

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

# Optimización del Bobinado de Generadores Eléctricos Lineales con Materiales Superconductores

A. GONZÁLEZ-PARADA<sup>1</sup>, J.M. LOZANO-GARCÍA<sup>1</sup>, O. RODRÍGUEZ-VILLALÓN<sup>1</sup>,  
I.A. HERNÁNDEZ-ROBLES<sup>1</sup>, A. ZAMORA-CÁRDENAS<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, DICIS, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto., México.  
gonzaleza@ugto.mx

**RESUMEN** Los motores o generadores lineales tradicionalmente se han construido con un bobinado dividido por capas con igual número de vueltas en cada una de ellas, considerando esto se tiene que el nivel de energía por capa y la tensión generada en cada una de ellas va disminuyendo conforme el campo magnético va decreciendo en función de la distancia, esto se considera normal de acuerdo a los criterios del diseño convencional de los embobinados. En este trabajo se describe el criterio para la optimización del embobinado de un generador eléctrico lineal de imanes permanentes construido con cintas superconductoras de alta temperatura (HTS) de BSCCO 2223. La optimización se basa en el criterio de que no se presenten niveles significativos de pérdidas de energía magnética en el devanado conservando su nivel en cada una de las capas y que el nivel de tensión generada en cada capa sea uniforme considerando las características de los materiales superconductores. La configuración se optimizó mediante el uso de elemento finito, tomando en cuenta las características B-I de los materiales superconductores y la incidencia del campo magnético sobre su superficie. Se muestran las consideraciones en el método de optimización y un ejemplo de su aplicación utilizando cintas superconductoras BSCCO 2223.

**PALABRAS CLAVES** Superconductor, generador lineal, anisotropía, sostenibilidad energética, bobina superconductora.

## I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han venido realizando trabajos de investigación relacionado con los diferentes medios para la generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables, en donde el sistema de conversión de energía eléctrica a partir del movimiento de las olas es un candidato que aprovecha una fuente alternativa de energía. Recientemente, se han estado analizando y explorando el uso de material superconductor en máquinas eléctricas rotativas especiales, como los generadores por medio de energía eólica, motores y generadores eléctricos, diseñados y construidos con varios materiales superconductores de baja y alta temperatura en el bobinado del estator [1]-[3]. Sin embargo, estos diseños se han venido desarrollando considerando los diseños tradicionales de construcción del embobinado, que consiste en tener un igual número de vueltas por cada una de las capas que tenga el embobinado, en donde no se ha encontrado una determinación clara o explícita de una optimización del bobinado, que permita que sus niveles de energía y tensión generada por capa se mantengan uniformes entre ellas [4]-[5].

Un criterio para la optimización del embobinado superconductor en un generador eléctrico lineal de imanes permanentes, el cual está conformado por cintas superconductoras de BSCCO 2223 dispuesto de forma que las líneas incidentes del campo magnético creado por los imanes permanentes que se encuentran en el centro del generador sea de manera óptima considerando el campo magnético incidente sobre la superficie de las cintas; para esta optimización se requiere que los niveles de tensión y energía en cada una de las capas superconductoras se mantengan uniformes en cada una de ellas y sus niveles de generación sean aún mayores a los diseños convencionales comparado con los embobinados convencionales de generadores lineales. Al tener el bobinado del generador eléctrico lineal dividido por capas con igual número de vueltas en cada una de ellas, se logra observar cómo el nivel de energía generado y la tensión en cada una de las capas va disminuyendo conforme el campo magnético se va disminuyendo en función de la distancia, por eso se propone una nueva configuración óptima para dos diferentes tipos de devanados [6]-[8].

Los materiales superconductores han demostrado tener una anisotropía en la corriente crítica en función de la característica de incidencia del campo magnético externo sobre la cinta, como se puede observar en la Fig. 1, estas características van a variar dependiendo de cómo la dirección de las líneas del flujo magnético inciden sobre la cinta superconductora, haciendo que el ángulo en la incidencia del flujo magnético afecte el comportamiento de la corriente crítica provocando que esta corriente se vea disminuida a medida que se incrementa el campo magnético, por lo que es necesario considerar esta característica anisotrópica B-I de las cintas en la etapa de diseño [9]-[10].

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El diseño de una bobina del tipo solenoide, se puede determinar considerando las dimensiones del calibre del conductor, el área en donde se encuentra el embobinado y considerando el número vueltas ( $N_s$ ) que puede generar la tensión deseada  $V_{gen}$  [V]. Considerando lo anterior, el número de vueltas por unidad de longitud puede ser calculado de acuerdo a la Ecuación (1) [11].

$$N_s = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{gen}}{B_m \cdot \pi R_s^2 \cdot v_m} \quad (1)$$

Donde  $R_s$  es el radio promedio del embobinado del estator en [m],  $v_m$  la velocidad promedio en [m/s] y  $B_m$  representa las líneas de campo magnético [T], en cada una de las capas.

Al tener un bobinado con una sección transversal convencional y una distribución uniforme del número de vueltas por cada una de sus capas, la tensión generada estará dada por:

$$V_{gen} = \frac{N_s \cdot B_m \cdot \pi R_s^2 \cdot v_m}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

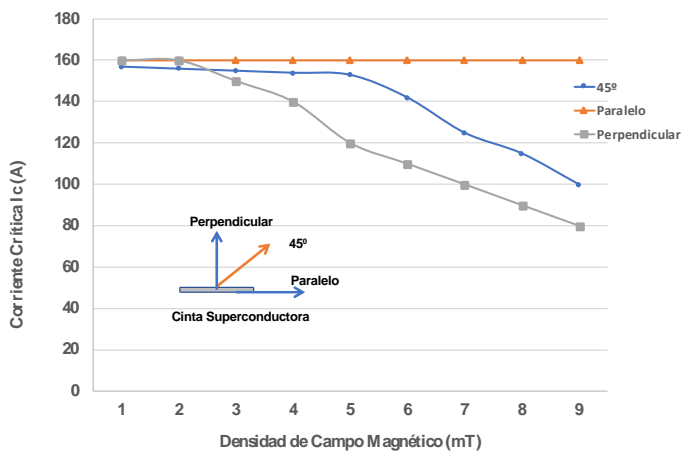


Fig. 1. Comportamiento de la corriente crítica en función del ángulo de incidencia del campo magnético sobre la superficie de la cinta de BSCCO 2223.

De la Ecuación (2) se observa que la tensión generada por capa depende del campo magnético presente, en donde las capas más lejanas tienen una menor densidad de campo magnético y serán éstas las que generan menor nivel de tensión por capa.

Por otro lado, la energía magnética almacenada  $W_{sm}$  [Joules] en cada una de las capas del bobinado será el promedio de la inductancia en específico para esa capa  $L$  [H] y la corriente circulante  $i$  [A], conforme a la siguiente ecuación:

$$W_{sm} = Li^2/2 \quad (3)$$

Considerando lo anterior y con el objetivo de tener un embobinado más eficiente considerando la anisotropía de los materiales superconductores, se busca que la incidencia del campo magnético se mantenga como mínimo en un ángulo de 45°, con el fin de que este no sobrepase el campo magnético crítico y se reduzca el valor de la corriente crítica  $I_c$  en función de la incidencia del campo (ver Fig. 1), otro punto a considerar es que la tensión generada por cada capa del embobinado sea constante y a su vez que el nivel de energía magnética en cada una de las capas se mantenga al mismo nivel, por lo que en el proceso de optimización se consideran estos criterios.

## III. SIMULACIÓN EN ELEMENTO FINITO

Para la simulación por elemento finito se consideró una geometría convencional de 180 vueltas y una geometría optimizada con la misma cantidad de vueltas en donde se consideraron los criterios de optimización como son la tensión generada uniforme en cada una de las capas y la energía magnética uniforme.

Considerando las Ecuaciones (2) y (3) para determinar los parámetros de optimización, en donde para el cálculo de la tensión generada se consideró una velocidad de 1.5 m/s, partiendo de una tensión inicial de acuerdo con el número de vueltas de la primera capa (11 vueltas) y el campo magnético en esa capa. Para el cálculo de las capas restantes se mantuvo constante el nivel de tensión obtenido en la primera capa y de acuerdo con el nivel de  $B_m$ , en función de la distancia a cada capa se realizó el cálculo variando el número de vueltas de esa capa hasta obtener el nivel de tensión calculado para la primera capa, los resultados obtenidos se muestran en Tabla I.

TABLA I. CALCULO DE LA TENSION GENERADA Y LA ENERGÍA MAGNÉTICA POR CAPA DE ACUERDO AL NÚMERO DE VUELTAS.

No. de capa	Características Generales del Modelo Optimizado		
	Número de Vueltas	Energía Magnética por capa (Joules)	Tensión Generada por capa (volts)
1	11	0.0863	0.00192730
2	12	0.0751	0.00193590
3	13	0.0666	0.00197689
4	13	0.0595	0.00189094
5	14	0.0534	0.00193457
6	14	0.0482	0.00184201
7	15	0.0438	0.00188432
8	16	0.0400	0.00191474
9	17	0.0368	0.00193325
10	18	0.0342	0.00195176
11	18	0.0324	0.00185656
12	19	0.0328	0.00192201

### A. DIMENSIONES GENERALES

Las dimensiones consideradas para la simulación, de acuerdo con los resultados obtenidos, se muestran en la Tabla II. En la Fig. 2 se muestran las geometrías de acuerdo con el diseño convencional y el optimizado.

De acuerdo con la Fig. 2 se tiene el embobinado optimizado variando el número de vueltas en cada una de las capas de acuerdo con los criterios considerados de mantener el nivel de energía en función del campo y la tensión generada en cada una de las capas.

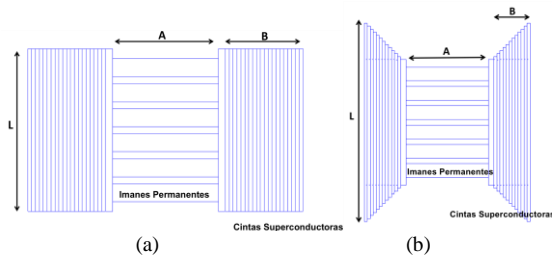
### B. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados de la distribución del campo magnético para cada una de las geometrías se muestran en Fig. 3, de donde se obtuvieron los parámetros de energía magnética.

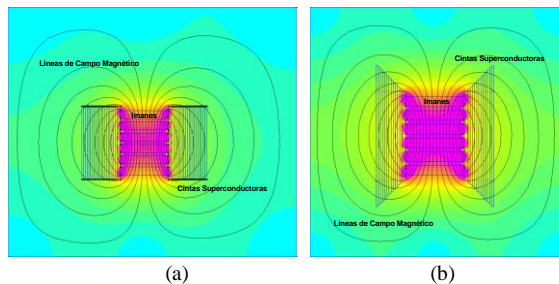
De acuerdo con la Fig. 3 la distribución del campo magnético es similar en ambos modelos, lo único que varía es la distribución del devanado tomando en cuenta la incidencia del campo magnético incidente sobre la superficie de las cintas de tal manera que este sea lo más cercano a los 45° sobre la superficie de la cinta.

**TABLA II. DIMENSIONES GENERALES DE LOS MODELOS .**

Modelo	Dimensiones Generales					
	No. de vueltas totales	No. de capas	No. de imanes	A (mm)	B (mm)	L (mm)
Convencional	180	20	6	30.0	22	45.5
Optimizado	180	12	6	30.0	13	72.0



**Fig. 2. Esquema general de los embobinados del generador lineal simulados. (a) Bobinado convencional con igual número de vueltas por capa. (b) Bobinado optimizado con diferente número de vueltas por capa.**



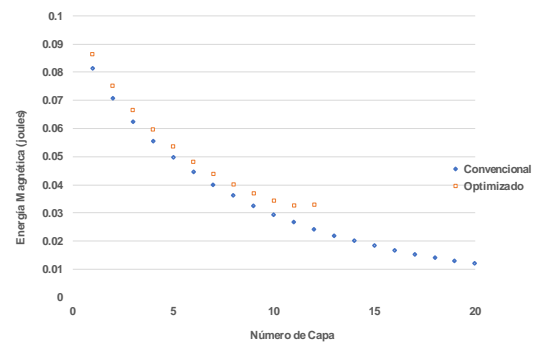
**Fig. 3. Distribución del campo magnético en el generador lineal con cintas superconductoras. (a) Diseño convencional del embobinado. (b) Diseño optimizado del embobinado.**

Los resultados de los modelos se muestran en la Fig. 4 y Fig. 5 en donde se dan los resultados de la tensión generada en cada capa y la energía magnética en las mismas.

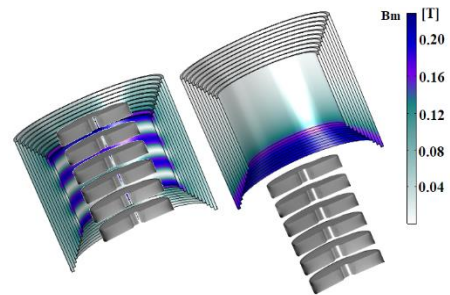
La Fig. 4 muestra un comportamiento similar de la energía magnética en cada uno de ambos modelos, teniendo un mejor comportamiento el diseño optimizado en donde la energía se mantiene en las últimas capas del modelo. El decaimiento de la energía depende directamente del campo magnético incidente sobre el embobinado del generador.

### IV. RESULTADOS

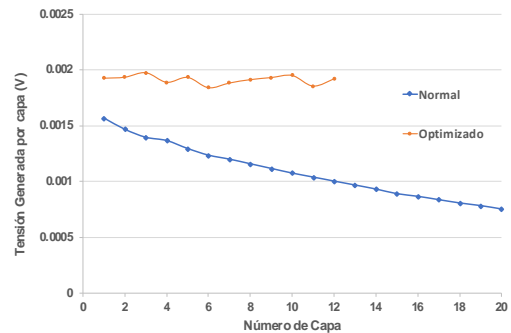
En la Fig. 6 se muestran los resultados de la tensión magnética generada en cada una de las capas de acuerdo con el campo magnético incidente sobre la superficie de las cintas en el devanado.



**Fig. 4. Comportamiento de la energía magnética por capa en el diseño convencional y el diseño optimizado.**



**Fig. 5. Simulación del movimiento los imanes en el generador lineal considerando el bobinado optimizado.**



**Fig. 6. Tensión generada en cada una de las capas del devanado en el modelo convencional y el modelo optimizado.**

De la Fig.6, se observa que la tensión en el modelo optimizado se mantiene casi constante, presentando variaciones debido a los ajustes al diseño con el objetivo de acercarlo a una construcción real de los modelos considerando las limitaciones físicas propias de la construcción de los prototipos.

Con el fin de validar el modelo se construyó un prototipo de 180 vueltas en ambas configuraciones (normal y optimizado), los cuales se construyeron de acuerdo a las dimensiones generales de la Tabla II y considerando el número de vueltas por capa para el devanado optimizado.

En la Fig. 7 se muestra el prototipo construido para las pruebas, sin que se muestre el acoplamiento mecánico para simular el movimiento de las olas en el mar.

Los resultados obtenidos muestran un incremento en la tensión de generación con respecto a la generación del bobinado normal, de aproximadamente un 25% respecto a la generación inicial, considerando un menor número de capas, lo que reduce las dimensiones del bobinado.

En la Fig. 8 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del bobinado normal y el bobinado optimizado, apreciándose un incremento en el valor pico-pico de la tensión generada.



Fig. 7. Prototipo del generador lineal construido para la evaluación del modelado en elemento finito.

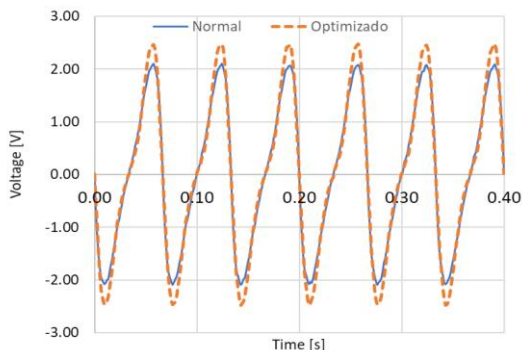


Fig. 8. Tensión generada por el generador lineal en donde se hace el comparativo entre ambas configuraciones, la convencional y la optimizada.

## V. CONCLUSIONES

Del diseño realizado del devanado en un generador lineal normal se obtuvo una optimización de sus dimensiones, lo que se ve reflejado en la reducción de las dimensiones del criostato para contener el nitrógeno líquido y un incremento de la tensión generada de un 25%, con una tensión uniforme entre capas, lo que hace que a la energía magnética en cada una de las capas sea superior, esto se ve reflejado en un comportamiento más uniforme del generador con menos pérdidas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Guanajuato por el apoyo otorgado para la realización del proyecto por medio del fondo de la *Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2018*.

## REFERENCIAS

- [1] N. P. Gargov and A. F. Zobaa, "Multi-phase air-cored tubular permanent magnet linear generator for wave energy converters," *IET Renewable Power Generation*, vol. 6, no. 3, pp. 171-176, May 2012.
- [2] J. Zhang, H. Yu, Q. Chen, M. Hu, L. Huang and Q. Liu, "Design and experimental analysis of ac linear generator with Halbach PM arrays for direct-drive wave energy conversion," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 3, pp. 1-4, June 2014.
- [3] Y. Hong, M. Eriksson, V. Castellucci, C. Boström and R. Waters, "Linear generator-based wave energy converter model with experimental verification and three loading strategies," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 3, pp. 349-359, 2016.
- [4] D. Wang, C. Shao, X. Wang and C. Zhang, "Performance characteristics and preliminary analysis of low-cost tubular linear switch reluctance generator for direct drive WEC," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 7, pp. 1-5, 2016.
- [5] P. C. Binh, N. M. Tri, D. T. Dung, K. K. Ahn, S. J. Kim and W. Koo, "Analysis, design and experiment investigation of a novel wave energy converter," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 460-469, 2016.
- [6] Y. Hong, M. Eriksson, V. Castellucci, C. Boström and R. Waters, "Linear generator-based wave energy converter model with experimental verification and three loading strategies," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 3, pp. 349-359, 3 2016.
- [7] A. Wahyudie, M. Jama, T. B. Susilo, B. F. Mon, H. Shaaref and H. Noura, "Design and testing of a laboratory scale test rig for wave energy converters using a double-sided permanent magnet linear generator," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 7, pp. 922-930, 2017.
- [8] M. Razali Hanipah, R. Mikalsen, and A.P. Roskilly, "Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications," *Elsevier Applied Thermal Engineering*, vol. 75, pp. 493-503, 2015.
- [9] K. Moriya, S. Goto, T. Akita, H. Kosaka, "Development of free piston engine linear generator system Part3 -novel control method of linear generator for improve efficiency and stability," *SAE Technical paper*, pp. 1-6, 2016.
- [10] Y. Tian, H. Zhang, G. Li, X. Hou, F. Yu, F. Yang, Y. Yang, Y. Liu, "Experimental study on free piston linear generator (FPLG) used for waste heat recovery of vehicle engine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 184-193, 2017.