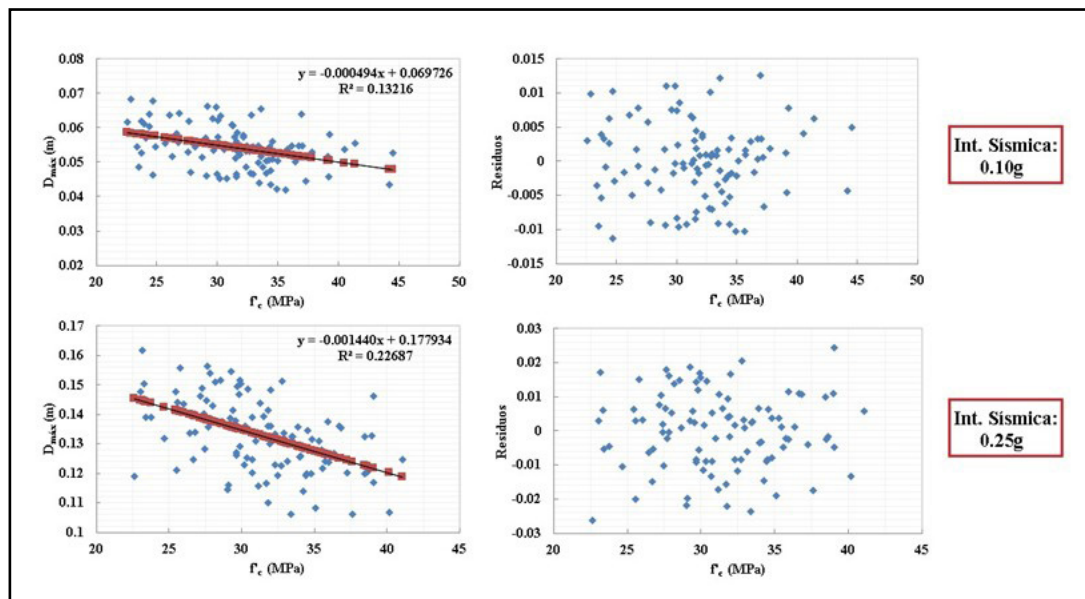
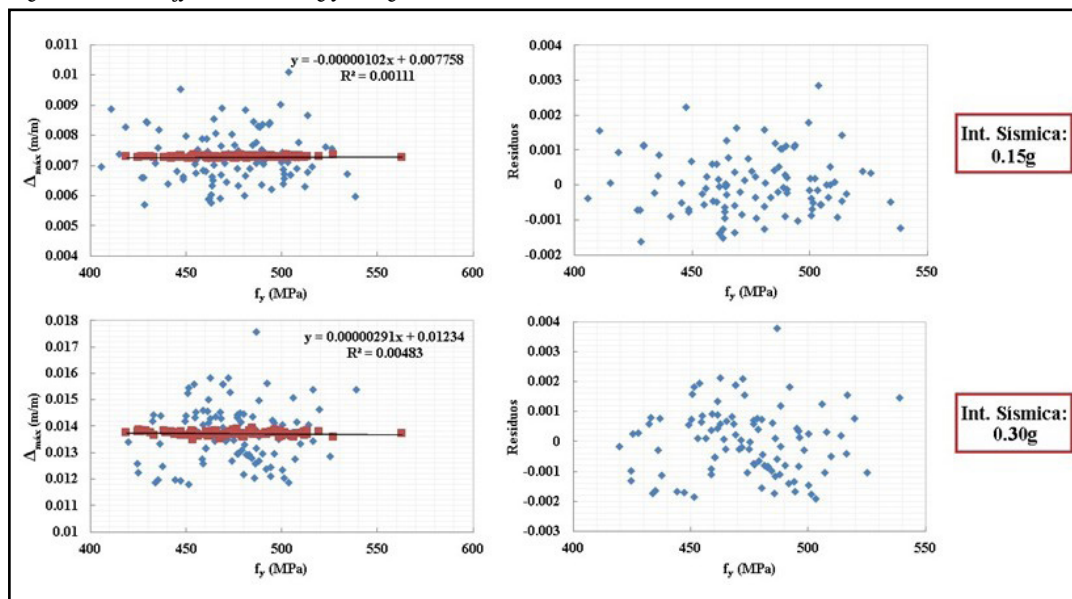


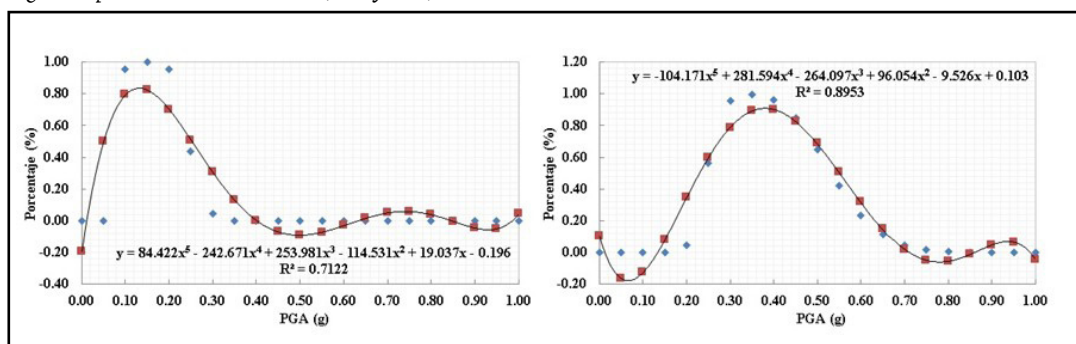
Figura 5
Regresión lineal de f_y vs $\Delta_{máx}$ (0.15g y 0.30g de intensidad)



La Figura 6 muestra la aplicación de regresión polinómica de quinto grado entre los factores PGA y PD para ED2 y ED3. La relación entre variables presenta un alto valor de ajuste R^2 , adecuado y mayor al 70%, y valores de probabilidad menores al 5% de significancia para todos los coeficientes, tanto del término independiente

como de los términos dependientes en cada grado descrito.

Figura 6
Regresión polinómica de PGA vs PD (ED2 y ED3)



Discusión

Los $\Delta m_{\max}$ calculados en este estudio para cuatro distintos ED varían entre 0.0295 m y 0.2147 m, mientras que las $\Delta m_{\max}$ se encuentran en un intervalo de 0.002657 m/m a 0.019341 m/m. En contraste, Rojas (2019) estimó un rango de $\Delta m_{\max}$ que varía entre 0.053 m y 0.344 m, y un intervalo de $\Delta m_{\max}$ que cambia de 0.0045 m/m a 0.0294 m/m en los mismos niveles de ED definidos con anterioridad. A partir de esta información se observa que el presente estudio obtiene valores más conservadores que los encontrados en la bibliografía de consulta y se estima un comportamiento estructural con menor capacidad de deformación. La diferencia se debe básicamente al efecto introducido en el modelamiento y a las características particulares de la rótula plástica (Le & Pham, 2024) utilizada en ambas investigaciones para representar el comportamiento no lineal de las estructuras a través del control y propagación de mecanismos de daño en el concreto armado (Faleiro et al., 2010).

Por otro lado, la fuerza cortante máxima en la base calculada por Rojas (2019) tuvo una magnitud de 21955 N frente al valor de 13346 N derivado del presente estudio. Se contrasta que la fuerza cortante del poste de concreto se redujo en un 40% entre lo calculado por esta investigación y el antecedente mencionado. La variación se origina principalmente en la manera en que cada estudio incorporó zonas de deformación concentrada (Sayed et al., 2024) para simular la respuesta inelástica del sistema estructural. Otra de las razones que explican el cambio en las magnitudes de la fuerza cortante basal fue el comportamiento estático asumido por Rojas (2019) y el efecto cíclico, natural y perjudicial que presentan los sismos en condiciones reales (Park et al., 2024) aplicado en este trabajo de investigación.

Las funciones de fragilidad estimadas en este estudio para cuatro distintos ED fueron desarrolladas a partir de un estado límite que considera una fisuración sencilla de reparar (daños menores) hasta un estado límite superior que representa colapso parcial o total del poste de concreto reforzado (daños irreparables). Al comparar los resultados del trabajo actual con los obtenidos por Rojas (2019), se observó una tendencia gráfica muy similar para los dos primeros ED calculados entre 0.05g y 0.10g de PGA; lo que permitiría obtener PD idénticos en ese rango de aceleraciones para ambos estudios. La similitud en estos primeros resultados se debe principalmente a que ED1 y ED2 se encuentran en la zona de respuesta elástica lineal y sus deformaciones son recuperables (Kristiawan et al., 2022) en comparación con los dos límites posteriores donde existe daño progresivo irreparable (Bonett, 2003).

En el caso del ED3, considerado un estado de fluencia del material tanto para este estudio como para Rojas (2019), se observó un cambio brusco de las funciones entre los límites de 0.20g y 0.35g desde la probabilidad nula hasta el 100% de PD. Para el ED4, definido como estado de colapso, los porcentajes cambiaron de la siguiente forma: Rojas (2019) calculó una función que inicia su variación en 0.40g a partir de un PD nulo y luego no establece un límite máximo del 100% en el PD, aun cuando el PGA alcanza un valor de 1.00g. En contraste con el actual estudio, la curva de fragilidad que representa el colapso está ligada al desarrollo del ED4 que inicia su cambio en 0.35g para un PD nulo y culmina en 0.80g con PD completo al 100%. El ED4 de Rojas (2019) es cuestionable, porque ante un nivel de amenaza equivalente a 1.00g de PGA, cualquier estructura con las características que presentan los postes de concreto armado tendría que colapsar frente a los efectos de tan alta demanda sísmica (Baghmisheh & Mahsuli, 2021).

Es importante destacar que el contraste en la etapa de discusión se circunscribió a un antecedente particular (Rojas, 2019), al ser el único referente nacional e internacional que abordó el análisis estructural de postes troncocónicos de concreto armado centrifugado con propiedades físico-mecánicas y condiciones de carga sísmica equivalentes a las del presente trabajo de investigación.

Conclusiones

Se propone una metodología para evaluar la fragilidad sísmica de subestaciones eléctricas mediante funciones de fragilidad que incorporan la incertidumbre estructural y sísmica. El análisis se centró en postes de concreto armado, considerando como variables f'_c , f_y y el PGA. La incertidumbre en las propiedades mecánicas y la acción sísmica se modeló con simulación Monte Carlo, generando 2000 muestras aleatorias a partir de datos experimentales y 2000 señales sísmicas artificiales.

Las curvas de fragilidad mostraron una distribución clara y coherente, sin cruces que alteren la predicción de la PD. Los estados ED1 y ED2 evidenciaron un cambio abrupto entre 0.05g y 0.10g de PGA, mientras que ED3 y ED4 presentaron una evolución progresiva asociada a la fluencia y colapso estructural. Se superó el 50% de PD en ED3 y ED4 a partir de PGA de 0.24g y 0.53g, respectivamente.

El análisis confirmó la correlación entre f'_c y los $D_{\max}$ registrados, en concordancia con lo señalado por Baghmisheh & Mahsuli (2021), quienes destacan la influencia de la resistencia del concreto simple en la capacidad de colapso estructural bajo sollicitación sísmica. Asimismo, se identificó una correlación polinómica entre la PGA y el PD asociado a cada ED, coherente con lo reportado por los autores antes mencionados respecto a la influencia de la variabilidad de registros sísmicos reales a nivel global. En contraste, no se evidenció correlación entre f_y y las $\Delta_{\max}$; no obstante, el aporte del acero es esencial para definir la capacidad en fluencia y última de la estructura, además de prevenir la fisuración del concreto frente a esfuerzos de tracción (Ibrahim & Olasehinde, 2016).

Fuente de Financiamiento: Autofinanciado

Conflicto de Interés: El autor del artículo declara que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el mismo.

Recomendaciones

La aplicación de variabilidad en otros parámetros intrínsecos del poste de concreto fue una limitante de esta investigación. Por esta razón, se sugiere analizar la influencia de otros factores estructurales o sísmicos en futuras investigaciones, como masa, dimensiones del poste, cantidad y tamaño de varillas de refuerzo, entre otros.

Referencias

- Arias, F. (2012). El proyecto de investigación: introducción a la metodología científica. Episteme.
- Baghmisheh, A. G., & Mahsuli, M. (2021). Seismic performance and fragility analysis of power distribution concrete poles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150(106909), 15. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106909>
- Bakalis, K., & Vamvatsikos, D. (2018). Seismic fragility functions via nonlinear response history analysis. *Journal of Structural Engineering*, 144(10). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106909>
- Bonett, R. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Faleiro, J., Oller, S., & Barbat, A. (2010). Plastic-damage analysis of reinforced concrete frame. *Engineering Computations*, 27(1), 57-83. <https://doi.org/10.1108/02644401011008522>
- Ferreira, F., Moutinho, C., Cunha, Á., & Caetano, E. (2020). An artificial accelerogram generator code written in Matlab. *Engineering Reports*, 2(3), 2:e12129. <https://doi.org/10.1002/eng2.12129>
- Guevara, N., Osorio, S., & Vargas, E. (2006). Evaluación de la capacidad estructural del edificio de la Biblioteca de las Ingenierías y Arquitectura, utilizando análisis estático no lineal (Pushover) [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Repositorio Institucional de la Universidad de El Salvador.
- Haselton, C., Liel, A., Taylor-Lange, S., & Deierlein, G. (2016). Calibration of model to simulate response of reinforced concrete beam-columns to collapse. *ACI Structural Journal*, 113(6), 1141-1152. <https://doi.org/10.14359/51689245>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. Mc Graw Hill Education.

- Hinostroza, J. (2008). Elementos y esquemas para subestaciones de distribución [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ibarra, L., Medina, R., & Krawinkler, H. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(12), 1489-1511. <https://doi.org/10.1002/eqe.495>
- Ibrahim, Q., & Olasehinde, A. (2016). Probability-based assessment of electric power distribution concrete poles in southwest of nigeria. *International Journal of Advanced Scientific Research and Management*, 1(7), 102-110. <https://doi.org/10.36282/IJASRM/1.8.2016.104>
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI). (2008). NTP 339.027: Hormigón (concreto). Postes de hormigón (concreto) armado para líneas aéreas.
- Kristiawan, S., Hapsari, I., Purwanto, E., & Marwahyudi, M. (2022). Evaluation of damage limit state for RC frame based on FE modeling. *Buildings*, 12(1), 21. <https://doi.org/10.3390/buildings12010021>
- Le, T., & Pham, N. (2024). Effects of plastic hinge properties on nonlinear static analysis of reinforced concrete frames. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 62, 622-628. <https://doi.org/10.3233/ATDE241041>
- Luz del Sur (1987). TE-7-542: Palomilla doble de concreto armado (250), 400 y 630 kVA
- Luz del Sur (2005). LE-7-015: Ménsula de concreto armado – 10 kV
- Luz del Sur (2010). DNC-098: Postes de concreto para líneas aéreas hasta 22.9 kV (13 m)
- Luz del Sur (2011). TE-7-543: Plataforma soporte para equipos de peso hasta 2600 kg
- Luz del Sur (2012). TE-7-112: Transformadores trifásicos convencionales de 50 hasta 630 kVA para 10 kV
- Marie-Victorie, E., Cailleux, E., & Texier, A. (2006). Carbonation and historical buildings made of concrete. *Journal de Physique Archives*, 136, 305-318. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006136031>
- Marston, T. (2018). The US electric power system infrastructure and its vulnerabilities. *The Bridge*, 48(2), 31-34.
- McKenna, F., Scott, M., & Fenves, G. (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)
- Office of Technology Assessment (OTA). (1990). Physical vulnerability of electric power systems to natural disasters and sabotage. U.S. Congress. <https://ota.fas.org/reports/9034.pdf>
- Organización Panamericana de Salud (OMS). (2010). Terremoto de Pisco - Perú: A dos años del sismo, crónica y lecciones aprendidas en el sector salud. Biblioteca Digital de la Organización Panamericana de Salud. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/34954>
- Park, Y., Lee, C., & Jeon, J. (2024). Hysteretic model parameters for seismic performance assessment of cyclically degraded reinforced concrete columns. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 179, 108519. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108519>
- Preston, B., Backhaus, S., Ewers, M., Phillips, J., Silva-Monroy, C., Dagle, J., Tarditi, A., Looney, J., & King, T. (2016). Resilience of the U.S. electricity system: a multi-hazard perspective. Department of Energy's Office of Energy Policy and Systems Analysis. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/01/f34/Resilience%20of%20the%20U.S.%20Electricity%20System%20A%20MultiHazard%20Perspective.pdf>
- Pujades, L.G., Vargas-Alzate, Y.F., Lantada, N., & González-Drigo, R. (2025). Probabilistic parametric analysis of capacity, fragility and expected seismic damage of framed reinforced concrete buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23, 1591-1637. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-02066-w>
- Rojas, M. (2019). Plataforma SIG para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las subestaciones eléctricas aéreas de distribución [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sayed, S., El-Assaly, M., & EL-Kholy, A. (2024). Review for plastic hinge types used for modeling reinforced concrete elements. *Journal of Engineering Science and Sustainable Industrial Technology*, 2(1), 21-25. <https://doi.org/10.21608/jessit.2023.241723.1004>
- Supo, F., & Caverro, H. (2014). Fundamentos teóricos y procedimentales de la investigación científica en ciencias sociales. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano.

- Takada, S., Bastami, M., Kuwata, Y., & Javanbarg, M. (2004). Performance of electric power systems during the Bam earthquake and Its Fragility Analyses. *Memoirs of Construction Engineering Research Institute*, 46, 141-152.
- Zareei, S., Hosseini, M., & Ghafory-Ashtiany, M. (2017). Evaluation of power substation equipment seismic vulnerability by multivariate fragility analysis: A case study on a 420kV circuit breaker. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 79-94. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.026>
- Zeynalian, M., & Khorasgani, M. Z. (2018). Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(3), 863-876. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.005>