

Análisis Electromagnético de Cables Submarinos Trifásicos Armados Mediante Modelos 3D

Juan Carlos del-Pino-López^{1*}, Pedro Cruz-Romero¹

¹Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España

*Autor de contacto: vaisat@us.es



Introducción: El alto coste económico de los parques eólicos offshore requiere optimizar su diseño y caracterización, como es el caso de los cables trifásicos armados de interconexión y exportación de la energía. Hasta ahora estos cables se han caracterizado en base a suposiciones erróneas derivadas de geometrías 2D que omiten el efecto del trenzado de fases y armadura (Figura 1), lo que lleva a cables sobredimensionados [1-3]. Un análisis en 3D se hace necesario para un adecuado diseño y caracterización de estos cables, pero su complejidad requiere de elevados recursos y tiempos de computación.

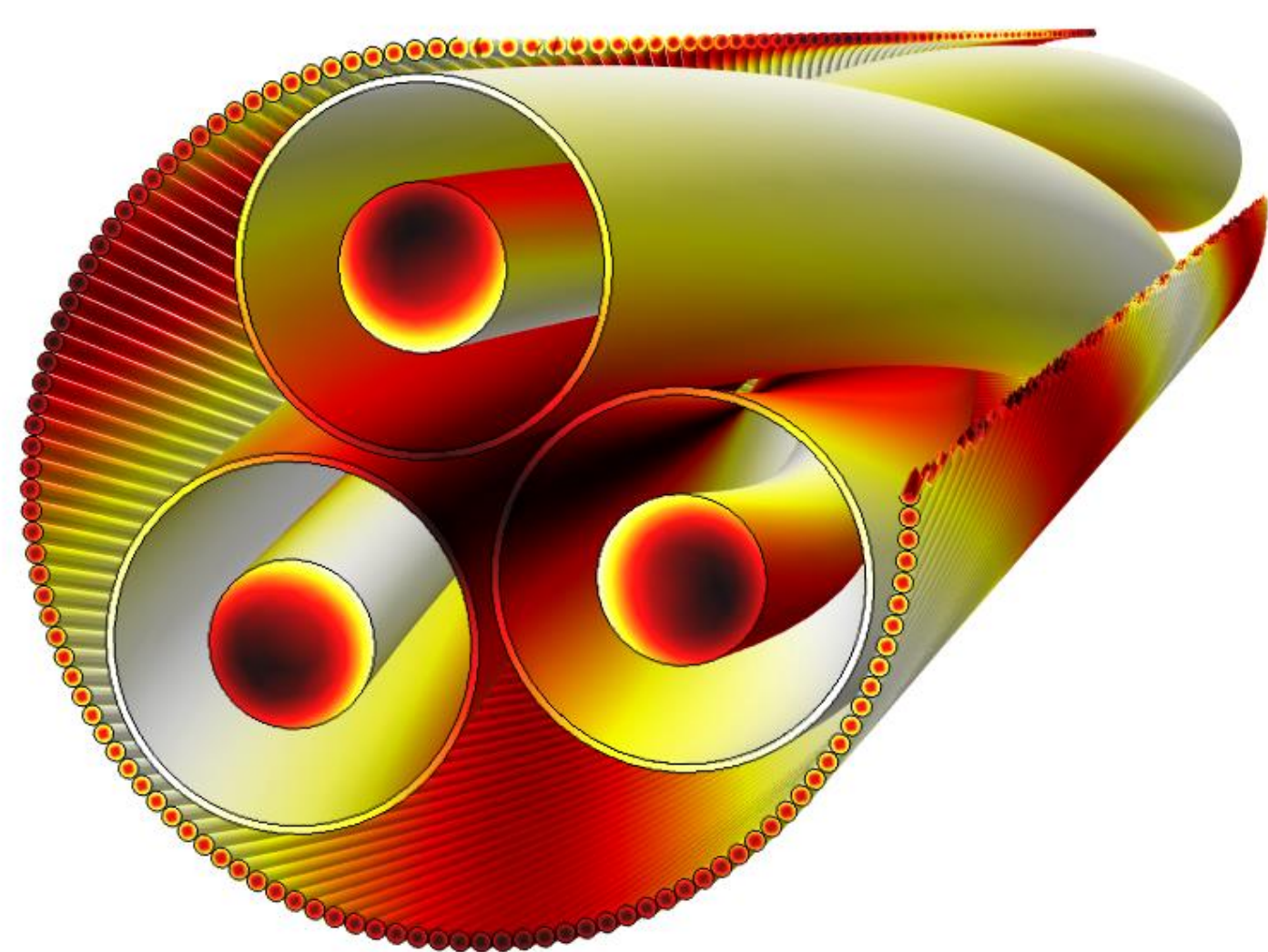


Figura 1. Pérdidas caloríficas en cable trifásico armado.

Modelo electromagnético 3D: Este estudio ha analizado en 3D el comportamiento electromagnético a 50 Hz de 5 cables trifásicos armados mediante el módulo AC/DC de COMSOL Multiphysics, identificando un patrón de periodicidad (en la geometría y la física) que permite acortar notablemente la longitud del modelo a simular (Figura 2), reduciéndose los requisitos y tiempos de computación de forma drástica. Esta longitud es igual al parámetro CP (Crossing Pitch), que es función del sentido y paso de trenzado de fases y armadura (P_{arm} y P_{fases}) (mismo sentido o en el contrario) [4,5].

$$CP = \frac{1}{P_{arm}^{-1} + P_{fases}^{-1}} \text{ (contra)} \quad CP = \frac{1}{|P_{arm}^{-1} - P_{fases}^{-1}|} \text{ (mismo)}$$

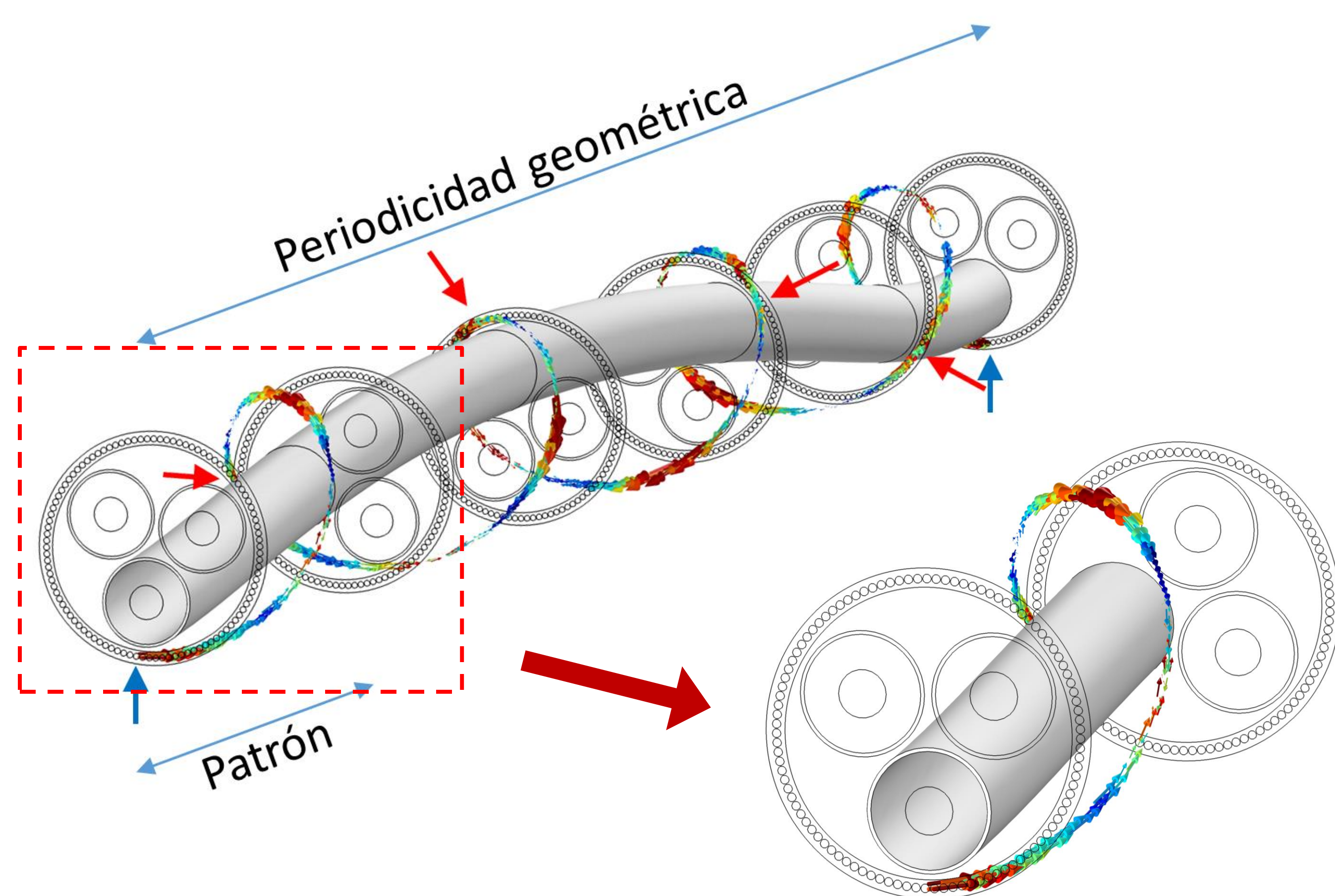


Figura 2. Periodicidad geométrica y patrón para modelo 3D.

Referencias

1. W. Frelin, et. al., Measurements of losses on three core power cables, *JiCable* (2015).
2. M. Hatlo, et. al., Accurate analytical formula for calculation of losses in three-core submarine cables, *JiCable* (2015).
3. F. F. da Silva, et. al., Understanding losses in three core armoured submarine cables, *CIGRÉ Session* (2014).
4. J. C. del-Pino-López, M. Hatlo, P. Cruz-Romero, A 3D Parametric Analysis of Three-core Armoured Power Cables Series Impedance, *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies* (2018).
5. J. C. del-Pino-López, M. Hatlo, P. Cruz-Romero, On simplified 3D finite element simulations of three-core armoured power cables, *Energies*, **11**, 3081 (2018).

La condición de contorno de periodicidad debe configurarse adecuadamente teniendo en cuenta la orientación de los extremos origen y destino (Figura 3).

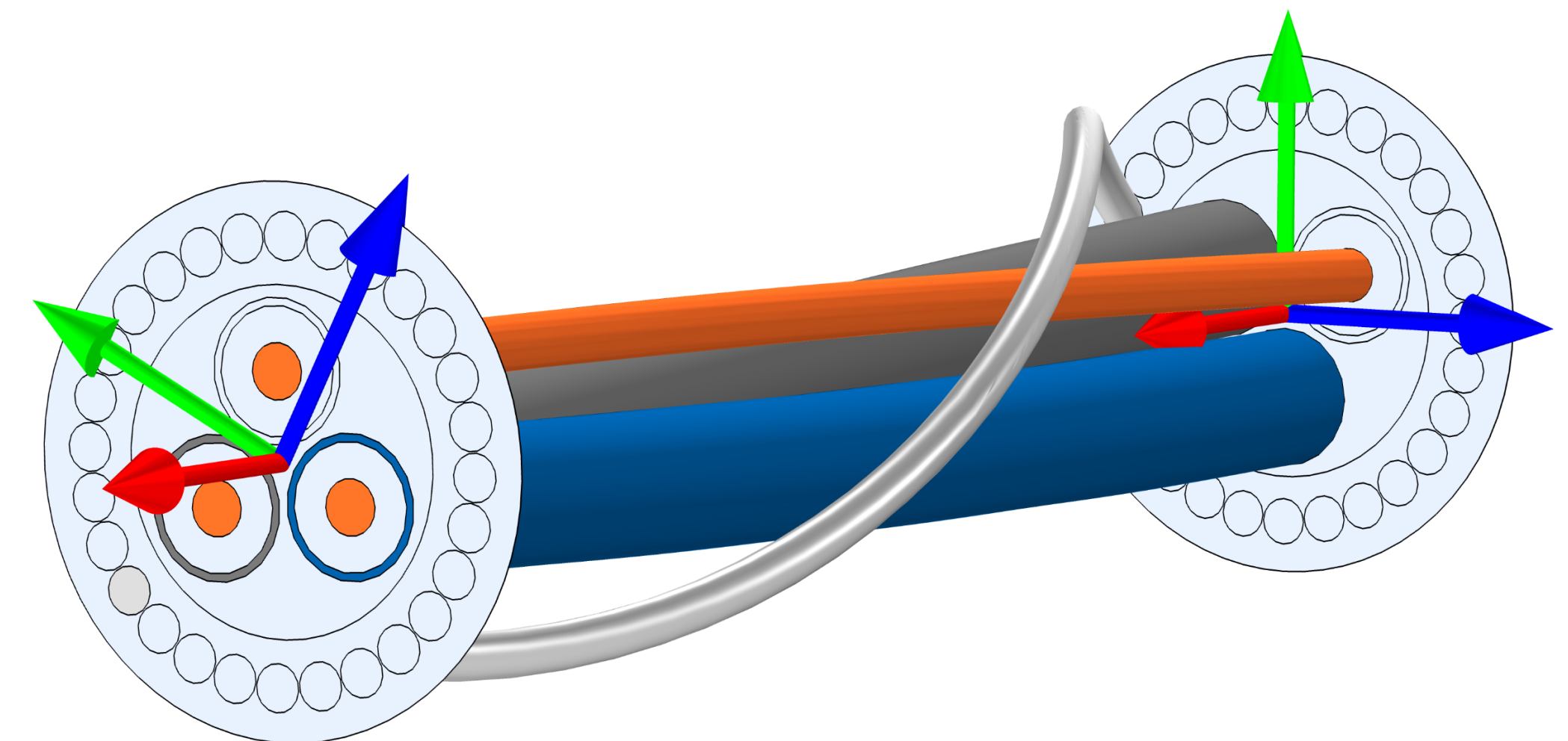


Figura 3. Orientación de los extremos para aplicar periodicidad.

Resultados: Se ha obtenido la resistencia y reactancia serie (R y X) en 5 cables desde 10 kV hasta 245 kV. La menor longitud del modelo reduce el tiempo de cálculo en más de un 90 % respecto a modelos de longitud igual a la periodicidad geométrica [4]. Los resultados presentan errores inferiores al 2 % respecto a datos experimentales [4] (Tabla 1), mejorando los resultados de modelos 2D.

	Origen	R (Ω/km)	ϵ_R (%)	X (Ω/km)	ϵ_X (%)
Cable 2	Medida	0,0455	0,22	0,12	1,66
	COMSOL	0,0454		0,118	
Cable 4	Medida	0,042	0,47	0,114	-0,17
	COMSOL	0,0418		0,1142	
Cable 5	Medida	0,0314	-1,27	0,107	-0,94
	COMSOL	0,0318		0,108	

Tabla 1. Resultados numéricos y experimentales.

Este método facilita el análisis del efecto del trenzado de la armadura sobre R , X (Figura 4) y las pérdidas del cable, algo imposible de realizar mediante modelos 2D.

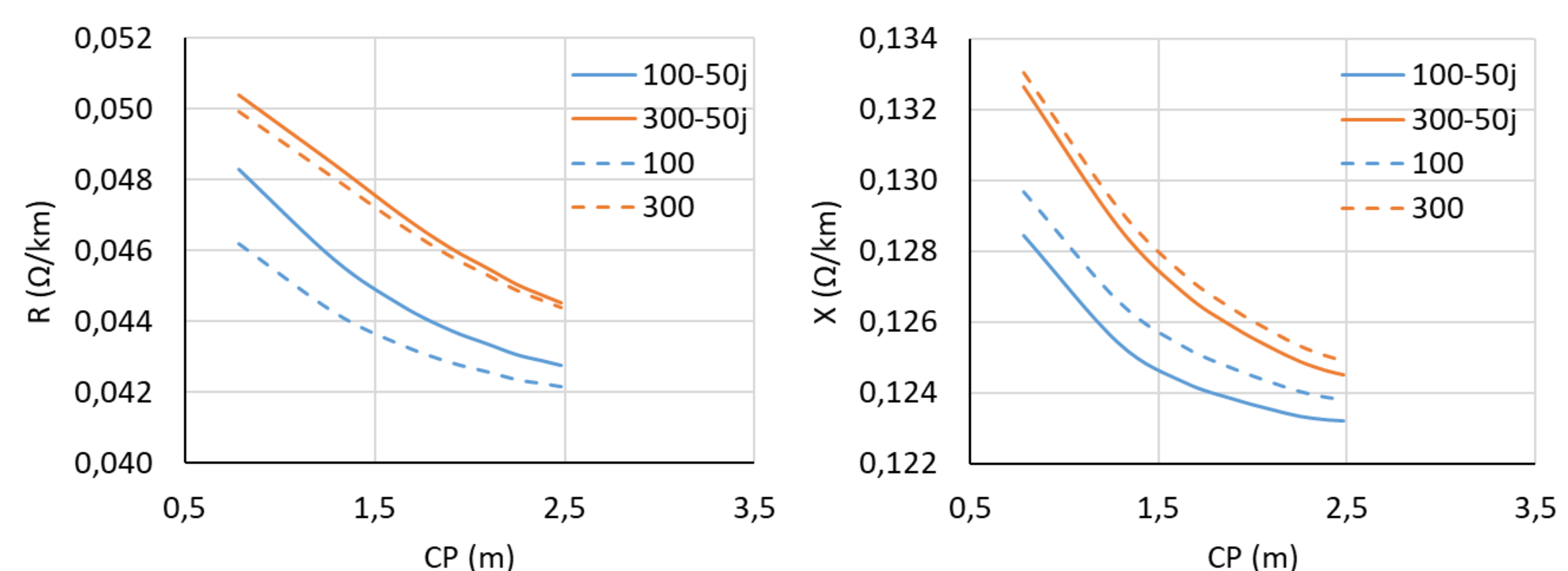


Figura 4. Influencia del trenzado de la armadura en R y X .

Conclusiones: Las prestaciones de COMSOL Multiphysics han permitido plantear una nueva forma de abordar el estudio y caracterización de cables trifásicos armados mediante un procedimiento en 3D de gran precisión y menor coste computacional y de hardware.

Análisis Electromagnético de Cables Submarinos Trifásicos Armados mediante Modelos 3D

J. C. del-Pino-López*¹ y P. Cruz-Romero¹

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla

*Autor de contacto: Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España, vaisat@us.es

Resumen

En los últimos años se ha producido un importante despliegue de parques eólicos a nivel mundial, especialmente en entornos marinos. El alto coste económico de dichas instalaciones hace necesario optimizar el diseño y fiabilidad de cada uno de sus elementos, como los cables de interconexión y exportación de la energía producida [1]. En el caso de cables trifásicos armados, sus parámetros eléctricos y pérdidas electromagnéticas se han caracterizado hasta ahora en base a suposiciones erróneas debidas al uso de geometrías en 2D que omiten el hecho de que las fases y los hilos de la armadura están trenzados entre sí, dando lugar a cables sobredimensionados [2-4]. Esto pone de manifiesto la necesidad de actualizar las expresiones normalizadas empleadas hasta el momento, para lo cual es necesario disponer de nuevas herramientas que faciliten el estudio de cables de esta complejidad para optimizar su diseño y reducir el número de costosas experiencias de laboratorio. En este punto, COMSOL Multiphysics se postula como una potente herramienta de simulación adecuada para esta tarea.

Mediante el módulo AC/DC se han realizado modelos 3D de cables armados trifásicos desde 10 kV hasta 245 kV, obteniéndose sus parámetros eléctricos (impedancia de secuencia directa) y las pérdidas producidas en fases, pantallas y armadura (Figura 1). Para ello se aprovecha la periodicidad geométrica del cable (Figura 2) para aplicar condiciones de contorno de periodicidad, siendo necesaria una longitud para el modelo igual al mínimo común múltiplo del paso de trenzado de fases y armadura. Esta longitud conlleva altos tiempos de computación, siendo necesarios equipos de altas prestaciones computacionales. Sin embargo, gracias a las herramientas que ofrece COMSOL Multiphysics para el análisis y la representación gráfica de resultados, se ha observado un cierto patrón, tanto en el flujo magnético (Figuras 2 y 3) como en las corrientes inducidas, que permite acortar apreciablemente la longitud del modelo 3D (Figura 3) mediante la aplicación de las pertinentes condiciones de contorno [5,6].

Este trabajo ha permitido caracterizar la mínima longitud con la que realizar el modelo electromagnético en 3D de cables armados trifásicos, siendo aquella para la cual un determinado hilo de la armadura se cruza de nuevo con una cierta fase (indicado con flechas rojas en la Figura 2). Así, solo es necesario modelar en 3D una porción como la de la Figura 3, donde la condición de periodicidad debe modificarse adecuadamente para considerar la posición relativa entre las caras origen y destino del modelo (Figura 4). Este nuevo método permite reducir el tiempo de simulación hasta más de un 90 % dependiendo del cable. Además, los parámetros eléctricos obtenidos mediante este modelo acortado solo difieren en menos del 2 % respecto a medidas experimentales.

Gracias a las prestaciones de COMSOL Multiphysics ha sido posible plantear una nueva aproximación para la simulación de cables trifásicos armados en 3D con objeto de caracterizar sus parámetros eléctricos y las pérdidas que en ellos se producen, reduciéndose enormemente los requisitos y tiempos de computación.

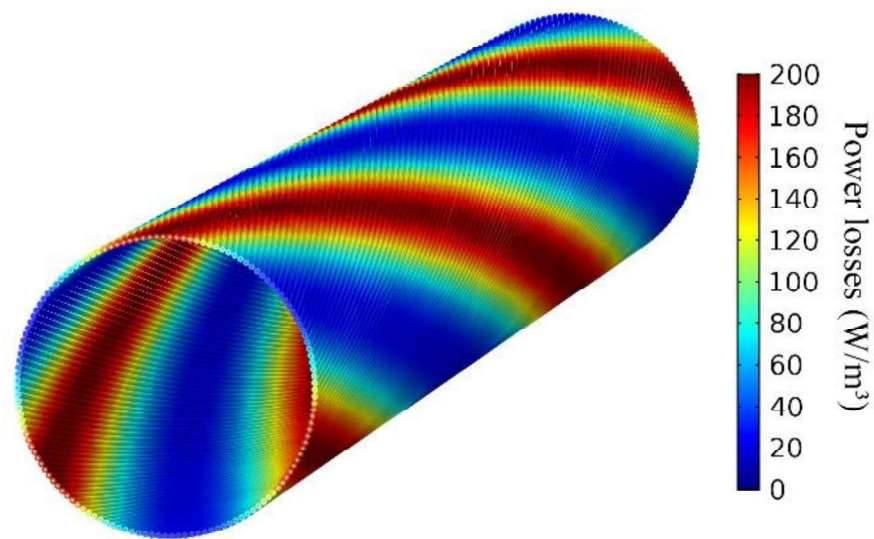


Figura 1: Densidad de pérdidas en armadura.

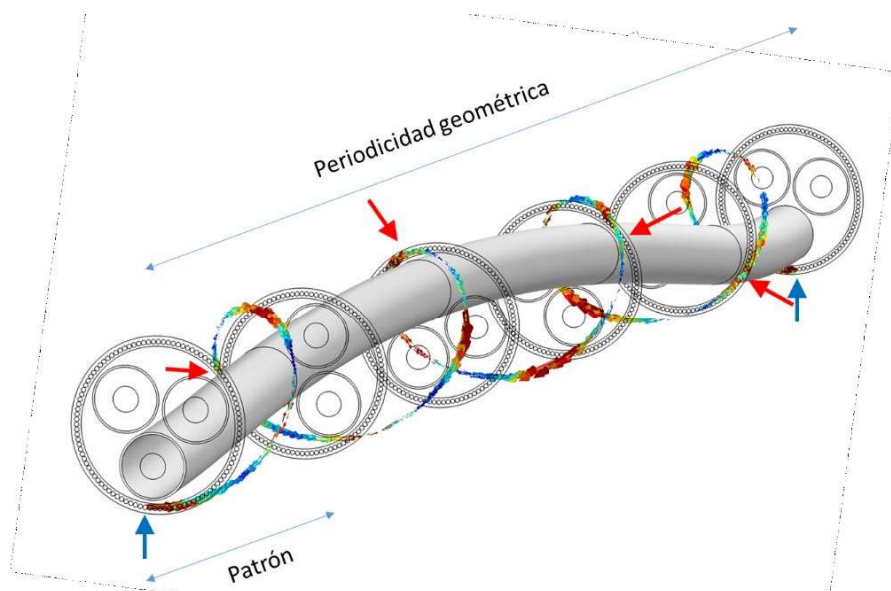


Figura 2: Periodicidad geométrica y patrón.

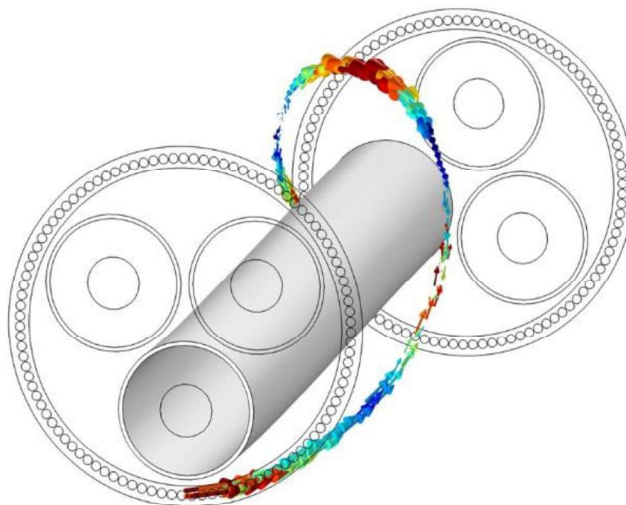


Figura 3: Modelo 3D acortado.

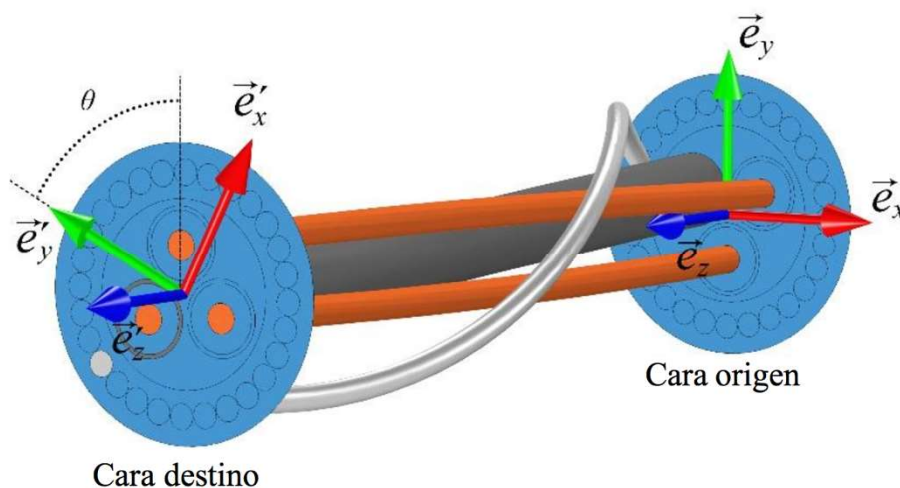


Figura 4: Orientación relativa de caras origen y destino en modelo 3D acortado.

Referencias

1. S. Rodrigues, C. Restrepo, E. Kontos, R. Teixeira Pinto, P. Bauer, Trends of offshore wind projects, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **49**, 1114-1135 (2015).
2. W. Frelin, C. Moreau, D. Willen, C. Thidemann, G. De Robien, N. Boudinet, Measurements of losses on three core power cables, *Proceedings of JiCable* (2015).
3. M. Hatlo, E. Olsen, R. Stølan, Accurate analytical formula for calculation of losses in three-core submarine cables, *Proceedings of JiCable* (2015).
4. F. F. da Silva, T. Ebdrup, C. L. Bak, C. F. Jensen, Understanding losses in three core armored submarine cables, *Proceedings of the CIGRÉ Session* (2014).
5. J. C. del-Pino-López, M. Hatlo, P. Cruz-Romero, A 3D Parametric Analysis of Three-core Armored Power Cables Series Impedance, *Proceedings of International Conference on Smart Energy Systems and Technologies* (2018).
6. J. C. del-Pino-López, M. Hatlo, P. Cruz-Romero, On simplified 3D finite element simulations of three-core armoured power cables, *Energies*, **11**, 3081 (2018).