

## **AUTOAMORTIGUAMIENTO DE CABLES TIPO OPGW: CRITERIO DE INFORMACIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL MODELO**

### **OPGW CABLE SELF-DAMPING: INFORMATION CRITERIA FOR MODEL SELECTION**

**Enrique E. Löser<sup>a</sup>, Andrés E. Ajras<sup>a</sup> y Damián F. Campos<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Comahue,  
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina,  
enrique.loser@fain.uncoma.edu.ar, andres.ajras@fain.uncoma.edu.ar, damian.campos@fain.uncoma.edu.ar*

**Palabras clave:** autoamortiguamiento, incertidumbre, criterio de información.

**Resumen.** El automortiguamiento de los cables tipo OPGW empleados en las líneas aéreas de transmisión eléctrica comúnmente se caracteriza mediante expresiones empíricas. Estas permiten calcular la potencia disipada por unidad de longitud del cable como una función no lineal tanto de la amplitud de la vibración y de la frecuencia, así como de la carga axial del cable. Los parámetros de estas expresiones se determinan ajustando los datos experimentales obtenidos de ensayos que se realizan en vanos de laboratorio de acuerdo con normas internacionales de aplicación. En diversos estudios referidos al tema se ha comprobado que pequeñas variaciones en el valor de estos parámetros pueden conducir a una gran dispersión en la estimación de la potencia disipada. Complementariamente, se han desarrollado diversos modelos teóricos tendientes a explicar con una base de sustento físico el complejo mecanismo del autoamortiguamiento. Cada modelo posee un conjunto de parámetros que tienen de por sí, una variabilidad e incertidumbre asociada, lo cual fundamenta el empleo de métodos estadísticos para su análisis. En este trabajo se presenta una metodología estadística que aplica criterios de información con el objetivo de comparar los principales modelos disponibles en la literatura, y evaluar cuál de ellos representa el mejor ajuste de los datos experimentales.

**Keywords:** self-damping, uncertainty, information criteria.

**Abstract.** The self-damping of OPGW cables used in overhead power transmission lines is usually characterized by empirical expressions. These allow calculation of the power dissipated per unit cable length as a nonlinear function of both the vibration amplitude and frequency, as well as the axial load on the cable. The parameters of these expressions are determined by fitting experimental data obtained from tests performed on laboratory spans according to international application standards. Several studies on the subject have shown that minor variations in the value of these parameters can lead to a large dispersion in the estimation of the dissipated power. In addition, several theoretical models have been developed to explain the complex mechanism of self-damping with a physical basis. Each model has a set of parameters associated with variability and uncertainty, which justifies using statistical methods for their analysis. This paper presents a statistical methodology that applies information criteria to compare the leading models available in the literature, and evaluate which represents the best fit for the experimental data.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los cables OPGW (Optical Ground Wire) se utilizan para proteger líneas aéreas de transmisión de energía de las descargas eléctricas atmosféricas, y también se emplean para la transmisión de datos (Günday y Karlık, 2013). En efecto, las líneas son las estructuras mecánicas con mayor extensión de elementos esbeltos y flexibles, lo que hace que los cables estén muy expuestos a la acción del viento (Cosmai et al., 2017). Las vibraciones producidas por el viento pueden analizarse, en principio, según la configuración de la línea.

Si la línea tiene un solo conductor por fase, o si se analiza solo el cable de guardia, la causa fundamental de la vibración se debe al desprendimiento de vórtices de Von Karman (Goldstein, 1950) (Bishop y Hassan, 1964), y el fenómeno se denomina vibración eólica (EPRI, 2006). Este fenómeno genera pequeñas fuerzas alternas en los cables, perpendiculares a la dirección del viento con movimientos de pequeña amplitud y alta frecuencia (entre 5 y 100 Hz). Constituyéndose en uno de los principales problemas en las líneas de transmisión, ya que con frecuencia provocan fallas por fatiga en los hilos de los cables o en los accesorios de soporte y protección. Los componentes que merecen especial atención son las grapas tanto de suspensión como las de los amortiguadores (Kießling et al., 2014).

La capacidad de autoamortiguamiento de los cables es una característica física que define su capacidad de disipar energía internamente mientras vibran (Hardy, 1990). En el caso de los cables trenzados convencionales, la disipación de energía se atribuye principalmente a la fricción debida a los pequeños movimientos entre los cordones superpuestos cuando el cable se flexiona (Cardou y Jolicoeur, 1997).

Las pruebas experimentales en vanos de laboratorio son tratadas, en normas internacionales y por diversos autores, con el objetivo de identificar expresiones que intentan explicar la capacidad de autoamortiguamiento de los cables y conductores de una misma familia (es decir, ACSR, OPGW)(CIGRE, 2011)(Noiseux, 1992)(Diana et al., 2000). Debido a esto, se observa una multiplicidad de modelos desarrollados para el estudio del autoamortiguamiento de los cables sin que ninguno pueda representar la física del problema de forma satisfactoria. Esto es una consecuencia de la complejidad de los fenómenos físicos involucrados en el autoamortiguamiento en contraste con la necesidad de tener modelos de rápida aplicación en situaciones prácticas, que expliquen correctamente las observaciones y conserven un alto poder de predicción.

En este trabajo, se aplican técnicas estadísticas con el objetivo de analizar el poder explicativo de tres modelos para evaluar el autoamortiguamiento de los cables. Estas técnicas permiten establecer un marco de referencia para comparar los distintos modelos, al obtener una serie de métricas a partir de los datos experimentales, y el modelo estadístico que cada modelo empírico define *per se*.

## 2. MOTIVACIÓN

La modelización del autoamortiguamiento de un cable ha sido objeto de debate durante las últimas décadas. En este sentido se desarrollaron diversas metodologías experimentales para su determinación. Según la norma IEC 62567-2013 se puede caracterizar la capacidad de disipación de energía de los conductores y cables aéreos mediante la aplicación del Método de la Onda Estacionaria Inversa (ISWR) y el Método de la Potencia (PT).

Noiseux (1992) adoptó un modelo de una viga tipo Euler-Bernoulli para describir el comportamiento de flexión histerética de los conductores eléctricos. En este contexto, la disipación de energía de la sección transversal está controlada por un factor de pérdida histerética que es función de la amplitud de la vibración. Las expresiones para la energía disipada se derivan del

modelo, y a partir de ensayos basados en el método ISWR, el autor pudo establecer la dependencia entre el factor de pérdida histerético y la frecuencia.

Foti y Martinelli (2018) desarrollaron un enfoque unificado del autoamortiguamiento del cable basado en la rigidez a la flexión de un conductor y su comportamiento frente a las sollicitaciones actuantes.

Por lo expuesto, el estado del arte del autoamortiguamiento presenta entonces una cuestión interesante: cómo determinar qué modelo es el más representativo del problema. El criterio para obtener dicho modelo puede tener distintas justificaciones, por ejemplo, se puede adoptar como criterio comparativo el rigor físico usado en la deducción del modelo. Se puede también ser más pragmático y demandar un modelo que represente los datos observados de la manera más fiel. Esto entrega dos extremos en cuanto a metodología: aquel informado por la física del sistema observado, y su opuesto, informado por los datos observados del sistema. En función de esto, la idea del presente trabajo es obtener un marco de referencia donde los méritos de los distintos enfoques de modelado sean evaluados.

### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El cable ensayado es del tipo OPGW, compuesto por dos capas de acero de envoltura de aluminio e hilo de aleación de aluminio, y un núcleo en el que una carcasa de aluminio rodea varias capas de materiales poliméricos e hilos de fibra óptica. Los detalles de la configuración se muestran en la Fig. 1 y en la Tabla 1.

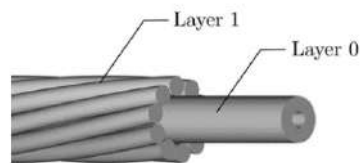


Figura 1: Cable OPGW.

Tabla 1: Configuración Geométrica del cable OPGW.

Capa Nro.	Hilos por capa	$\Phi$ Hilo [mm]	Material
0	1	8.3	Aleación de Aluminio
1	10	3.55	Aluminio con cobertura de Acero

El Laboratorio de Ensayo de Conductores (LEC) de la Universidad Nacional del Comahue dispone de un banco de ensayos de cables con una longitud de 30 metros, como puede verse en la Fig. 2. El mismo cuenta con grapas de sujeción en ambos extremos, un sistema de control para la tensión de tiro y un excitador electromecánico.

En el vano de ensayo se reproduce el efecto del viento sobre el cable, generando vibraciones en el mismo. Esta energía de vibración se contrarresta producto del autoamortiguamiento del cable (en ausencia de otros amortiguadores). Cuando se dan condiciones de velocidad de viento moderada (inferior a 7 m/s), el desprendimiento de vórtices de Von Karman inducirá vibraciones a frecuencias que dependen de la relación de Strouhal. Este número adimensional es aproximadamente 0,185 para todos los cables típicos de las líneas eléctricas (Falco y Gasparetto, 1974). El excitador se controla manualmente mediante un accionamiento de frecuencia

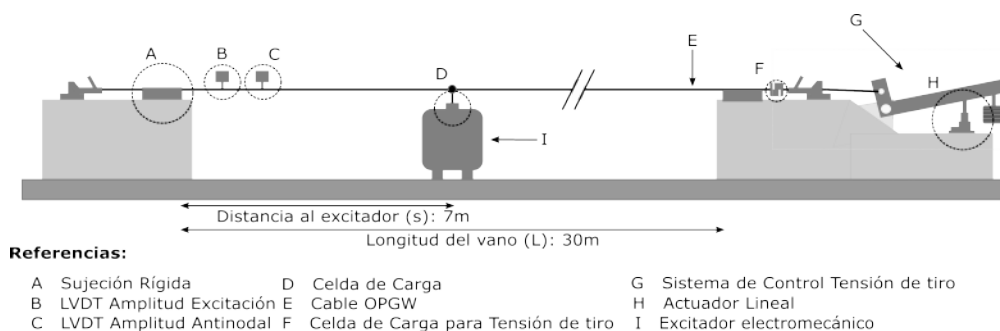


Figura 2: Esquema del Banco de Ensayo.

variable (VFD). Ajustando la frecuencia de accionamiento del cable, se pueden sintonizar sus frecuencias de resonancia. La fuerza de excitación se mide con una celda de carga.

Como el sistema es sensible a la variabilidad de la carga de tensión, un sistema de control de bucle cerrado mantiene la tensión dentro de un rango específico. Con la medición proporcionada por la celda de tensión, el sistema aplica constantemente ajustes mediante un actuador eléctrico lineal al brazo de palanca.

En este trabajo se empleó el método de la potencia para analizar el cable OPGW. Para este procedimiento de ensayo, el cable se monta en el banco de ensayos y se lo hace vibrar en sus frecuencias naturales a la amplitud de vibración prescrita.

Dado que la respuesta del cable es no-lineal, no siempre es posible producir señales sinusoidales puras en la resonancia. Por lo tanto, se aplicó una transformada de Fourier a la señal para obtener la amplitud y la fase del componente principal de la vibración.

Cuando se alcanza una condición estacionaria, la energía introducida por el excitador en el cable, a lo largo de un ciclo de vibración, es igual a la disipada  $E_{diss}$  por el tramo. La energía introducida en el cable, y disipada en gran parte por su mecanismo de autoamortiguamiento, se determina midiendo la fuerza  $F$  que actúa entre el conductor y el excitador y el desplazamiento del punto de conducción  $Y_f$ . Para ello, se instalan una celda de carga y un sensor de desplazamiento LVDT en el punto de conexión con el excitador, registrándose también la diferencia de fase  $\theta_d$  entre las señales. Las variables se relacionan a través de la siguiente ecuación:

$$E_{diss} = \pi \cdot F \cdot Y_f \cdot \sin \theta_d \quad (1)$$

El procedimiento de prueba requiere la localización de los antinodos del tramo medio y el siguiente ajuste de la amplitud antinodal, para alcanzar el nivel prescrito  $Y$  para cada frecuencia de resonancia sintonizable  $f$ . Finalmente, la potencia disipada por el cable  $P_{SD}$  se calcula mediante la siguiente ecuación

$$P_{SD} = f_{diss} \quad (2)$$

Durante el ensayo experimental, todas las variables (fuerza de excitación, carga de tensión y desplazamientos) se registran con un sistema de adquisición de datos QuantumX (<https://hbm.com>) y se posprocesan con un *software* de procesamiento de señales desarrollado *ad hoc*.

#### 4. CRITERIOS DE INFORMACIÓN

La herramienta elegida para comparar los distintos modelos son los llamados criterios de información. Vehtari et al. (2016) detallan metodologías que permiten evaluar el poder explicativo de un grupo de modelos. Dicho de otra manera, dado un conjunto de datos  $\mathcal{D} = \{y_i\}$ ,

$i = 1, \dots, n$  generados por un proceso desconocido  $\mathcal{F}$  se desea evaluar una serie de modelos estadísticos  $\{\mathcal{M}_i(\theta_i)\}$ ,  $i = 1 \dots k$  con parámetros  $\theta_i$  que se consideran aproximaciones de  $\mathcal{F}$ . Es así que cada modelo define la cantidad  $p(y | \theta) = \prod_{i=1}^n p(y_i | \theta)$ , que junto a una distribución a priori  $p(\theta)$ , pueden definir una distribución posterior  $p(\theta | y)$  empleando el teorema de Bayes. La distribución posterior predictiva  $p(\tilde{y} | y) = \int p(\tilde{y}_i | \theta) p(\theta | y) d\theta$  puede luego obtenerse marginalizando los parámetros. Para mantener la comparabilidad con el conjunto de datos dado, y para obtener una interpretación más fácil de las diferencias en la escala del número efectivo de parámetros, se define una medida de precisión predictiva para los  $n$  puntos de datos tomados de uno en uno. De esta manera se define el valor esperado del logaritmo de la densidad predictiva puntual que viene dado por la siguiente expresión:

$$elpd = \sum_{i=1}^n \int p_t(\tilde{y}_i) \log p(\tilde{y}_i | y) d\tilde{y}_i \quad (3)$$

Donde  $p_t(\tilde{y}_i)$  representa la distribución real que ha generado los datos, es decir, la definida por el proceso  $\mathcal{F}$ . Los criterios de información son entonces formas de aproximar el  $elpd$  mediante distintas técnicas.

Los autores proponen el uso del logaritmo de la predicción predictiva  $\log(p(\tilde{y}_i | y))$  para calcular la siguiente cantidad:

$$lpd = \sum_{i=1}^n \log p(y_i | y) = \sum_{i=1}^n \log \int p(y_i | \theta) p(\theta | y) d\theta \quad (4)$$

En este caso, el valor  $lpd$  se calcula sobre los datos observados y representa una sobrestimación del  $elpd$  para datos futuros. El objetivo de calcular estas cantidades reside en definir una escala que permita comparar los distintos modelos.

El criterio usado en este trabajo es la validación cruzada LOO (Leave-One-Out). Este método consiste en calcular el  $elpd$  de los datos observados al considerar la esperanza de la bondad de ajuste de los datos fuera de observación como:

$$elpd_{loo} = \sum_{i=1}^n \log p(y_i | y_{-i}) \quad (5)$$

Donde  $p(y | y_{-i})$  es la densidad predictiva LOO de los datos sin considerar el  $i$  –ésimo punto, y viene dada por la siguiente expresión:

$$p(y | y_{-i}) = \int p(y_i | \theta) p(\theta | y_{-i}) d\theta \quad (6)$$

La implementación para el cálculo del criterio LOO se realizó en lenguaje Python a través de la biblioteca espedífica Arviz (Kumar et al. (2019)).

Dado que los criterios de información necesitan de una serie de modelos estadísticos para ser evaluados, es necesario dar respuesta en cómo convertir los modelos físicos en modelos estadísticos. Esta cuestión, junto con su implementación, se trató con detalle en un trabajo anterior (Campos et al., 2022). De forma concisa, cada modelo físico puede ser incorporado en un modelo estadístico donde los parámetros  $\theta$  son los parámetros del modelo sumados a una serie de parámetros requeridos para formular las distribuciones del modelo estadístico. De esta manera, cada modelo físico define una función  $\mathcal{L}(y_i | x, \theta)$  que entrega la probabilidad de haber observado una serie  $y_i$  de datos dados cuando los parámetros y variables explicativas  $x$

adoptan un determinado valor. Esto a su vez permite la aplicación del teorema de Bayes para luego emplear un criterio de información.

Un subproducto de este proceso es la calibración del modelo físico entendida como la obtención de las distribuciones posteriores de los parámetros del modelo. Es así que se pueden comparar los distintos modelos evaluados en los puntos donde mejor explican los datos experimentales. En resumen, el proceso para realizar la selección de modelos contempla los siguientes pasos:

1. Generar una serie de modelos estadísticos a partir de los modelos físicos.
2. Aplicar inferencia Bayesiana para calibrar los modelos a partir de los datos experimentales.
3. Con los modelos calibrados se pueden calcular las métricas dadas por cada criterio de información.
4. Los modelos son entonces ordenados según su valor de  $elpd$ .

## 5. MODELOS ANALIZADOS

Con el objetivo de aplicar la metodología propuesta, se seleccionaron tres modelos que representan bien el espectro de enfoques antes mencionado. Estos modelos son el detallado por [Foti y Martinelli \(2018\)](#) que representa un modelo con fundamentos físicos rigurosos, dimensionalmente consistente y con una cantidad mínima de parámetros a calibrar.

El siguiente modelo es el propuesto por [Noiseux \(1992\)](#), el cual se encuentra en el medio del espectro. Tiene fundamentos físicos consistentes, sin embargo, el enfoque propuesto por el autor requiere que sea necesario estimar dos parámetros de forma experimental lo que evita que el modelo sea dimensionalmente consistente.

En última instancia se analiza el modelo empírico denominado Ley de la Potencia. Este representa el enfoque basado en los datos experimentales ya que solo relaciona las variables de interés entre sí y requiere del ajuste de cuatro parámetros. Las ecuaciones usadas para cada modelo, junto con sus detalles, se encuentran en la [Tabla 2](#).

Tabla 2: Resumen de los modelos elegidos para su comparación.

Modelo	Ecuación	Variables Explicativas	Parámetros a Calibrar
Foti y Martinelli	$P_d = 4\pi^4 m^2 E I_{max} \beta \frac{y_v^2 f^5}{T^2}$	$y_v, f, T$	$\beta$
Noiseux	$P_d = a 2\pi^3 m^{1+\alpha} f^{5+2\alpha} y_v^{2+\alpha} T^{2-\alpha}$	$y_v, f, T$	$a, \alpha$
Ley de la Potencia	$P_d = k \frac{y_v^l f^m}{T^n}$	$y_v, f, T$	$k, n, l, m$

## 6. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta. En primer término, en la [Fig. 3](#) se presentan las distribuciones *a posteriori* para los parámetros de los distintos modelos.

Se obtuvieron resultados satisfactorios en el proceso de calibración de los distintos modelos. Cabe destacar que en el caso del modelo de Foti y Martinelli ([Fig. 3a](#)) se obtuvo un valor de  $\beta$  cien veces menor al valor predicho por los autores. Esto se puede atribuir a distintas razones, la principal siendo que si bien el modelo fue desarrollado para cables genéricos la estructura

del cable ensayado puede presentar un caso particular en el cual la rigidez flexional  $EI_{max}$  es mucho menor a la predicha por el modelo (Campos et al., 2021). El modelo de Noiseux (Fig. 3b) presenta una corrección importante en su parámetro  $a$ . Esto indica que las cantidades consideradas sobrestiman la potencia disipada en varios órdenes de magnitud. El valor del exponente sin embargo entrega valores cercanos a los obtenidos para otros modelos. En cuanto a la Ley de la Potencia, las distribuciones *a posteriori* son similares a los valores obtenidos por otros autores (Fig. 3c).

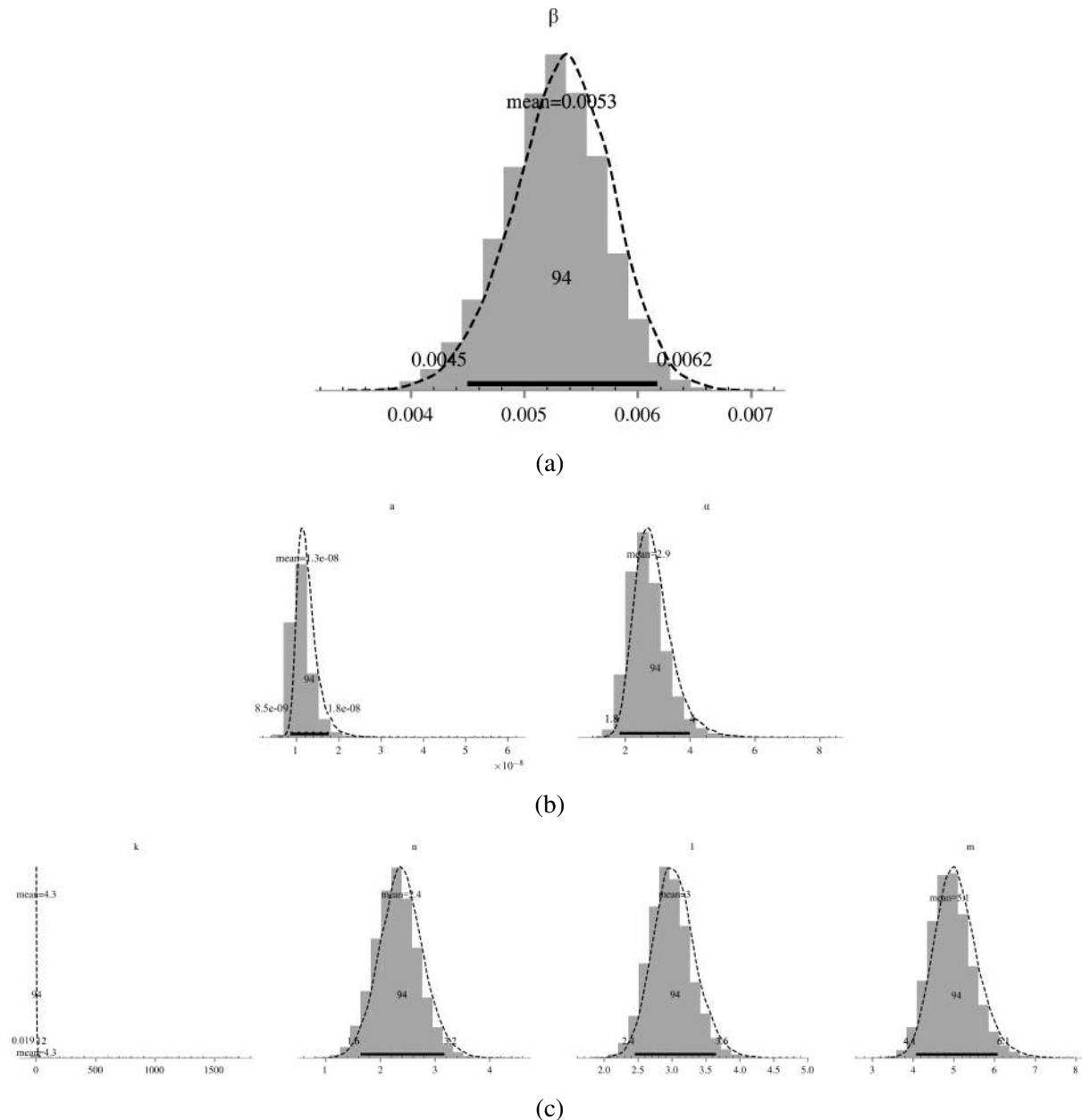


Figura 3: Distribuciones *a posteriori* (a) Foti y Martinelli, (b) Noiseux, (c) Ley de la Potencia.

En la Fig. 4 se presenta la comparación de los distintos modelos con los datos experimentales, junto con las zonas de incertidumbre para distintas frecuencias. Adicionalmente, en la Fig. 4d se exponen los resultados obtenidos mediante la aplicación del criterio LOO a los distintos modelos.

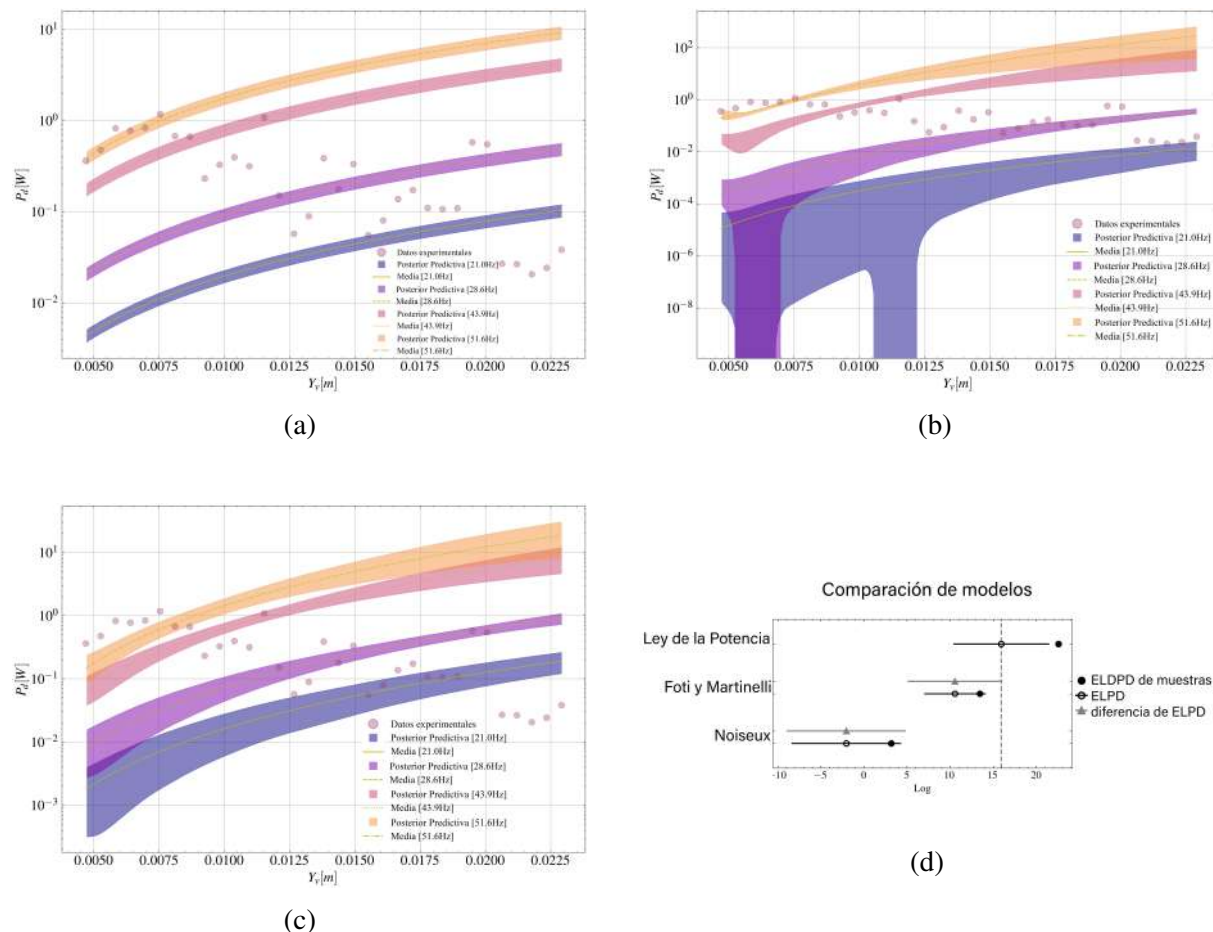


Figura 4: Comparación con datos experimentales (a) Foti y Martinelli, (b) Noiseux, (c) Ley de la Potencia, y (d) Resultados del criterio LOO.

En cuanto a la comparación con los datos experimentales, en el rango de frecuencias donde ocurren las vibraciones eólicas, se puede apreciar que todos los modelos analizados tienen un comportamiento similar. Sin embargo, se observan diferencias morfológicas debido a las distintas distribuciones posteriores de los parámetros de cada modelo.

Tomando como referencia la Fig. 4d, se puede evidenciar el desempeño de los distintos modelos. Por ejemplo, el modelo de Noiseux fue el que peor desempeño mostró. Esto puede ser consecuencia de que las leyes de semejanza usadas por el autor en la deducción del modelo no aplican a este tipo de cable o que el modelo simplemente no es representativo del problema.

Los criterios de información penalizan modelos con mayor número de parámetros, por ello es destacable que en el tope de la escala se encuentren los modelos de Foti y Martinelli y la Ley de la Potencia. Este hecho puede indicar que, si bien la Ley de la Potencia tiene un mayor número de parámetros a ajustar, esta diferencia no afectó su poder explicativo convirtiéndose en una ventaja del modelo.

Se debe destacar otro aspecto interesante relacionado con el valor de  $elpd$  logrado por el



modelo de Foti y Martinelli, y que se relaciona con que el mismo se construye a partir de un solo parámetro. A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que el desarrollo de los autores proporciona una línea de trabajo promisorio que requiere profundizar el trabajo experimental tendiente a entender el papel del factor de ajuste  $\beta$ .

## 7. CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo permitió establecer una escala en donde comparar el poder explicativo de los distintos modelos. Lejos de ser una respuesta definitiva a la cuestión planteada al principio, los resultados obtenidos permitieron entender mejor distintos aspectos del proceso físico simulado por los modelos.

Este trabajo también presentó una oportunidad para profundizar sobre trabajos realizados con anterioridad, mostrando una de las posibles aplicaciones del proceso para convertir modelos físicos en modelos estadísticos. Futuras líneas de investigación en este tema deberán incorporar modelos de complejidad creciente con el objetivo de realizar un *benchmarking* exhaustivo del estado del arte.

## REFERENCIAS

- Bishop R. y Hassan A. The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 277(1368):51–75, 1964. ISSN 0080-4630. doi:10.1098/rspa.1964.0005.
- Campos D., Löser E., y Piovan M. Self-damping of optical ground wire cables: A bayesian approach. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, páginas–, 2022. ISSN 2383-4536. doi:10.22055/jacm.2022.40878.3666.
- Campos D.F., Ajras A.E., y Piovan M.T. Bayesian model calibration for bending stiffness assessment in opgw cables. En *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, páginas 1–5. 2021. doi:10.1109/ICECET52533.2021.9698575.
- Cardou A. y Jolicoeur C. Mechanical Models of Helical Strands. *Applied Mechanics Reviews*, 50(1):1–14, 1997. ISSN 0003-6900. doi:10.1115/1.3101684.
- CIGRE. *State of the art for testing self-damping characteristics of conductors for overhead lines*. December. 2011. ISBN 9782858731732.
- Cosmai U., Van Dyke P., Mazzola L., y Lillien J.L. *Conductor Motions*, páginas 559–711. Springer International Publishing, Cham, 2017. ISBN 978-3-319-31747-2. doi:10.1007/978-3-319-31747-2\_10.
- Diana G., Falco M., Cigada A., y Manenti A. On the measurement of over head transmission lines conductor self-damping. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1):285–292, 2000. ISSN 08858977. doi:10.1109/61.847264.
- EPRI. Transmission line reference book: Wind-induced conductor motion. En *Electrical Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA*. 2006.
- Falco M. y Gasparetto M. On vibrations induced in a cylinder in the wake of another due to vortex shedding. *Meccanica*, 9:325–336, 1974.
- Foti F. y Martinelli L. An enhanced unified model for the self-damping of stranded cables under aeolian vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 182(September):72–86, 2018. ISSN 01676105. doi:10.1016/j.jweia.2018.09.005.
- Goldstein S. *Modern Developments in Fluid Dynamics: An Account of Theory and Experiment Relating to Boundary Layers, Turbulent Motion and Wakes*. número v. 2 En Modern Deve-

- lopments in Fluid Dynamics: An Account of Theory and Experiment Relating to Boundary Layers, Turbulent Motion and Wakes. Clarendon Press, 1950.
- Günday A. y Karlık S.E. Optical fiber distributed sensing of temperature, thermal strain and thermo-mechanical force formations on opgw cables under wind effects. En *2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, páginas 462–467. 2013. doi:10.1109/ELECO.2013.6713885.
- Hardy C. Analysis of self-damping characteristics of stranded cables in transverse vibrations. *Proc Can Soc Mech Eng Forum*, 1:117–122, 1990.
- IEC 62567-2013. IEC 62567-2013 - Methods for testing self-damping characteristics of conductors. Informe Técnico, International Electrotechnical Commission, 2013.
- Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J., y Kaintzyk U. *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. Power Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 9783642978791.
- Kumar R., Carroll C., Hartikainen A., y Martin O. Arviz a unified library for exploratory analysis of bayesian models in python. *Journal of Open Source Software*, 4(33):1143, 2019. doi:10.21105/joss.01143.
- Noiseux D.U. Similarity laws of the internal damping of stranded cables in transverse vibrations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3):1574–1581, 1992. ISSN 19374208. doi:10.1109/61.141877.
- Vehtari A., Gelman A., y Gabry J. Practical bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC. *Statistics and Computing*, 27(5):1413–1432, 2016. doi:10.1007/s11222-016-9696-4.