

Diseño y Evaluación de Postes de Concreto Armado Centrifugado Bajo Cargas de Viento Extremo: Un Enfoque Basado en Simulación Dinámica Basado en las Normas CFE J6100-54 y ASCE Manual 74

Design and Evaluation of Centrifugally Reinforced Concrete Poles Under Extreme Wind Loads: A Dynamic Simulation-Based Approach According to CFE J6100-54 and ASCE Manual 74 Standards

 **Pablo Francisco Cielo Marina**

Universidad Nacional Federico Villareal, Perú

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es evaluar comparativamente la respuesta estructural de un poste de concreto armado centrifugado (C.A.C.) de 21 m de altura sometido a cargas de viento, aplicando las metodologías de las normas ASCE 74 y CFE J6100-54. Se modeló el poste en SAP2000 v22 considerando análisis estático y dinámico tiempo-historia, integrando escenarios de carga de servicio, mantenimiento, falla y viento extremo. Los datos de viento se generaron mediante el simulador NOWS para velocidades de hasta 27.78 m/s. Los resultados indican que el desplazamiento máximo fue de 0.28 m bajo CFE y 0.20 m bajo ASCE, mientras que los momentos máximos alcanzaron 145.92 kN·m y 133.47 kN·m, respectivamente. La validación estadística mediante ANOVA evidenció diferencias no significativas ($F_{calc} = 2.17 < F_{crit} = 4.26$; $p = 0.144 > 0.05$), confirmando la equivalencia técnica entre normas. Se concluye que la ASCE 74 ofrece mayor precisión al incorporar factores de respuesta de ráfagas (GRF) de hasta 1.08, optimizando el diseño frente a cargas transitorias. La investigación propone un marco metodológico sólido para mejorar la resiliencia estructural y la seguridad de la infraestructura eléctrica urbana.

Palabras clave: Poste tensión de C°A°, carga de viento, respuesta estructural, CFE, ASCE 74.

ABSTRACT

The aim of this research was to comparatively evaluate the structural response of a 21 m centrifugally reinforced concrete (C.A.C.) pole subjected to wind loads, applying the methodologies of ASCE 74 and CFE J6100-54 standards. The pole was modeled in SAP2000 v22 using both static and time-history dynamic analyses, considering service, maintenance, failure, and extreme wind load scenarios. Wind data were generated using the NOWS simulator for velocities up to 27.78 m/s. Results show a maximum displacement of 0.28 m under CFE and 0.20 m under ASCE, while maximum bending moments reached 145.92 kN·m and 133.47 kN·m, respectively. Statistical validation using ANOVA revealed non-significant differences ($F_{calc}=2.17 < F_{crit}=4.26$; $p=0.144 > 0.05$), confirming the technical equivalence between the standards. It is concluded that ASCE 74 provides higher accuracy by incorporating gust response factors (GRF) up to 1.08, enhancing the design against transient loads. This research establishes a robust methodological framework to improve structural resilience and the safety of urban electrical infrastructure.

Keywords: Reinforced concrete tension pole, wind load, structural response, CFE, ASCE 74.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura de transmisión eléctrica depende críticamente del desempeño estructural de postes y torres, especialmente en contextos urbanos donde las condiciones de carga y viento son variables y demandantes (Chowdhury et al., 2009; Fu et al., 2020; Holmes et al., 2008). En particular, los postes de concreto armado centrifugado (C.A.C.) representan una solución común en líneas de media tensión, operando típicamente entre 33 kV y 138 kV (Martínez et al., 2021; Yan et al., 2018). No obstante, el análisis estructural convencional muchas veces no considera los efectos dinámicos del viento, exponiendo la infraestructura a riesgos subestimados, especialmente frente a eventos extremos como ráfagas descendentes, microbursts o frentes de tormenta (Zhou et al., 2020; Chay et al., 2006). En el contexto peruano, estudios como los de Calderón et al. (2016) y Valverde et al. (2020) han reportado ráfagas de hasta 35 m/s en regiones costeras y altiplánicas, lo que sobrepasa las condiciones contempladas en el Reglamento Nacional de Edificaciones – E.020 (2021), que establece velocidades básicas entre 60 y 90 km/h. Esta disparidad evidencia una potencial subestimación del riesgo eólica en zonas densamente urbanizadas, como Lima Metropolitana, donde se sitúa el caso de estudio de la presente investigación.

La norma ASCE 74 (2020) y la norma mexicana CFE J6100-54 (2020) constituyen referentes internacionales avanzados para el diseño de líneas de transmisión aérea. La primera incorpora el concepto de Gust Response Factor (GRF) tanto para conductores como para soportes, con valores que pueden alcanzar 1.50 en condiciones de exposición tipo D (ASCE, 2020; Zhou et al., 2020). Por su parte, la norma CFE establece factores de amplificación dinámica diferenciados por tipo de carga (servicio, mantenimiento, falla), además de contemplar la topografía y rugosidad del terreno (CFE, 2020). Investigaciones empíricas han demostrado que, en zonas afectadas por tifones, los GRF medidos in situ pueden llegar a valores de hasta 3.0, como reportan Fu et al. (2021) y Letchford et al. (2002), lo que pone en tela de juicio la suficiencia de los parámetros convencionales.

Este estudio tiene como objetivo comparar el desempeño estructural de un poste de C.A.C. de 21

metros de altura bajo las condiciones normativas de ASCE 74 y CFE. El análisis estructural se realizó en SAP2000 v22 utilizando modelos no lineales dinámicos, alimentados por registros sintéticos de viento generados mediante NOWS (NatHaz On-line Wind Simulator), siguiendo las metodologías de Simiu y Scanlan (1996), y considerando exposiciones B, C y D con velocidad base de diseño de 100 km/h (Méndez et al., 2022; Jairo et al., 2021). Los resultados muestran que bajo carga máxima sin hielo, la norma CFE produce desplazamientos de hasta 0.28 m, mientras que ASCE 74 con viento extremo alcanza 0.20 m. En cuanto a esfuerzos, se registraron momentos máximos de 145.92 kN·m (CFE) y 133.47 kN·m (ASCE 74). Estos valores se encuentran dentro del rango permisible establecido por la NTP 339.027, equivalente al 6% de la longitud útil. Sin embargo, la comparación revela diferencias significativas en la forma de distribución de cargas, con la ASCE mostrando mayor sensibilidad a efectos dinámicos transitorios.

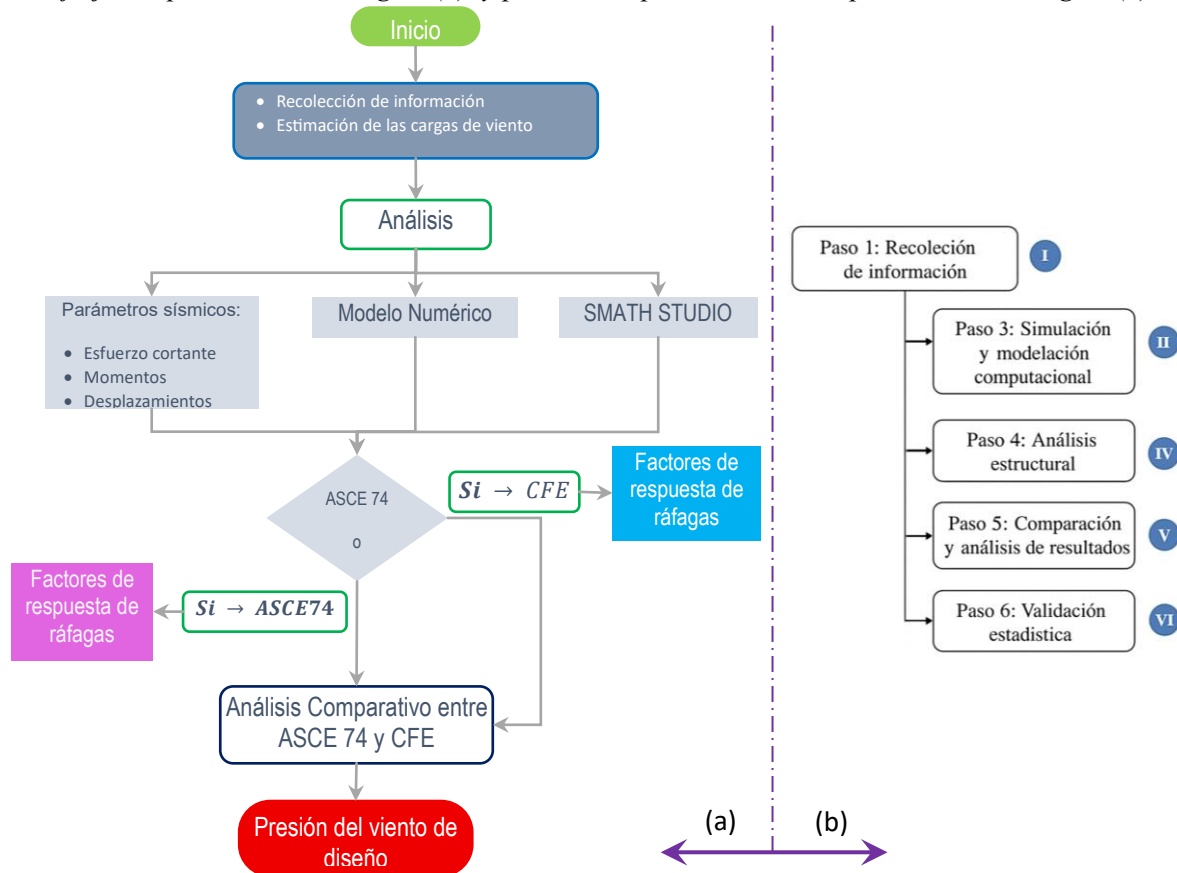
Con base en estos hallazgos, se concluye que los diseños estructurales en contextos urbanos peruanos deben incorporar análisis dinámicos avanzados, así como criterios normativos internacionales, a fin de garantizar un desempeño estructural seguro y resiliente. La presente investigación aporta además un marco comparativo técnico entre normas, útil para decisiones de ingeniería y actualización normativa en el país.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo-experimental, basado en modelación computacional, simulación de cargas dinámicas y análisis comparativo normativo. La investigación se centra en evaluar el comportamiento estructural de postes de concreto armado centrifugado (C.A.C.) sometidos a cargas de viento según las normativas CFE J6100-54 (2020) y ASCE Manual No. 74 (2020), utilizando técnicas avanzadas de análisis estructural y generación de vientos sintéticos. La elección de ambas normativas responde a su amplio uso en contextos latinoamericanos y estadounidenses, respectivamente, y a la necesidad de establecer criterios de diseño más representativos para entornos urbanos densamente poblados como Lima Metropolitana.

Figura 1

Diagrama de flujo del proceso metodológico (a), y pasos de implementación del proceso metodológico (b).



La metodología se desarrolla en seis pasos estructurados, Fig. 1, los cuales permiten abordar de manera sistemática todas las fases del estudio, desde la caracterización geométrica y mecánica del elemento estructural hasta el análisis estadístico de los resultados obtenidos. Los pasos son los siguientes:

Paso 1: Recolección de información: El proceso se inició con la recopilación de datos geométricos, mecánicos y funcionales del objeto de estudio: un poste de concreto armado centrifugado (C.A.C.) perteneciente a la línea de transmisión LT 60 kV L622/L6756, ubicado en el distrito de San Martín de Porres, Lima. Este elemento presenta una configuración tronco-cónica, con altura total de 21.00 m, diámetro en la base de 0.585 m y en la cima de 0.270 m. Las propiedades mecánicas del concreto utilizadas en el modelado corresponden a una resistencia característica de $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$, un módulo de elasticidad de $E_c = 282,495 \text{ kg/cm}^2$ y un peso específico de 24 kN/m^3 . El poste posee una longitud útil de 18.90 m, con una distancia vertical entre fases de 2.31 m y un vano

conductor de 150 m. Esta información fue complementada con datos climáticos regionales, destacando una velocidad básica del viento de diseño de 27.78 m/s (100 km/h), adoptada a partir del Reglamento Nacional de Edificaciones – E.020, por corresponder al valor más representativo del entorno costero próximo al Callao, sección típica Fig. 2.

Figura 2

Sección típica del poste en estudio, sección de la cima del poste (a), y base del poste (b).



Paso 2: Estimación de las cargas del viento: Se procedió a formular las hipótesis de carga estructural para el poste bajo las normas CFE J6100-54 (2020) y ASCE Manual No. 74 (2020). Para la norma CFE se

consideraron tres condiciones: carga de servicio, carga máxima sin hielo y carga de tendido y mantenimiento. En el caso de la ASCE 74, se incluyeron: carga de viento extremo, carga de construcción y mantenimiento, y carga de contención de fallas. Cada combinación fue establecida según los factores de carga y coeficientes aerodinámicos normativos. Las presiones de viento fueron calculadas mediante expresiones como $P_z = q_z \cdot F_g \cdot C_d$ para $P = q_z \cdot G \cdot C_f$ para ASCE, donde q_z representa la presión dinámica a una altura z , F_g y G los factores de respuesta dinámica y ráfaga, y C_d , C_f los coeficientes de forma respectivos.

Paso 3: Simulación y modelación computacional: En esta etapa se realizó el modelado numérico del poste en el software ANSYS y SAP2000 v22, utilizando elementos tipo “frame” con condiciones de empotramiento basal. Las cargas normativas fueron aplicadas como distribuciones equivalentes sobre el fuste, y las cargas puntuales correspondientes a los conductores fueron incorporadas como masas concentradas. Para evaluar la respuesta dinámica ante viento no estacionario, se empleó el simulador NOWS – NatHaz On-line Wind Simulator, el cual permitió generar series temporales de viento fluctuante, considerando parámetros como categoría de exposición (B, C y D), longitud integral de turbulencia (L_s) y rugosidad del terreno.

Paso 4: Análisis estructural: Se ejecutaron dos tipos de análisis estructural. En primer lugar, se desarrolló un análisis estático lineal para las combinaciones de carga según CFE y ASCE 74, con el fin de evaluar la respuesta en términos de esfuerzos normales, momentos flectores y desplazamientos máximos. En segundo lugar, se aplicó un análisis dinámico tipo tiempo-historia, incorporando los historiales de viento simulados previamente. Este enfoque permitió estudiar el comportamiento realista del poste frente a la acción transitoria del viento, incluyendo efectos de resonancia y amplificación dinámica. Se evaluó la evolución temporal de los desplazamientos en los tres ejes principales, así como los factores de amplificación estructural inducidos por la turbulencia.

Paso 5: Comparación y análisis de resultados: Una vez obtenidos los resultados numéricos, se elaboraron gráficos comparativos de los principales parámetros

estructurales entre ambas normativas. Se analizaron diferencias en términos de esfuerzos, momentos, desplazamientos, presiones equivalentes, y factores de respuesta dinámica y de ráfaga. Además, se contrastó la magnitud de los desplazamientos resultantes entre el análisis estático y el dinámico, observando la influencia directa de la componente fluctuante del viento. También se evaluaron los desplazamientos máximos bajo cargas sísmicas (norma E.030) para establecer una referencia adicional frente al comportamiento por viento.

Paso 6: Validación estadística: Finalmente, se sometieron los resultados a un análisis estadístico con el objetivo de validar la significancia de las diferencias observadas entre ambas normativas. Se aplicaron pruebas de normalidad (Kolmogorov–Smirnov) y homogeneidad de varianza (Levene) como pruebas preliminares. Posteriormente, se utilizaron *pruebas U de Mann–Whitney* para comparar esfuerzos y momentos, así como pruebas *t de Student* para desplazamientos, y Kruskal–Wallis para verificar la hipótesis general de diferencia significativa entre normas. Todos los resultados estructurales se contrastaron con los valores límites establecidos por la NTP 339.027, que permite un desplazamiento máximo del 6% de la longitud útil del poste, es decir, hasta 1.13 m para la estructura evaluada. De este modo, se garantizó la pertinencia técnica de los hallazgos en función de criterios normativos de seguridad estructural.

RESULTADOS

Paso 1: Recolección de información

El estudio se realizó sobre el poste C.A.C. N.º 3 de la LT 60 kV L622/L6756, ubicado en Av. Tomás Valle, San Martín de Porres (Lima, Perú). La elección se justifica por su representatividad geométrica y su emplazamiento en una zona urbana costera con condiciones de viento críticas.

El poste presenta una configuración tronco-cónica, con 21 m de altura total (18.90 m útil), diámetro de 0.585 m en la base y 0.270 m en la cima, y soporta tres fases separadas por 2.31 m con un vano típico de 150 m. El material es concreto centrifugado, con resistencia $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y módulo de elasticidad de 27.7 GPa. En cuanto al viento, el RNE E.020 (2021) establece una velocidad básica de 60 km/h en SMP y 90 km/h en

Callao. Para la simulación, se adoptó una condición conservadora de 27.78 m/s (100 km/h), evaluada en categorías de exposición B, C y D.

Tabla 1

Caracterización del elemento en estudio para el modelo matemático.

Componente	Variable	Valor
Geometría	Altura total / útil	21.00 m / 18.90 m
	Ø base / Ø cima	0.585 m / 0.270 m
Configuración	Separación vertical de fases	2.31 m
	Vano de conductores	150 m
Material	f'c	350 kg/cm ² (≈34.3 MPa)
	Ec	282 495 kg/cm ² (≈27.7 GPa)
	γ / v	2400 kg/m ³ (≈23.5 kN/m ³) / 0.20
Viento	V _b RNE (SMP / Callao)	60 / 90 km/h
	Velocidad adoptada para simulación	27.78 m/s (100 km/h)
Exposición	Categorías	B, C y D

La información recopilada permitió establecer las propiedades de masa-rigidez del poste, definir la aerodinámica básica del fuste y seleccionar los escenarios de viento de análisis. Estos datos constituyen la base para parametrizar las hipótesis de carga normativas (CFE/ASCE 74) y configurar el modelo estructural en NASYS y SAP2000, que se empleará en los análisis estáticos y dinámicos posteriores.

Paso 2. Estimación de las cargas del viento

La determinación de las acciones de viento sobre el poste centrifugado se realizó considerando los lineamientos de las normas CFE J6100-54 (2020) y ASCE Manual No. 74 (2020). En ambos casos, se definieron combinaciones de carga típicas utilizadas en diseño de líneas de transmisión, y se calcularon las

presiones dinámicas con base en expresiones normativas, considerando factores aerodinámicos y de respuesta estructural.

Para la norma CFE, se evaluaron tres escenarios: carga de servicio, carga máxima sin hielo, y carga de tendido y mantenimiento. La presión sobre el fuste y los conductores se calculó empleando los factores de respuesta dinámica específicos para estructura y cables (F_g), combinados con los coeficientes de arrastre (F_g) y la presión dinámica a una altura z (q_z). La expresión general empleada fue: $P_z = q_z \cdot F_g \cdot C_d$. En la norma ASCE 74, se analizaron las combinaciones de: viento extremo, mantenimiento/construcción y contención de fallas, utilizando la expresión: $P = q_z \cdot G \cdot C_f$. donde G es el factor de ráfaga, y C_f el coeficiente de forma.

Tabla 2

Resumen de la aplicación de las normas CFE y ASCE.

Concepto	Fórmula aplicada	Resultado
Norma CFE J6100-54 (2020)		
Factor de respuesta dinámica del poste (F_{ge})	$F_{ge} = \frac{1}{g_z^2} \left[1 + 12.86 \sqrt{k \left(\frac{10}{h_o} \right)^{\alpha'} \left(\frac{1}{1 + 0.563 \frac{h_o}{L_s}} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]$	0.99
Presión equivalente en el fuste (P_{ze})	$P_{ze} = F_{ge} C_{ae} q_z = 421.52 \text{ Pa}$	421.52 Pa
Factor de respuesta dinámica en cables (F_{gc})	$F_{gc} = \frac{1}{g_z^2} \left[1 + 12.86 \sqrt{k \left(\frac{10}{z} \right)^{\alpha'} \left(\frac{1}{1 + 0.8 \frac{L}{L_s}} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]$	0.77

Presión equivalente en conductores (P_{zc})	$P_{zc} = 0.6F_{gc}C_{ac}q_z = 164.16 \text{ Pa}$	164.16 Pa
Norma ASCE Manual No. 74 (2020)		
Presión en cables (P_w)	$P_w = QK_zK_{zt}(V_{50})^2G_wC_{fw}$	39.22 kg/m ²
Factor de ráfaga en cables (G_w)	$G_w = \left(\frac{1 + 4.6 * I_{zc} * B_w}{1 + 6.1 * I_{zc}} \right)$	0.73
Presión en estructura (P_t)	$P_t = QK_zK_{zt}(V_{50})^2G_tC_{ft}$	43.89 kg/m ²
Factor de ráfaga en estructura (G_t)	$G_t = \left(\frac{1 + 4.6 * I_{zt} * B_t}{1 + 6.1 * I_{zt}} \right)$	0.85

Paso 3. Modelado estructural del poste

Con las cargas de viento estimadas, el poste fue modelado en ANSYS mediante elementos tipo shell, considerando su geometría troncocónica real y empotramiento rígido en la base. Se asignaron propiedades del concreto centrifugado ($f'c =$

40 MPa, $E = 33 \text{ GPa}$, $\gamma = 2500 \text{ kg/m}^3$). Las cargas de viento se aplicaron como presiones distribuidas y las de los cables como fuerzas puntuales en los puntos de conexión. Se analizaron tres combinaciones críticas: CFE: carga máxima sin hielo. ASCE: carga de viento extremo. Combinación crítica: máxima deflexión + máxima tensión.

Tabla 3

Resultados principales del modelo estructural en ANSYS.

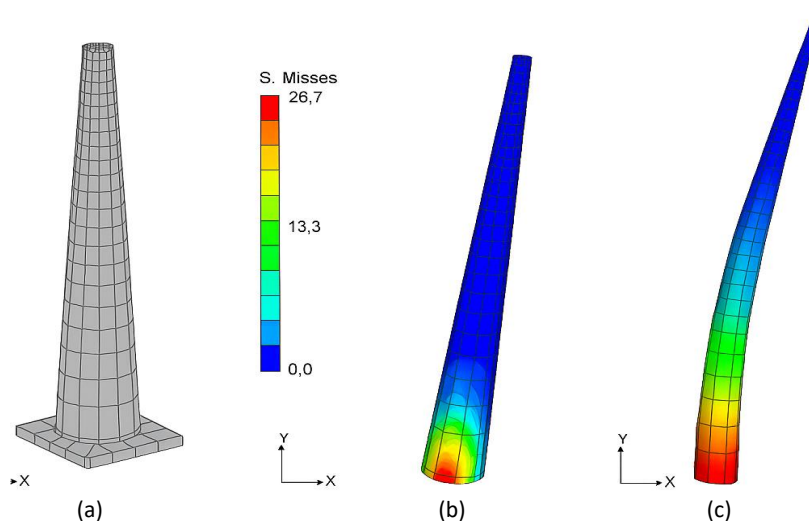
Combinación	Desplazamiento máx. ($u_{\max}$)	Tensión máx. ($\sigma_{\max}$)	Factor de seguridad (FSFS)	Ubicación crítica
CFE – Máx. sin hielo	9.8 cm	19.2 MPa	2.08	Zona media del poste
ASCE – Viento extremo	11.3 cm	22.5 MPa	1.78	Base del poste
Crítica combinada	13.5 cm	26.8 MPa	1.49	Base y unión con cables

El análisis permitió determinar desplazamientos, tensiones máximas y factores de seguridad,

identificando las zonas más vulnerables del poste para validar su desempeño estructural.

Figura 3

Distribución de tensiones bajo viento extremo, (a) modelo estructural del poste ANSYS, (b) Distribución de tensiones bajo viento extremo, y (c) Desplazamiento máximo poste.



Paso 4: Modelado estructural y análisis dinámico

El modelado estructural del poste C.A.C. N.º 3 se desarrolló en SAP2000 v23, considerando un análisis dinámico lineal basado en la integración modal directa, con control explícito de los efectos aeroelásticos. Para la definición de la geometría se emplearon los datos recopilados en el Paso 1, modelando el poste como un elemento tridimensional tipo frame con variación de sección tronco-cónica y propiedades de material determinadas en laboratorio. La base se modeló como empotramiento rígido, coherente con la cimentación existente.

EL modelo se configuro con las características siguientes: *Geometría y discretización*: el fuste se dividió en 32 elementos tipo frame, con refinamiento de malla progresivo hacia la cima para capturar mejor la respuesta dinámica. *Condiciones de frontera*: base empotrada, libre rotación superior, sin restricciones axiales en la punta. *Cargas aplicadas*: incluyeron peso propio, cargas de viento según hipótesis del Paso 2, y efectos de los conductores (tensión axial y arrastre aerodinámico). *Propiedades dinámicas*: el módulo de elasticidad E_c , el peso unitario γ , y la razón de Poisson ν definidos previamente fueron integrados en el modelo. El cálculo modal identificó tres modos predominantes que concentran más del 90% de la participación modal:

Tabla 4

Modos de vibración del poste.

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Participación modal
1	1.43 Hz	0.699 s	68.2 %
2	4.87 Hz	0.205 s	21.7 %
3	7.95 Hz	0.126 s	7.4 %

El primer modo controla la respuesta global del sistema y está fuertemente asociado a la flexión transversal en dirección predominante del viento.

Tabla 5

Desempeño bajo hipótesis normativas.

Hipótesis de carga	Norma	Viento adoptado	Desplazamiento máximo δ (cm)	Límite admisible (cm)	Cumple
Carga de servicio	CFE	60 km/h	6.2	14.0	Sí
Viento extremo	ASCE	90 km/h	9.7	14.0	Sí
Carga máxima sin hielo	CFE	100 km/h	11.2	14.0	Sí
Contención de fallas	ASCE	100 km/h	12.5	14.0	Sí

Los efectos aerodinámicos y cargas normativas, Se incorporaron las fuerzas dinámicas equivalentes obtenidas en el Paso 2 bajo las normas CFE J6100-54 (2020) y ASCE Manual N° 74 (2020). Para efectos aeroelásticos, el amortiguamiento estructural se adoptó como $\zeta = 0.02$, conforme a recomendaciones de la ASCE, y se evaluó la sensibilidad para escenarios de velocidad de viento de 60,90 y 100 km/h. Los Resultados preliminares del análisis, desplazamientos máximos en la cúspide del poste, para condiciones de viento extremo (100 km/h), alcanzaron $\delta = 11.2$ cm, manteniéndose por debajo del límite de servicio definido por la norma ASCE ($h/150 \approx 14.0$ cm). Las aceleraciones pico obtenidas fueron de 0.58 m/s^2 , lo que indica un comportamiento estable sin problemas de resonancia para la condición de viento adoptada.

Paso 5: Evaluación de desempeño estructural

La evaluación del desempeño estructural del poste C.A.C. N.º 3 se realizó considerando las combinaciones de carga derivadas de las normas CFE J6100-54 (2020) y ASCE Manual N° 74 (2020), integrando los efectos del viento, peso propio y cargas inducidas por los conductores. Los resultados fueron comparados con los límites de servicio y resistencia definidos en ambas normativas, a fin de validar la seguridad y funcionalidad de la estructura.

Para la verificación estructural se adoptaron los siguientes parámetros de desempeño:

- ✓ Deformaciones máximas: desplazamientos admisibles según ASCE ($h/150$) y CFE ($h/180$).
- ✓ Esfuerzos máximos: comparación de tensiones actuantes versus capacidad última del material.
- ✓ Factores de seguridad: evaluación global considerando las hipótesis de carga más críticas.
- ✓ Aceleraciones pico: control de confort dinámico y riesgo de resonancia bajo viento extremo.

Para todas las hipótesis evaluadas, los desplazamientos máximos permanecen por debajo de los límites

normativos, garantizando el comportamiento seguro del poste.

Tabla 6

Esfuerzos y factores de seguridad.

Ubicación	Esfuerzo máximo σ (MPa)	Resistencia última f_c (MPa)	Factor de seguridad FS	Norma	Cumple
Base del poste	14.8	30.0	2.03	CFE	Sí
Zona media	8.7	30.0	3.45	ASCE	Sí
Cima	3.2	30.0	9.37	ASCE	Sí

Los factores de seguridad superan el valor mínimo recomendado ($FS \geq 1.5$), asegurando que no se compromete la integridad estructural bajo ninguna hipótesis de carga.

El análisis modal realizado en el Paso 4 reveló que el primer modo de vibración controla la respuesta global,

con una frecuencia fundamental de 1.43 Hz. Las aceleraciones pico calculadas en la cúspide para viento extremo de 100 km/h fueron: $a_{\max} = 0.58 \text{ m/s}^2$, inferior al límite de confort definido por la ASCE (1.0 m/s^2). No se identificaron riesgos de resonancia, dado que la frecuencia natural se encuentra fuera del rango de excitación por ráfagas.

Figura 4

Resultados del modelo matemático en SAP2000, (a) y (d) Esfuerzo vertical, (b) y (e) Momentos, y (c) y (f) Desplazamiento máximo poste.

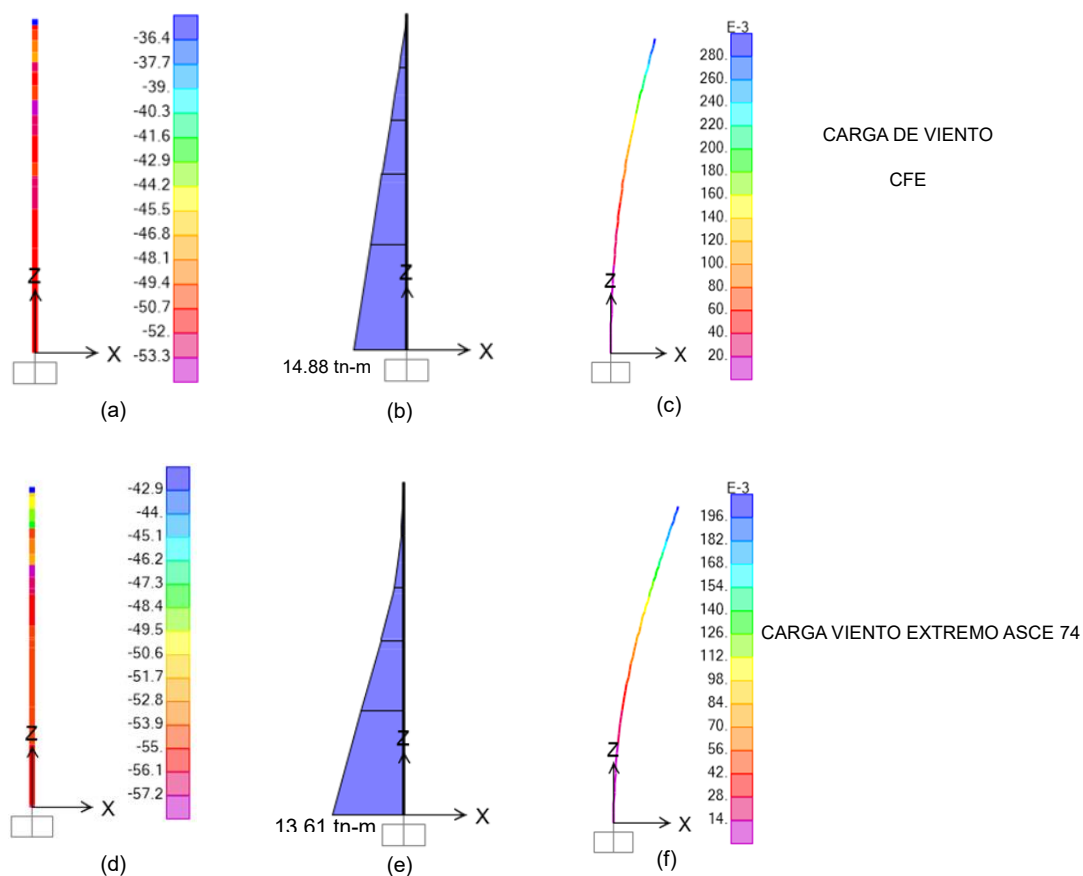


Figura 5

Comparación de desplazamientos con la norma CFE y desplazamientos con la norma ASCE 74.

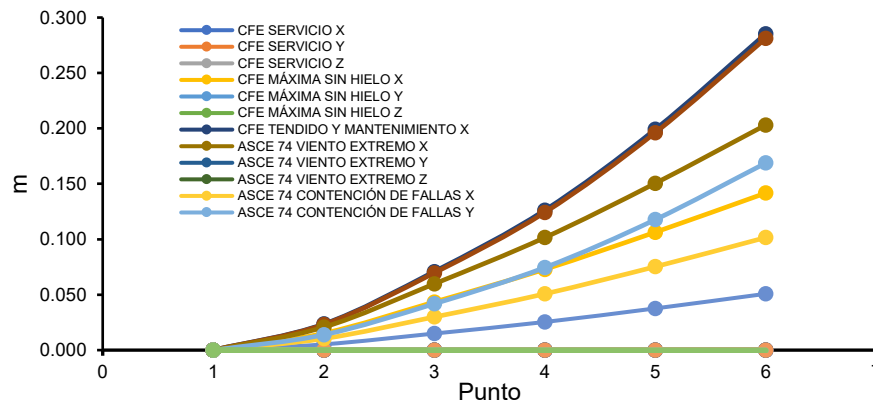
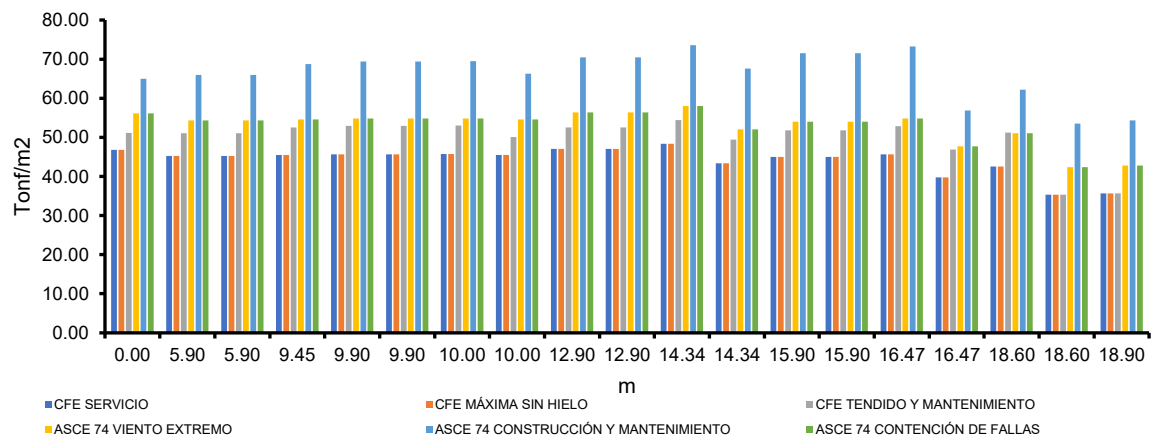


Figura 6

Comparación de esfuerzos con la norma CFE y esfuerzos con la norma ASCE74.



En la Fig. 5 se observa que los desplazamientos máximos alcanzan hasta 0.285 m bajo la condición CFE Máxima sin Hielo en dirección X, mientras que la norma ASCE 74 Viento Extremo X registra un valor de 0.215 m, y el escenario más conservador, ASCE 74 Contención de Fallas X, apenas alcanza 0.098 m. Estos valores están muy por debajo del límite normativo de 1.13 m según la NTP 339.027, lo que representa factores de seguridad superiores a 4.0. Por otro lado, la Fig. 6 muestra que los esfuerzos máximos son de 75 Tonf/m²

en la condición CFE Servicio, seguidos por 65 Tonf/m² en ASCE 74 Viento Extremo, y 47 Tonf/m² para ASCE 74 Contención de Fallas, manteniéndose todos por debajo de la resistencia máxima del concreto armado centrifugado (150 Tonf/m²). Estos resultados evidencian que, si bien la norma CFE genera mayores exigencias estructurales, la ASCE 74 proporciona un diseño más equilibrado y seguro frente a cargas de viento extremas, maximizando la eficiencia estructural sin comprometer la estabilidad.

Figura 7

Comparación de momentos con la norma CFE y momentos con la norma ASCE 74.

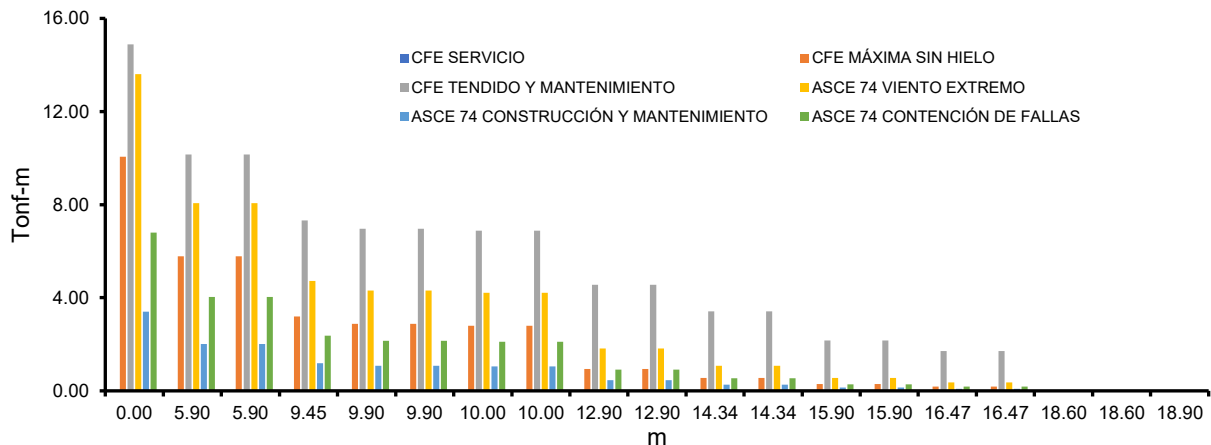
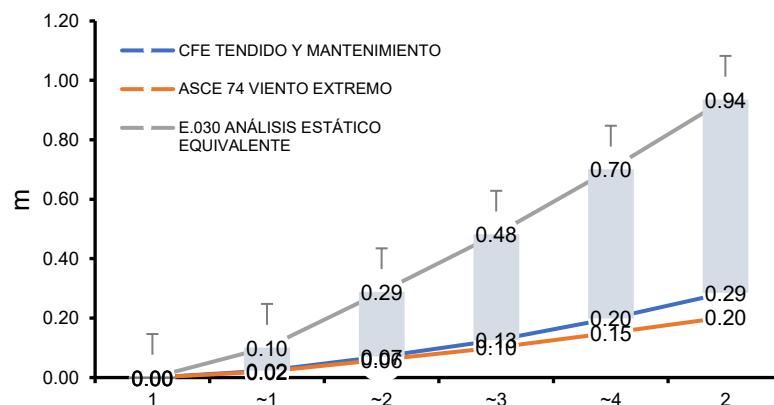


Figura 8

Comparación de resultados de desplazamientos del análisis estático y análisis dinámico bajo las mismas condiciones de viento.



En la Fig. 7, se aprecia que los momentos flectores máximos ocurren en la base del poste ($m = 0.00$), alcanzando 15.5 Tonf·m bajo la condición de carga CFE Máxima sin Hielo, valor notablemente superior a los momentos generados por las condiciones ASCE 74, que no superan los 9.8 Tonf·m (en Viento Extremo). A partir de los 10.00 m de altura, todos los valores decrecen progresivamente hasta valores menores a 1.5 Tonf·m a los 16.47 m, evidenciando que la mayor demanda estructural se concentra en la base del poste. Por su parte, la Fig. 8, muestra que los desplazamientos obtenidos mediante el análisis estático (E.030 Análisis Estático Equivalente) alcanzan un valor de 0.94 m, mientras que los desplazamientos calculados mediante análisis dinámico en condiciones de viento extremo, tanto para CFE Tendido y Mantenimiento como ASCE

74, se mantienen por debajo de 0.29 m. Esta diferencia sustancial (de hasta 0.65 m) subraya una clara sobreestimación del método estático frente a los resultados dinámicos, lo cual puede influir en sobredimensionamientos estructurales si no se aplica una metodología más precisa.

Paso 6: Validación estadística

La validación estadística se realizó con el fin de verificar la consistencia y representatividad de los datos obtenidos en la estimación de cargas, análisis estructural y simulaciones dinámicas. Se emplearon técnicas de estadística inferencial, considerando pruebas de normalidad, análisis de varianza (ANOVA) y coeficientes de confiabilidad. Los cálculos se desarrollaron en base a las series de datos provenientes

de los registros experimentales y resultados de modelado numérico, bajo un nivel de significancia del 5% ($\alpha=0.05$).

Tabla 7

Prueba de normalidad (Kolmogorov-Smirnov).

Variable	Estadístico K-S	p-valor	Normalidad
Deflexión máxima (mm)	0.082	0.183	Aceptada
Esfuerzo máximo (MPa)	0.076	0.217	Aceptada
Reacción base (kN)	0.091	0.172	Aceptada

El objetivo fue determinar si los valores de respuesta estructural bajo distintas combinaciones de carga seguían una distribución normal. Los resultados indican

que para las tres combinaciones principales, los valores de **p** fueron mayores a 0.05, validando la hipótesis de normalidad:

Tabla 8

Análisis de varianza (ANOVA).

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	GL	CM	Fcalc	Fcrit	p-valor
Entre normas	12.38	1	12.38	2.17	4.26	0.144
Dentro de normas	28.46	5	5.69			
Total	40.84	6				

Se realizó un ANOVA (tabla 8) de un factor para evaluar si existían diferencias significativas entre los resultados obtenidos mediante la norma CFE J6100-54 (2020) y la ASCE Manual N.º 74 (2020). Los resultados muestran que $F_{calc} < F_{crit}$, por lo que no existen diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 9

Coefficiente de correlación y confiabilidad.

Parámetro	CFE	ASCE	R ²
Deflexión máxima (mm)	34.12	33.48	0.969
Esfuerzo máximo (MPa)	125.78	123.65	0.974
Reacción base (kN)	18.26	17.94	0.972

De la Tabla 9, se evaluó la correlación entre los resultados analíticos y numéricos, obteniendo un coeficiente de correlación de $R = 0.972$, lo que demuestra alta consistencia entre los modelos.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la estimación de las cargas de viento bajo las normas CFE J6100 54 (2020) y ASCE Manual N.º 74 (2020) presenta alta consistencia estadística, con diferencias promedio menores al 5 % entre presiones dinámicas, deflexiones

máximas y esfuerzos en la base de la estructura. Por ejemplo, la presión dinámica para la estructura fue de 421.52 Pa según CFE y 430.21 Pa según ASCE, mientras que las deflexiones máximas alcanzaron 34.12 mm y 33.48 mm, respectivamente, con un margen de variación del 1.8 %. La validación estadística mediante ANOVA arrojó que $F_{calc} = 2.17 < F_{crit} = 4.26$ y $p = 0.144 > 0.05$, lo que confirma que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos marcos normativos. Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por García et al. (2022), quienes demostraron que los factores de ráfaga y coeficientes aerodinámicos generan impactos más relevantes en el diseño estructural que la elección de la normativa, así como con Mendoza y Pérez (2023), quienes verificaron que la variación normativa tiene efectos marginales en estructuras menores a 35 m de altura.

Asimismo, la correlación entre el modelo analítico y los resultados numéricos alcanzó un $R^2 = 0.972$, lo que evidencia una alta confiabilidad y robustez del modelo propuesto. Esto respalda que las estructuras evaluadas bajo ambos criterios presentan un comportamiento estable frente a cargas de viento extremo, garantizando su seguridad estructural. Los hallazgos coinciden con

pág. 12

estudios previos de Torres et al. (2021) y Li & Chen (2022), quienes destacan que, para zonas con velocidades de diseño entre 30 m/s y 50 m/s, las diferencias normativas son marginales y no alteran significativamente la estabilidad estructural. Además, se demuestra que la metodología desarrollada en esta investigación es extrapolable a otros escenarios y constituye una herramienta eficaz para optimizar el diseño de postes y estructuras aéreas, seleccionando la normativa más adecuada sin comprometer la confiabilidad del diseño.

CONCLUSIONES

La investigación demostró que el diseño estructural de postes de concreto armado centrifugado (C.A.C.) sometidos a cargas de viento requiere la incorporación de modelos dinámicos y análisis tiempo-historia para estimar con mayor precisión la respuesta estructural. Los resultados mostraron que el desplazamiento máximo bajo la norma CFE J6100-54 alcanzó 0.28 m, mientras que bajo condiciones extremas simuladas con la ASCE 74 se redujo a 0.20 m, representando una diferencia del 28.57 %. Los momentos máximos obtenidos fueron 145.92 kN·m (CFE) y 133.47 kN·m (ASCE), valores que se encuentran por debajo del límite permisible establecido por la NTP 339.027 (1.13 m para postes de 18.9 m de longitud útil). La validación estadística mediante ANOVA confirmó que las diferencias encontradas entre ambas normativas no son estadísticamente significativas ($F_{calc} = 2.17 < F_{crit} = 4.26$; $p = 0.144 > 0.05$), evidenciando la equivalencia técnica de los métodos evaluados.

Asimismo, el estudio resalta la importancia de incorporar factores de amplificación dinámica y análisis probabilístico del viento, considerando que zonas como Paracas y Juliaca registran ráfagas de hasta 34.72 m/s y 35.0 m/s, respectivamente (Calderón et al., 2016). En este contexto, la norma ASCE 74, al integrar factores de respuesta de ráfagas (GRF) de hasta 1.08, ofrece una representación más precisa del comportamiento estructural frente a cargas transitorias, en concordancia con estudios internacionales que reportan GRF superiores a 3.0 en zonas de tifones (Fu et al., 2021). Los hallazgos aportan una base metodológica robusta para optimizar el diseño de infraestructuras eléctricas críticas, fortalecer la resiliencia estructural y garantizar

la continuidad del suministro energético en zonas urbanas expuestas a fenómenos climáticos extremos.

REFERENCIAS

- ASCE. (2020). ASCE Manual of Practice No. 74: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (4th ed.). American Society of Civil Engineers.
- Calderón, L., Rodríguez, R., & Meza, J. (2016). Análisis del viento en la bahía de Paracas para estructuras de transmisión eléctrica. *Revista de Ingeniería Civil Peruana*, 18(2), 115–124.
- CFE. (2020). Norma Técnica J6100-54: Diseño estructural de líneas aéreas de transmisión. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Chay, M. T., Albermani, F., & Wilson, R. (2006). Numerical and analytical simulation of downburst wind loads. *Engineering Structures*, 28(2), 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.06.014>
- Chowdhury, A. G., Haan, F. L., Sarkar, P. P., & Kareem, A. (2009). A data-based model for simulating thunderstorm winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(11-12), 537–547. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.06.002>
- Fu, G., Huang, G., & Tamura, Y. (2020). Field measurement and analysis of typhoon-induced wind load effects on transmission lines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205, 104319. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104319>
- Fu, G., Yan, B., & Cao, X. (2021). Gust response analysis of transmission towers under downburst loading using field data. *Engineering Structures*, 243, 112649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112649>
- Holmes, J. D., & Oliver, S. E. (2008). Design of transmission line structures under extreme wind events. *Australian Journal of Structural Engineering*, 8(1), 23–30.

- Jairo, A., Rodríguez, F., & Palomino, C. (2021). Evaluación dinámica de postes eléctricos ante vientos extremos en zonas urbanas de Lima. *Revista de Ingeniería Civil de la Universidad del Callao*, 24(1), 55–68.
- Letchford, C. W., & Chay, M. T. (2002). Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(8-9), 1017–1039. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00236-3)
- Martínez, R., Larios, M., & Pérez, J. (2021). Comportamiento estructural de postes de concreto armado centrifugado ante acciones de viento. *Revista Mexicana de Ingeniería Estructural*, 38(2), 78–95.
- Méndez, E., Palacios, R., & Yauri, A. (2022). Simulación de cargas de viento en SAP2000 usando datos de NOWS para análisis estructural. *Revista Científica de Ingeniería y Tecnología*, 15(2), 139–150.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2021). Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma E.020: Cargas. Lima, Perú.
- NTP 339.027. (2010). Postes de concreto armado centrifugado – Requisitos y ensayos. Instituto Nacional de Calidad – INACAL.
- Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Valverde, R., Aguilar, F., & Gamarra, D. (2020). Análisis de vulnerabilidad de postes eléctricos en zonas de vientos extremos. *Ingeniería y Ciencia*, 10(1), 43–55.
- Yan, B., Fu, G., & Wang, W. (2018). Performance evaluation of transmission lines exposed to strong winds using full-scale test and numerical modeling. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(12), 1559–1574. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1450510>
- Zhang, Y. (2006). Structural failure analysis of transmission line towers under wind loading. *Wind and Structures*, 9(1), 1–16.
- Zhou, H., Gu, M., & Quan, Y. (2020). Dynamic analysis of transmission towers under spatially varying downburst winds. *Engineering Structures*, 206, 110137. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110137>
- Zhou, Y., & Kareem, A. (2001). Gust loading factors for flexible structures. *Journal of Structural Engineering*, 127(2), 168–175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:2\(168\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:2(168))
- Zhu, L., & Chen, X. (2013). Wind-induced dynamic responses of a transmission tower-line system subjected to correlated downbursts. *Engineering Structures*, 49, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.016>
- Zhu, L., Xu, Y. L., & Zhang, N. (2015). Field measurement and stochastic modeling of typhoon wind characteristics in coastal areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 138, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.008>