

Desconexión de líneas de transmisión en una red eléctrica y su impacto en los flujos de potencia durante la presencia de fenómenos naturales con altas velocidades de viento

Emmanuel Lopez-Gutierrez¹ , Jorge Sanchez-Jaime¹ , Ofelio Gaona-Lopez² , Julio Cesar Santana-Becerril¹ 

¹ Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Toluca

² Centro Nacional de Control de Energía

Email: MM23281641@toluca.tecnm.mx

Resumen— En este trabajo se emplea una curva de fragilidad que describe la probabilidad de falla de una línea de transmisión con relación a velocidades de viento. Adicionalmente se realiza una simulación con el método de Monte Carlo para predecir la desconexión de líneas de transmisión de la red de prueba IEEE-39 de Nueva Inglaterra, ante la presencia de altas velocidades de viento. Finalmente, se analizan los flujos de potencia antes y después de la presencia del fenómeno natural.

Palabras Clave — Curva de fragilidad, flujos de potencia, líneas de transmisión, método Monte Carlo, sistema eléctrico de potencia.

Abstract— In this work, a fragility curve is used to describe the probability of failure of a transmission line in relation to wind speeds. Additionally, Monte Carlo simulation is employed to predict the disconnection of transmission lines in the IEEE-39 bus system from New England under high wind speeds. Finally, power flows are analyzed before and after the occurrence of the natural phenomenon.

Keywords — Electric power system, fragility curves, Monte Carlo Method, power flows, transmission lines.

I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global ha intensificado la presencia de fenómenos naturales con altas velocidades de viento, causando graves afectaciones. Entre sus principales consecuencias se encuentran los daños operacionales y el deterioro a la infraestructura eléctrica, lo que provoca la interrupción del suministro de energía, afectando a diversos sectores. En este trabajo solo se consideran las afectaciones en la operación del sistema eléctrico.

Las regiones más vulnerables a estos fenómenos son las islas, zonas costeras y llanuras, donde los vientos alcanzan mayor intensidad. En 2023, el huracán Otis provocó la salida de operación de 50 líneas de transmisión, una de 400 kilovolts (kV), cuatro de 230 kV, y 45 de 115 kV [1].

En la actualidad, cuando se pronostican fenómenos con altas velocidades de viento, la organización encargada del control y suministro de energía desconecta los elementos situados en las posibles zonas afectadas, en vez de desactivar solo aquellos que tienen alta probabilidad de fallar.

Por esta razón, en esta investigación, se utiliza una curva de fragilidad para determinar la probabilidad de falla de una línea de transmisión, ante altas velocidades de viento. Y así mismo, con la simulación de Monte Carlo, se predecirá qué líneas fallarán y en qué momento. Finalmente, una vez identificadas las desconexiones en el sistema, se llevará a cabo una simulación de flujo de potencia y se compararán los resultados obtenidos, antes y después de la presencia del fenómeno natural.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

A. Sistema eléctrico de potencia

Un sistema eléctrico de potencia es el conjunto de instalaciones y equipos eléctricos para producir (utilizando energías primarias), transportar y suministrar energía eléctrica. Estos sistemas se estructuran en tres niveles; generación, transmisión y distribución; los cuales, se interconectan en subestaciones y centros de transformación, donde se localizan los dispositivos de control y protección del sistema [2].

B. Flujos de potencia

El estudio de flujo de potencia es una herramienta fundamental para analizar un sistema de transmisión o distribución de energía eléctrica en régimen permanente. Es de gran importancia en la planeación, diseño y expansión futura de los sistemas eléctricos de potencia. La información que se obtiene en el análisis, son, la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada bus, como también, la potencia real y reactiva que circula en cada línea. En esta investigación se implementa el método de Newton Raphson debido a su precisión y rapidez.

C. Curva de fragilidad

Las curvas de fragilidad son representaciones gráficas que muestran la probabilidad condicional de que un sistema o componente alcance o supere un cierto nivel de daño en función de un valor específico de la demanda. En la Figura 1, se muestra una curva de fragilidad para líneas de transmisión. En este estudio, se implementará una curva de fragilidad que vincula la probabilidad de fallo de una línea de transmisión con las velocidades del viento.

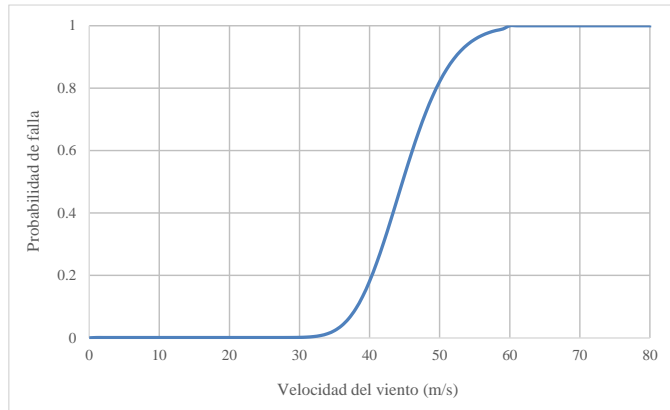


Figura 1. Curva de fragilidad de una línea de transmisión [3].

D. Método Monte Carlo

El método Monte Carlo es una técnica utilizada para resolver problemas estocásticos o deterministas, mediante la generación de números aleatorios. Este, se implementa en cálculos matemáticos complejos; la estadística en medicina; el análisis de datos en ingeniería y en evaluación de la confiabilidad.

1) Características de Monte Carlo

Si se considera un sistema eléctrico, Q representa la indisponibilidad de este y x_i una variable binaria, la cual establece que [4]:

$x_i = 0$ si el sistema está en estado operativo

$x_i = 1$ si el sistema está en estado de falla

Por ello, la estimación de la indisponibilidad del sistema se da por:

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

donde N es el número de simulaciones realizadas.

La varianza de muestra no sesgada es:

$$V(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{Q})^2 \quad (2)$$

Si el tamaño de la muestra es lo bastante grande, la ecuación anterior puede ser aproximada por:

$$V(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{Q})^2 \quad (3)$$

Debido que x_i es una variable binaria, se tiene:

$$\sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

Sustituyendo la ecuación 1 y 4, en la ecuación 3, tenemos:

$$V(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2x_i \bar{Q} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{Q}^2$$

$$V(x) = \bar{Q} - 2\bar{Q}^2 + \bar{Q}^2$$

$$V(x) = \bar{Q} - \bar{Q}^2 \quad (5)$$

Es fundamental destacar que la ecuación 1 proporciona únicamente una estimación de la indisponibilidad del sistema. La incertidumbre asociada a esta estimación puede evaluarse a través de la varianza de la estimación esperada.

$$V(\bar{Q}) = \frac{1}{N} V(x)$$

$$V(\bar{Q}) = \frac{1}{N} (\bar{Q} - \bar{Q}^2) \quad (6)$$

La precisión del método de Monte Carlo puede medirse a través del coeficiente de variación, el cual se define como:

$$a = \sqrt{V(\bar{Q}) / \bar{Q}} \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación 6 en la 7, tenemos:

$$N = \frac{1 - \bar{Q}}{a^2 \bar{Q}} \quad (8)$$

E. Caso de estudio

Se seleccionó el sistema eléctrico de Nueva Inglaterra, conocido como "red IEEE de 39 nodos". La red está compuesta por 10 generadores, 21 cargas, 46 líneas de transmisión y 12 transformadores [5].

Para la simulación, se utilizaron las velocidades de viento del huracán Otis, el cual impactó en las costas de Acapulco, Guerrero el 25 de octubre del 2023 [6]. Cabe mencionar que se consideraron las velocidades a partir de las 00:00 horas del 24 de octubre hasta las 15:00 horas del 25 de octubre, comprendiendo un periodo de 39 horas. Con la curva de fragilidad se asignó la probabilidad de falla para cada una de las velocidades, como se muestra en la Tabla 1.

Después, la red se dividió en 65 zonas y se propuso la trayectoria del posible fenómeno natural, en este caso, un huracán; como se muestra en la Figura 2. Con las velocidades de viento, se asignó la probabilidad de falla en cada una de las zonas, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Probabilidad de falla

Hora	Velocidad de viento (km/h)	Velocidad de viento (m/s)	Categoría del huracán	Probabilidad de falla (%)
0	85	23.6111	Tormenta tropical	0.001000
3	100	27.7778	Tormenta tropical	0.001053
6	100	27.7778	Tormenta tropical	0.001053
9	110	30.5556	Tormenta tropical	0.001990
12	130	36.1111	I	0.041513
15	205	56.9444	III	0.977311
18	230	63.8889	IV	1.000000
21	260	72.2222	V	1.000000
24	270	75.0000	V	1.000000
27	215	59.7222	IV	0.997095
30	175	48.6111	II	0.754190
33	130	36.1111	I	0.041513
36	95	26.3889	Tormenta tropical	0.001010
39	55	15.2778	Baja presión	0.001000

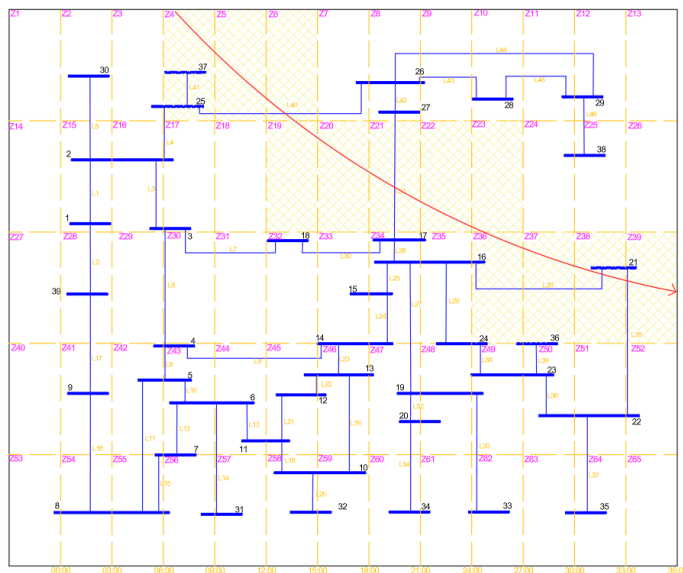


Figura 2. Trayectoria del huracán a través de la red IEEE-39.

En el método Monte Carlo, se eligió la velocidad del viento como variable aleatoria, dado que, para fines de este estudio, es el parámetro que influye directamente en la desconexión de una línea de transmisión. Con la simulación, en un script en lenguaje Python, se generaron números aleatorios dentro del rango [0,1] y se compararon respecto a la probabilidad de falla en cada una de las zonas, siguiendo la siguiente condición [4]:

$$S_i = \begin{cases} 0 & \text{si } U_i \geq FU_i \\ 1 & \text{si } 0 \leq U_i \leq FU_i \end{cases} \quad (9)$$

Donde S_i es el estado i -ésimo componente, FU_i la probabilidad de falla y U_i el número aleatorio generado; para garantizar la fiabilidad del método, se realizaron 10,000 iteraciones. Con ello, se determinó que líneas de transmisión fueron afectadas debido a las altas velocidades de viento.

Una vez identificadas las líneas de transmisión que se desconectaron y el momento en que ocurrió, se procedió a simular un estudio flujos de potencia por hora durante la permanencia del huracán, implementando el software PSS@E en Python. Además, si una línea de transmisión se desconecta, se actualiza su estado y se excluye de los estudios de flujos de potencia posteriores. Al finalizar, se recopilaron los resultados de cada análisis, incluyendo voltajes en los buses, potencia activa, potencia reactiva y las pérdidas registradas durante las 39 horas de duración del huracán.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación con la simulación del impacto de un huracán en la red IEEE-39, considerando la trayectoria previamente indicada y una duración de 39 horas. Se presenció la desconexión de la línea de transmisión número 31 ubicada entre los buses 17 y 27, en la hora 18; y la línea 28 entre los buses 16 y 21, en la hora 24. Esto ocurrió debido a que el huracán impactó la zona en la que se encuentra, con velocidades de viento mayores a 215 km/h.

Como resultado, se generaron cambios en los flujos de potencia, en la Figura 3, se muestran los voltajes en cada uno de los nodos, antes y después de que la línea se desconectara. Como puede observarse, hubo disminución de voltaje en varios nodos, principalmente aquellos colindantes con el nodo número 17, el cual, presentó la desconexión de una línea.

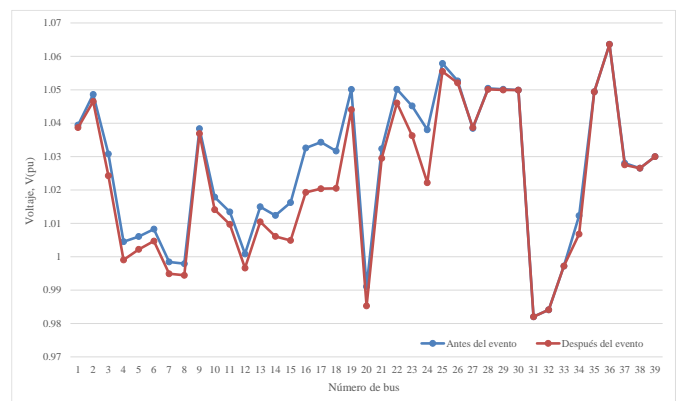


Figura 3. Voltajes en la red antes y después de la presencia del huracán.

Así mismo, se vieron afectadas las potencias, activa y reactiva. En la Figura 4, se observa como la potencia activa se sobrecargó en las líneas 29, 36 y 38; las cuales son líneas que están directamente relacionada con el bus 17, en donde, se desconectó la línea número 31.

Por otro lado, la potencia reactiva en la Figura 5, se vio afectada en más líneas, lo que indica un reacomodo de los flujos de potencia reactiva en la red.

DECLARACIÓN ÉTICA

Los autores declaran que el trabajo es original y que se reconoce a todos los autores de las fuentes citadas.

REFERENCIAS

- [1] **Comisión Federal de Electricidad [CFE].** Otis, Crónica del huracán que oscureció acapulco y de los días para volver a iluminarlo. Primera edición, México, 2024. Disponible en: https://app.cfe.mx/Libros/Libro_Otis.pdf
- [2] **Barrero Gonzalez, Fermin.** Sistemas de energía eléctrica. Ediciones Paraninfo, SA, pp 1-32, 2004.
- [3] **Liu, H., Zhou, Y., & Panteli, M.** Visualization of Network Vulnerability During Extreme Weather Events for Situation Awareness Enhancement. In 2018 IEEE Power and Energy General Meeting, pp 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586494>
- [4] **Billinton, R., Li, W.** Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. Springer Science and Business Media, pp 33-73, 131-208, 1994.
- [5] **Ríos, M., Amaranto, H.** Proyección diaria del riesgo de inestabilidad de voltaje por efecto probabilístico de la demanda. IEEE Latin America Transactions. Vol. 5, pp 611-615, 2007. <https://doi.org/10.1109/T-LA.2007.4445714>
- [6] **Peláez Pavón, L.** Huracán Otis del océano Pacífico, del 22 al 25 de octubre de 2023. Servicio Meteorológico Nacional de México, 2023. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2023-Otis%20.pdf>

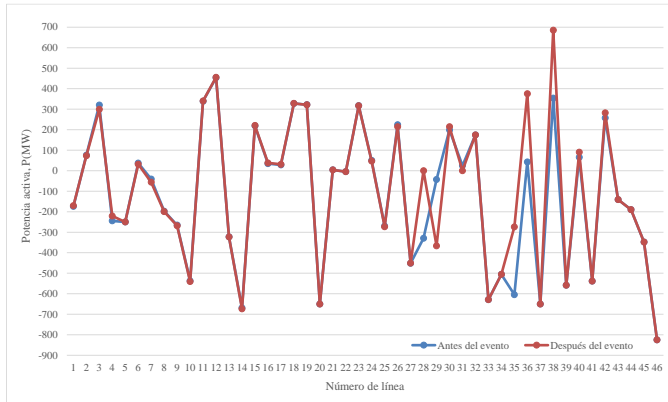


Figura 4. Potencia activa en la red antes y después de la presencia del huracán.

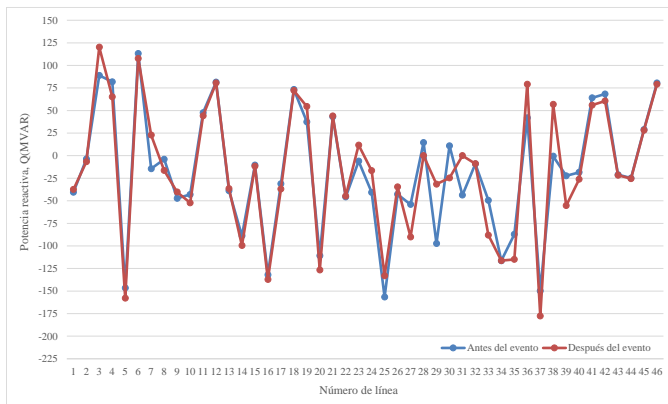


Figura 5. Potencia reactiva en la red antes y después de la presencia del huracán.

IV. CONCLUSIONES

Implementando la simulación de Monte Carlo y la curva de fragilidad, se logra predecir la desconexión de líneas de transmisión en la red IEEE-39 (como un caso de estudio) durante la presencia de un fenómeno natural con altas velocidades de viento. Y con dicha información, se pudieron ejecutar el análisis de flujos de potencia antes y después del evento, con la finalidad de obtener los voltajes en cada bus, y las potencias, activa y reactiva en cada una de las líneas. Con esta investigación, será posible que las compañías suministradoras de energía eléctrica tengan una herramienta predictiva que ayude a tomar decisiones en el despacho de la energía con la finalidad de reducir las afectaciones económicas, mantener los servicios básicos y reducir también las pérdidas más sensibles como son las humanas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo financiero otorgado en la convocatoria 2025 para proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación. Los autores también agradecen el apoyo económico brindado por SECIHTI al primer y último autor para llevar a cabo el estudio de la maestría.