

“Thermo-electromagnetic lumped parameter model of a superconducting synchronous generator for wind power generation”



M.I. Alejandro Baez Muñoz



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM[®]**

Contenido

1. Motivación.
2. Tendencias tecnológicas de la energía eólica.
3. Básicos de la superconductividad.
4. Materiales superconductores.
5. El generador superconductor.
6. Modelado del devanado superconductor
7. Modelado del generador superconductor
8. Conclusiones

Motivación

La Tendencia de la producción de electricidad en el futuro

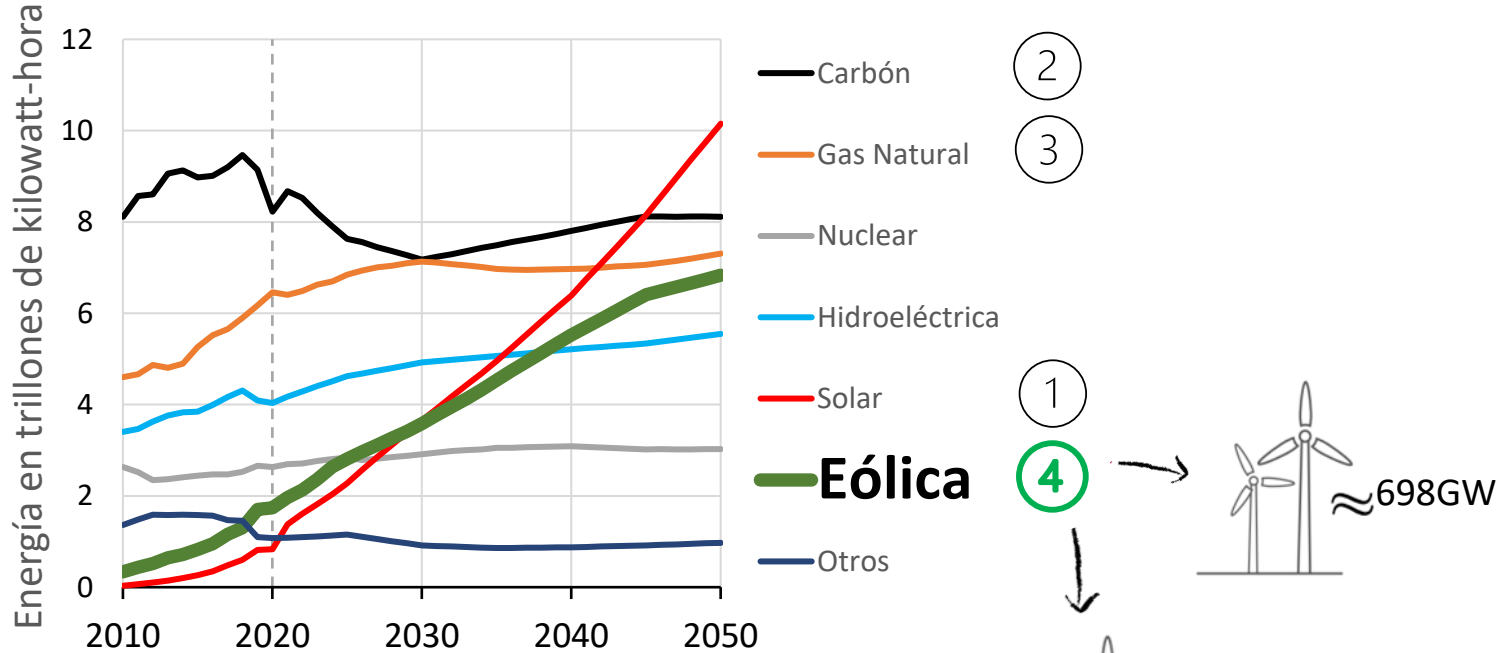


Fig 1. Proyección de la generación de electricidad neta global por fuente^{1,2}.

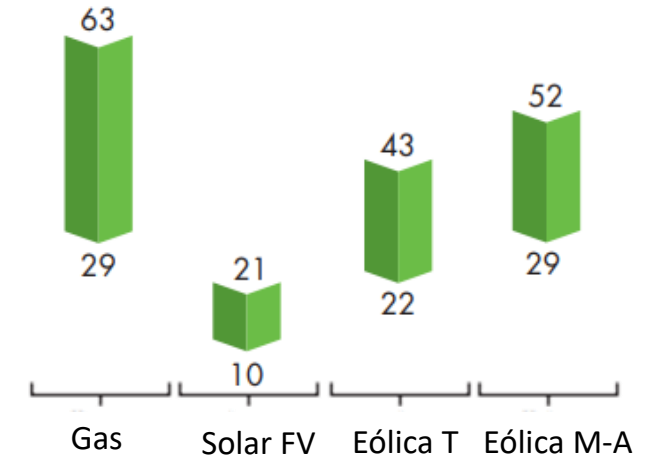


Fig 2. Factor de planta promedio anual por tecnología (2018)³.

$$fp = \frac{E_{gen}}{t_x} / \frac{E_{nom}}{t_x}$$

[1] U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2021 (IEO2021).
 [2] <https://www.irena.org/wind>
 [3] <https://gwec.net/>

Tendencia de la energía eólica

¿Cómo podemos generar más electricidad mediante el viento y satisfacer la demanda futura?

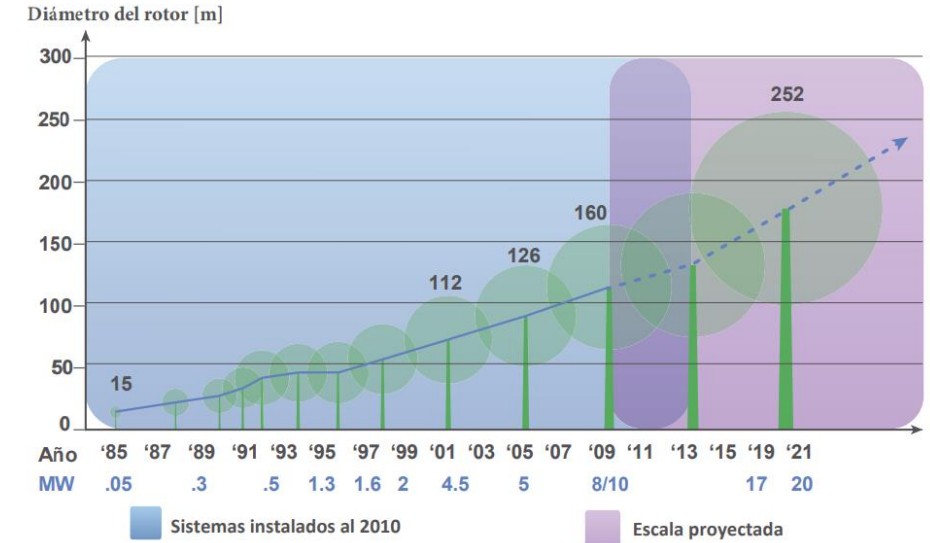
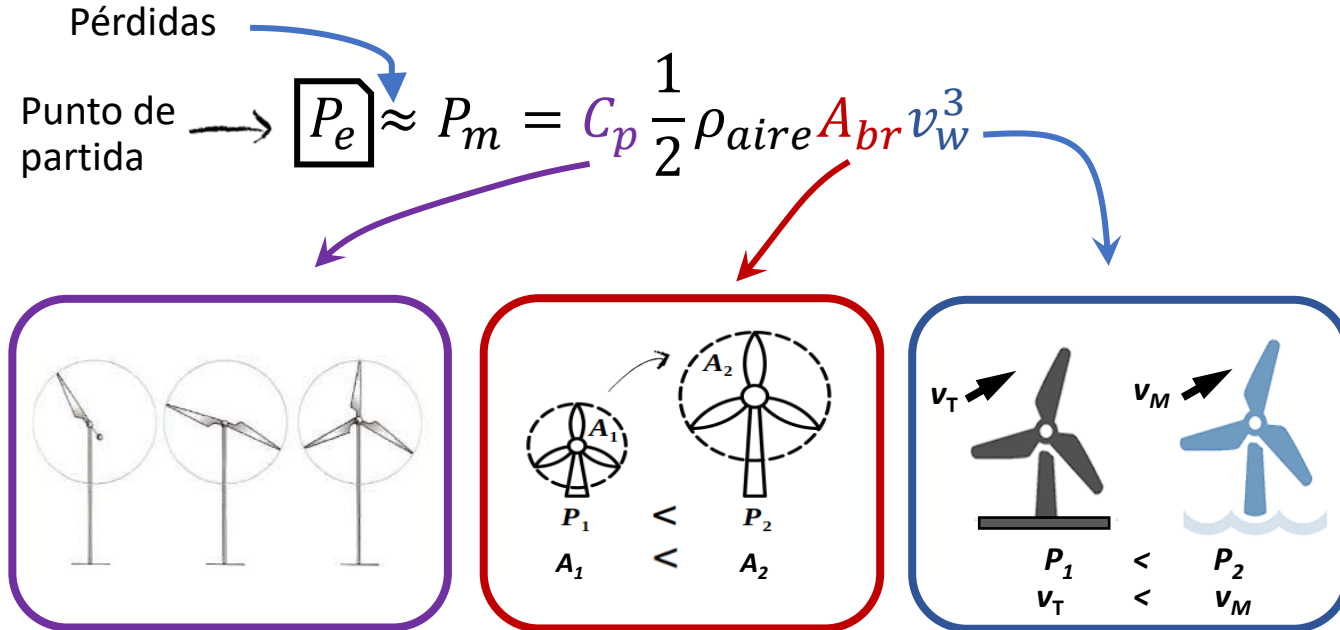


Fig 3. Evolución del diámetro del rotor eólico a través de los años⁴.

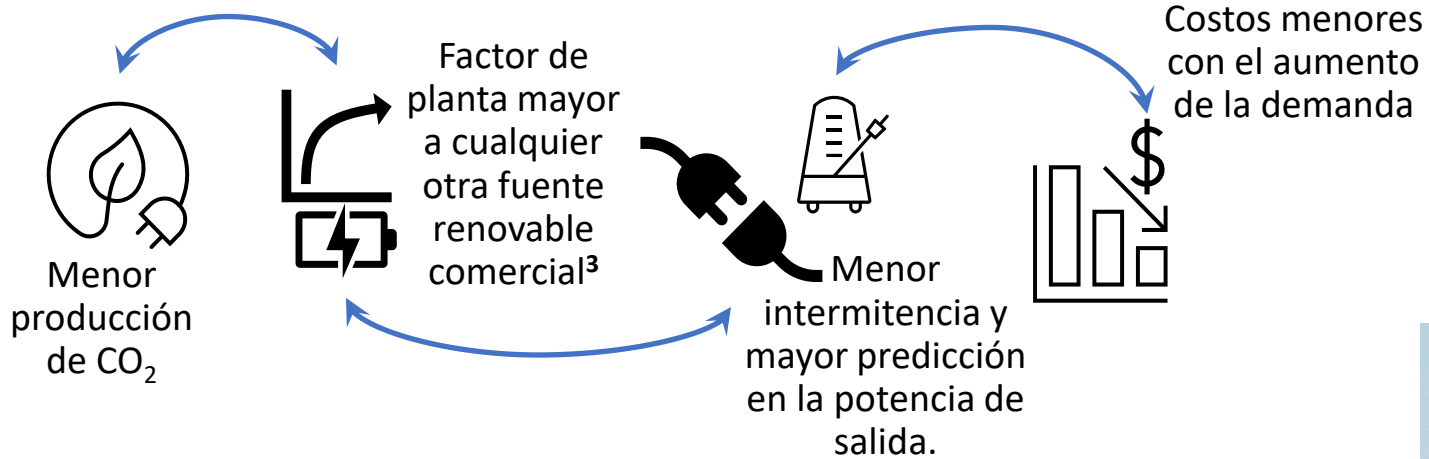
Turbinas más grandes + Turbinas mar-adentro

Tendencia: Turbinas más grandes mar-adentro

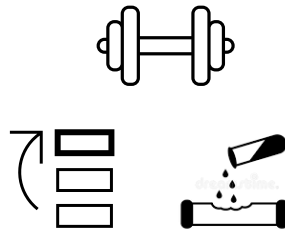
[4] Báez Muñoz, Alejandro, "Modelado y simulación de un generador síncrono con devanado de campo superconductor", (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2018.

Potencial eólico mar-adentro

Beneficios del sector eólico mar-adentro



¿Cuál es el reto técnico?



V236-15.0 MW™

ROTOR

Rotor diameter 236 m
Swept area 43,742 m²

GEARBOX

Type medium speed



HALIADÉ-X 14 MW

GE Renewable Energy is developing **Haliade-X 14 MW**, the most powerful offshore wind turbine in operation in the world, with **220-meter rotor**, **107-meter blade**, leading capacity factor (**61%**), and **digital capabilities**, that will help our customers find success in an increasingly competitive environment.

14 MW capacity

220-meter rotor

107-meter long blades

260 meters high

74 GWh gross AEP

61% capacity factor

38,000 m² swept area

Wind Class IEC: IC



[5] <https://www.vestas.com/en/products/offshore>

[6] <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>

Potencia del generador

La Potencia de salida en el generador es una función de :

$$P_e = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} k_w A_s B_g D_{si}^2 l_s n_{rps} \rightarrow \text{Velocidad de rotación}$$

$\frac{\pi^2}{\sqrt{2}} k_w$ → Configuración y conexión de los devanados del estator
 $A_s B_g$ → Volumen
 $D_{si}^2 l_s$ → Campo generado por el inductor
 n_{rps} → Densidad de corriente lineal del estator.

¿Para que sirve la caja de engranes en las turbinas eólicas?

$$n_{rps} \propto \frac{P_e}{A_s B_g V_{ol}}$$

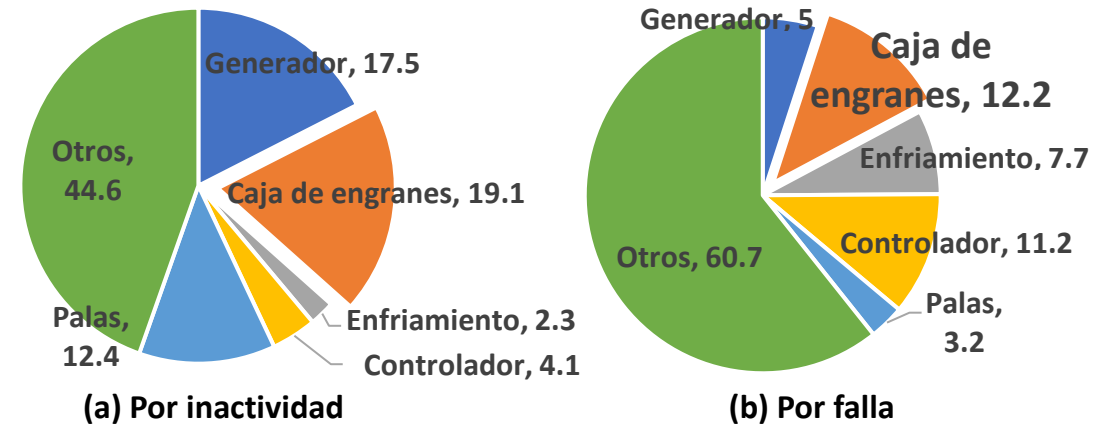
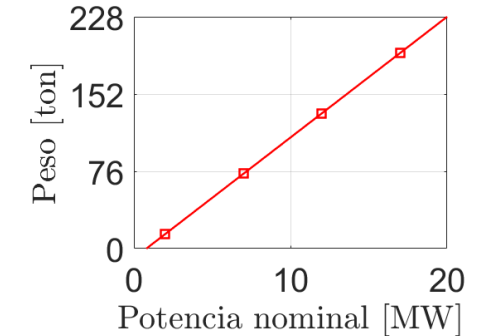


Fig 5. Motivo de paro de turbinas eólicas con caja de engranes⁷.

[7] M D Reder, "Wind Turbine Failures Tackling current Problems in Failure Data Analysis", J. Phys.: Conf. Ser. 753 072027, 2016.

Potencia del generador

¿Qué pasa si prescindimos de la caja de engranes en las turbinas eólicas ?

Potencia de salida en el generador

$$P_e = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} k_w A_s B_g D_{si}^2 l_s n_{rps} \longrightarrow \text{Velocidad de rotación}$$

$\frac{\pi^2}{\sqrt{2}}$ → Configuración y conexión de los devanados del estator
 k_w → Configuración y conexión de los devanados del estator
 A_s → Configuración y conexión de los devanados del estator
 B_g → Campo generado por el inductor
 $D_{si}^2 l_s$ → Volumen
 n_{rps} → Velocidad de rotación
 P_e → Densidad de corriente lineal del estator.



Acoplamiento directo entre la turbina y el generador

$$B_g \propto \frac{P_e}{A_s n_{rps} V_{ol}}$$

↑↓ B_g ∝ $\frac{P_e \uparrow \downarrow}{A_s n_{rps} V_{ol} \downarrow \uparrow}$

Opciones tecnológicas mar-adentro

$$B_g \propto \frac{P_e}{A_s n_{rps} V_{ol}}$$

$$|\vec{J}_{sc}| \gg |\vec{J}_{cu}|$$

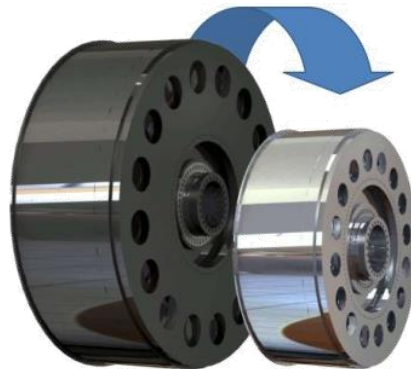
$$P_{CD} = 0$$

$$P_{CA} \approx 0$$



(a)

Menor consumo de tierras raras

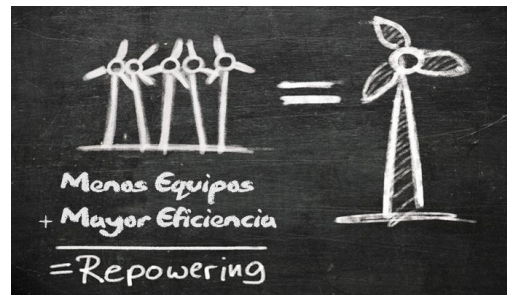
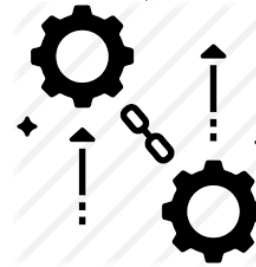


(b)

Fig 6. (a) Cinta superconductora vs. cable de Cu para una potencia equivalente transmitida¹⁵. (b) Comparación del tamaño de un generador de imanes permanentes y un generador superconductor^{9,10}

Menor dependencia

Mayor dependencia



Mayor consumo de tierras raras

$$n_{rps} \propto \frac{P_e}{A_s B_g V_{ol}}$$

$$i_{fd} = 0$$

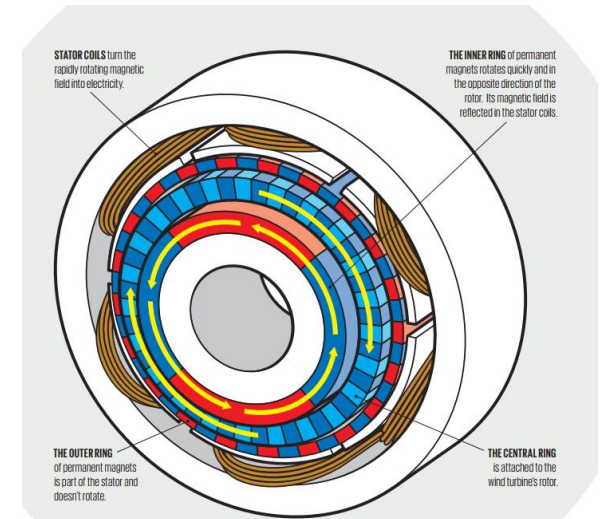


Fig 7. Diagrama esquemático del generador con pseudo-eje directo magnético⁸

[9] <https://www.amsc.com/gridtec/amerium-hts-wire/>

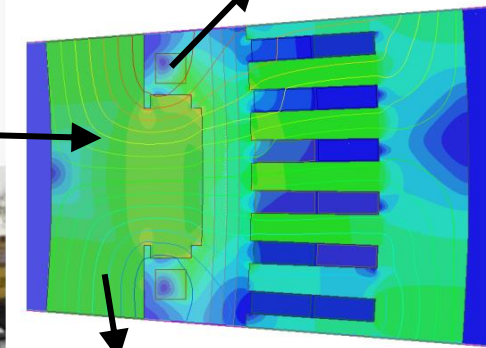
[10] <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon2020/projects/h2020-energy/wind/ecoswing>

Primera turbina eólica HTS (3.1MW)

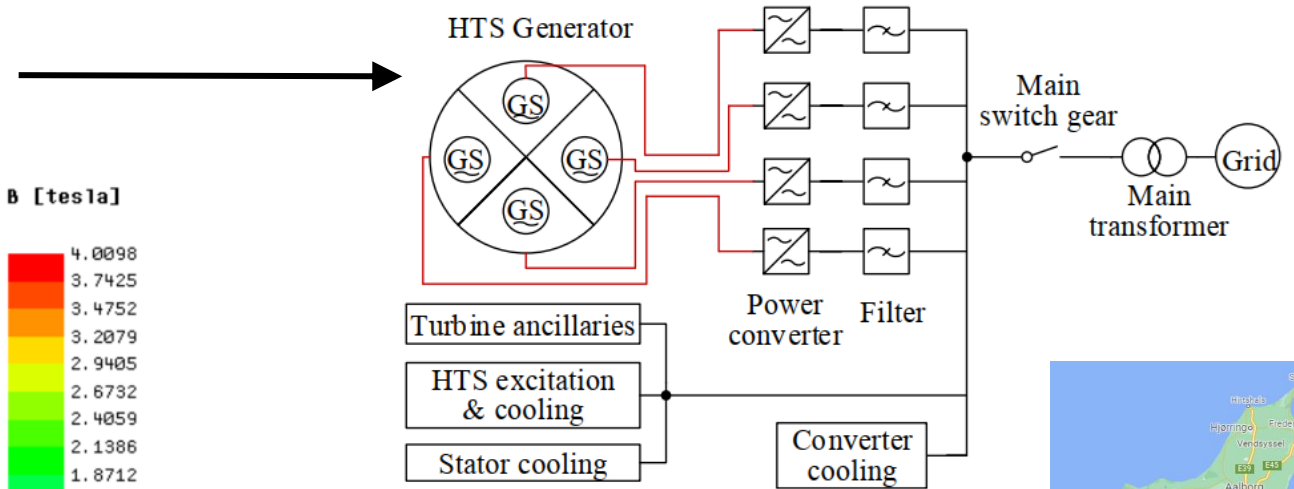
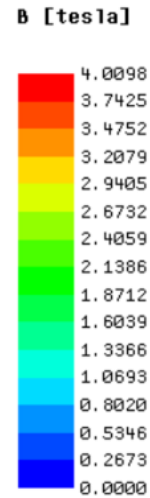
Maduración tecnológica del generador HTS



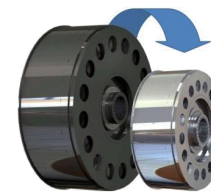
Estator convencional con una diferencia



Material ferromagnético



Conexión por 650 hr a la red eléctrica



24% → 40%



[11] X. Song et al., "Designing and Basic Experimental Validation of the World's First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, no. 4, pp. 2218-2225, Dec. 2019.

¿Qué es un superconductor?

Conductor perfecto en CD

$$\rho_{sc} = 0$$

$$\vec{E} = -\nabla V = \rho_{sc} \vec{J} = 0$$

$$T_{sc} < T_c$$

Diamagnético perfecto en CD

$$\chi_m = -1$$

$$\vec{B}_{sc} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi_m) = 0$$

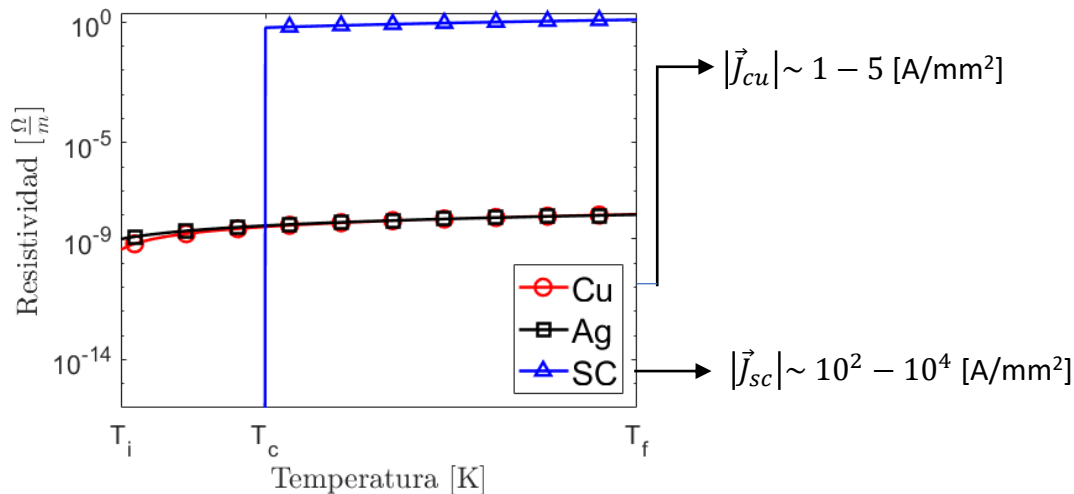


Fig 8. Resistividad de Cu, Ag y SC vs. Temperatura.

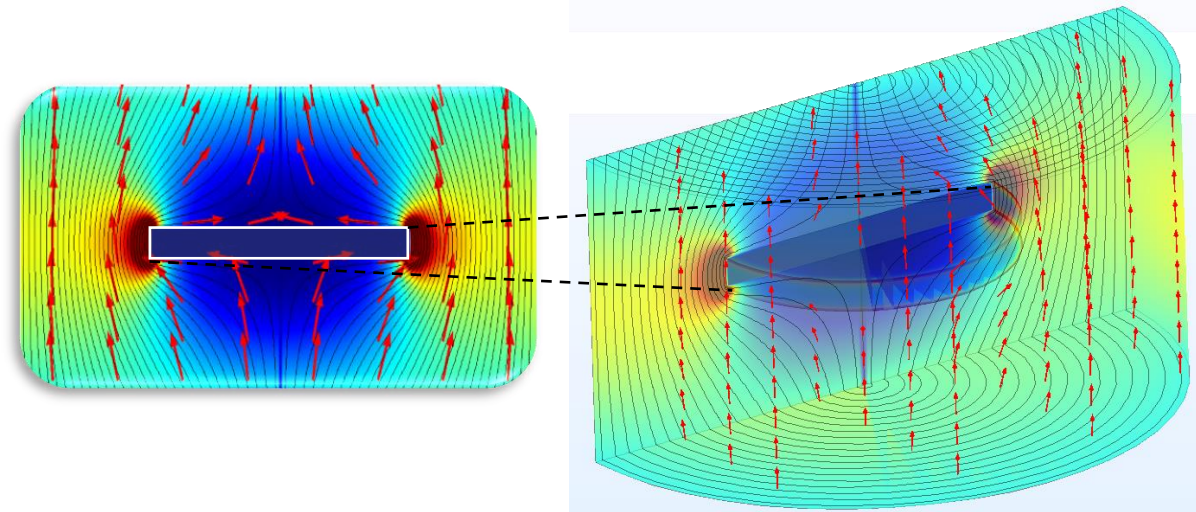


Fig 9. Efecto Meissner en una pastilla superconductora.

Parámetros críticos

La superconductividad es un fenómeno altamente no lineal.

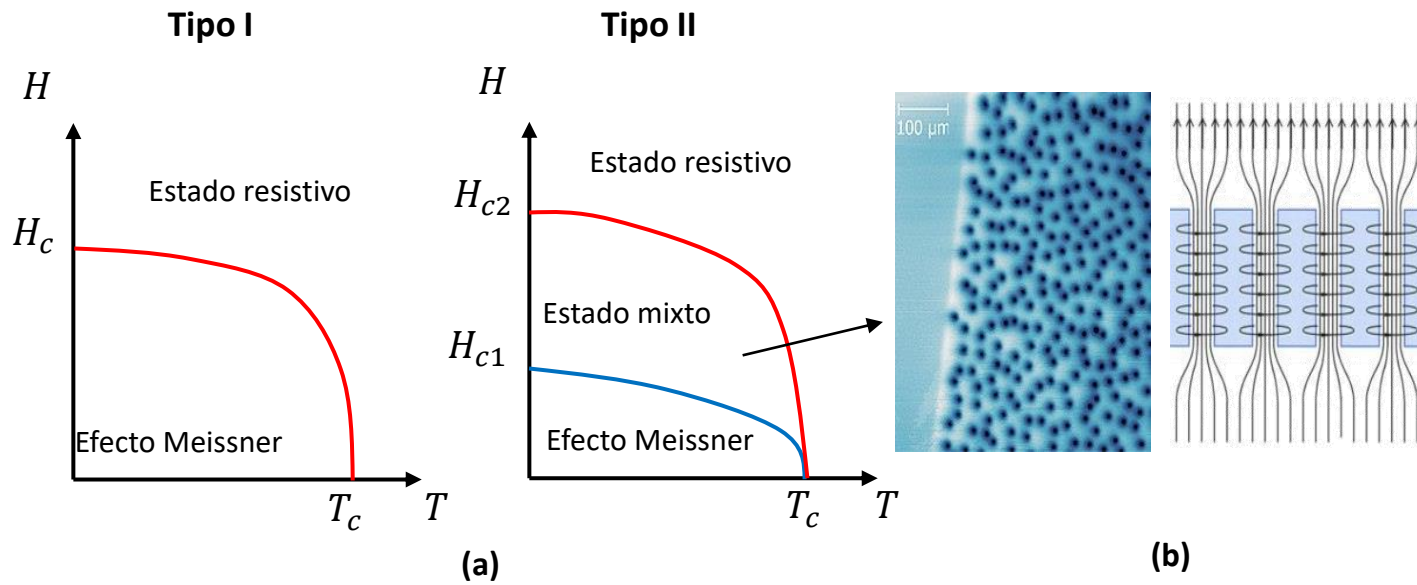


Fig 11. (a) Respuesta de los superconductores tipo I y II ante un campo magnético. (b) Vórtices de Abrikosov¹².

$$\rho_{sc} = f(T_c, H_c, I_{sc})$$

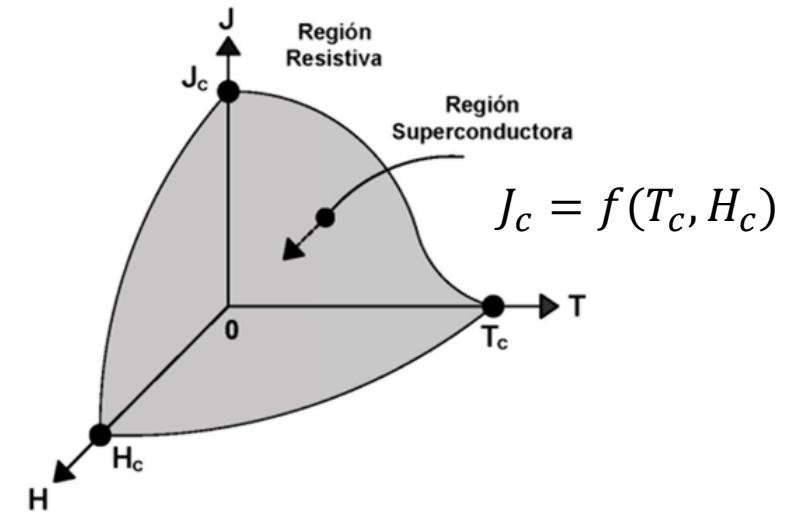


Fig 10. Superficie crítica de un superconductor.

[12] F.S. Wells, A. V. Pan, X. R. Wang, S. A. Fedoseev, and H. Hilgenkamp, "Analysis of low-field isotropic vortex glass containing vortex groups in YBa2Cu3O7-x thin films visualized by scanning SQUID microscopy," Sci. Rep., vol. 5, no. 1, 2015.

Materiales superconductores comerciales

Superconductores de baja temperatura crítica (LTS).

$T_c < 30\text{ K}$ NbTi (Niobio-Titanio); Nb₃Sn (Niobio-Estaño)

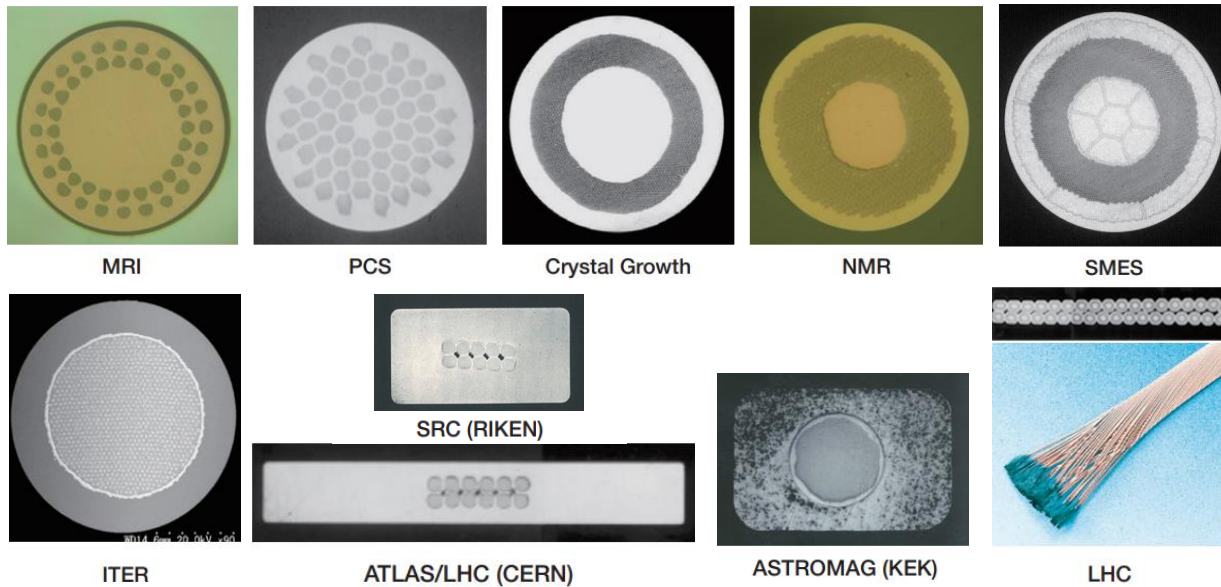
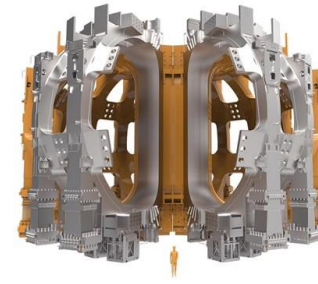
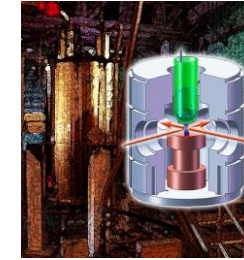


Fig 15. Diferentes cables LTS, <https://www.furukawa.co.jp/>.



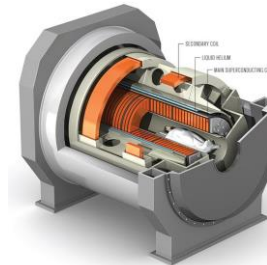
Reactor experimental termonuclear internacional (ITER). <https://www.iter.org/mac/h/Tokamak>



Resonancia magnética nuclear (NMR). <https://newscenter.lbl.gov/2011/05/17/nmr-no-magnets/>



Almacenamiento de energía magnética con superconductores (SMES)¹³.



Imágenes por resonancia magnética (MRI). <https://spectrum.ieee.org/the-worlds-most-powerful-mri-takes-shape>



Colisionador de hadrones (LHC). <https://home.cern/resources/brochure/knowledge-sharing/lhc-facts-and-figures>

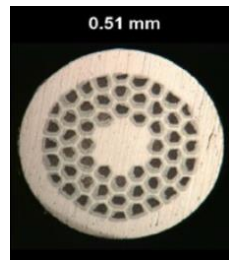


ASTROMAG. <https://aether.lbl.gov/www/projects/astromag/>

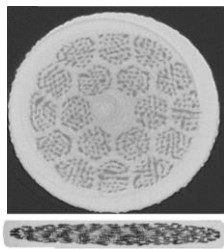
[13] S. Nomura, T. Shintomi, S. Akita, T. Nitta, R. Shimada and S. Meguro, "Technical and Cost Evaluation on SMES for Electric Power Compensation," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 1373-1378, June 2010

Materiales superconductores comerciales

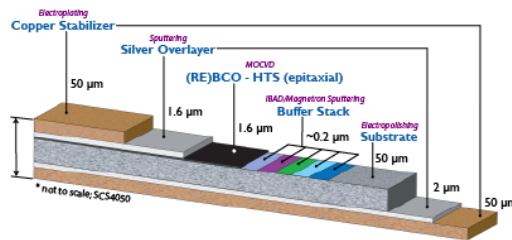
Superconductores de alta temperatura crítica (HTS) $T_c > 30$ K.



(a) Diboruro de magnesio. (MgB_2 , $T_c = 39$ K)¹⁴.



(b) Bismuto-estroncio-calcio-óxido de cobre (BSCCO, $T_c = 108$ K)¹⁵



(c) (Itorio o Gadolinio)-Bario óxido de cobre ((Re)BCO, $T_c = 92$ K)¹⁶.

Fig 16. Diferentes cables y cintas HTS.

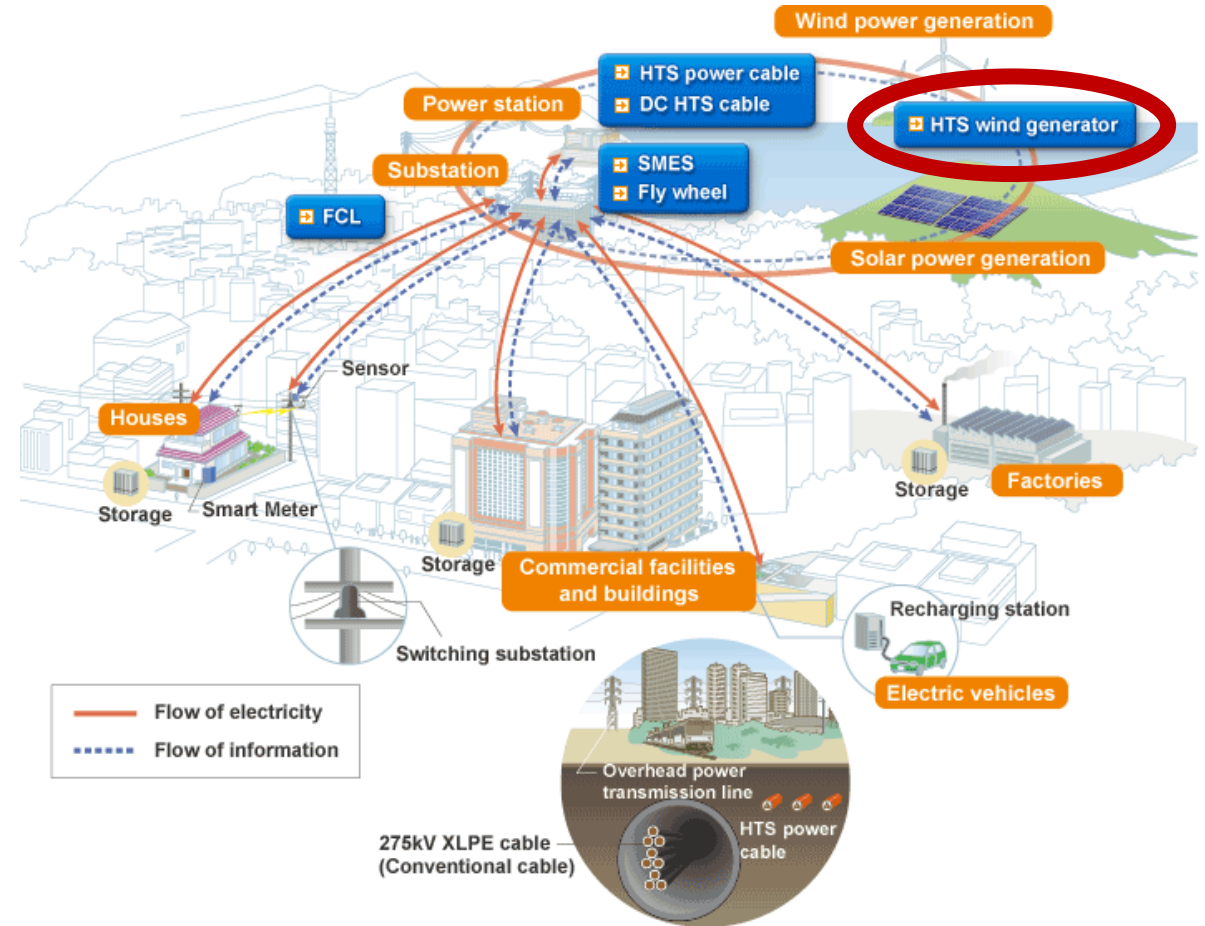


Fig 17. Aplicaciones de los HTS comerciales¹⁷.

[14] <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/technology/soft-magnetic-materials/superconducting-wire-development/>

[15] <https://sumitomoelectric.com>

[16] <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx>

[17] <https://www.furukawa.co.jp/en/rd/superconduct/smartgrid.html>

Topologías del generador HTS

Núcleo de aire
Alta densidad de flujo magnético
Mayor longitud de cintas SAT
Característica de circuito abierto lineal
Sistema criogénico más simple
Menor peso. Momento de inercia menor

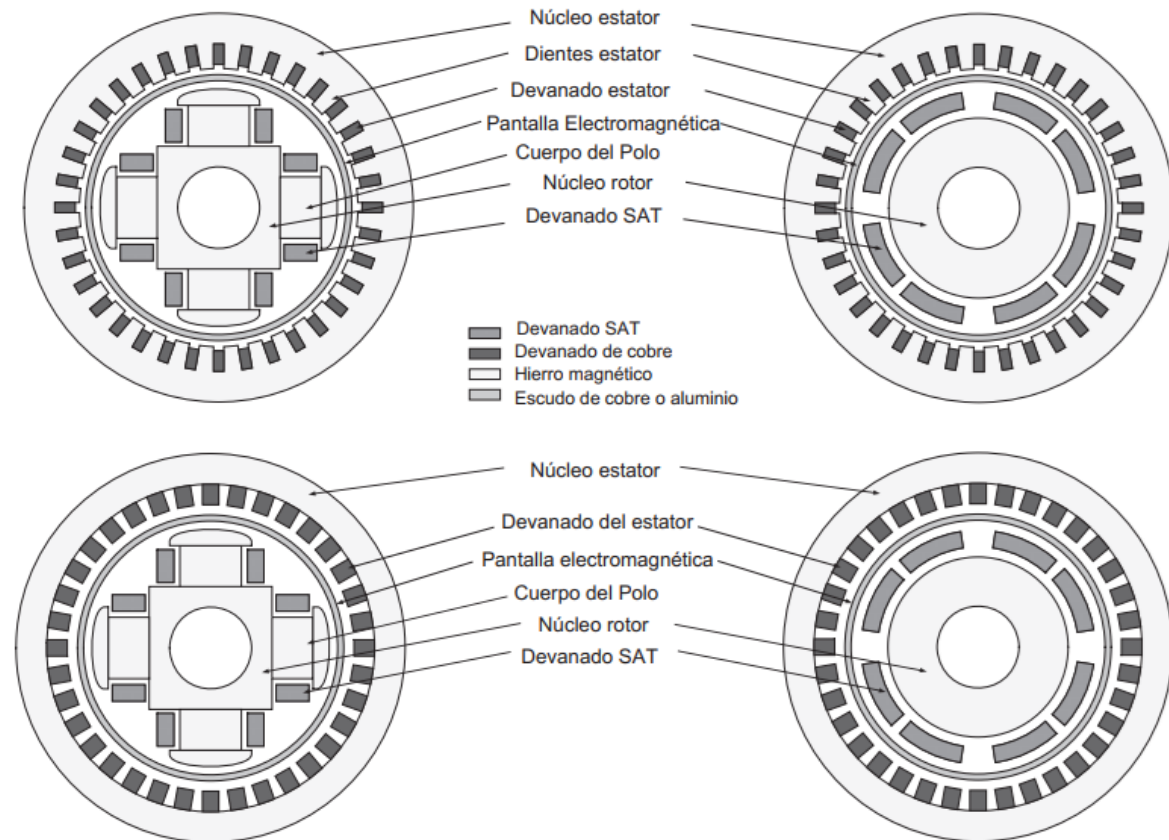
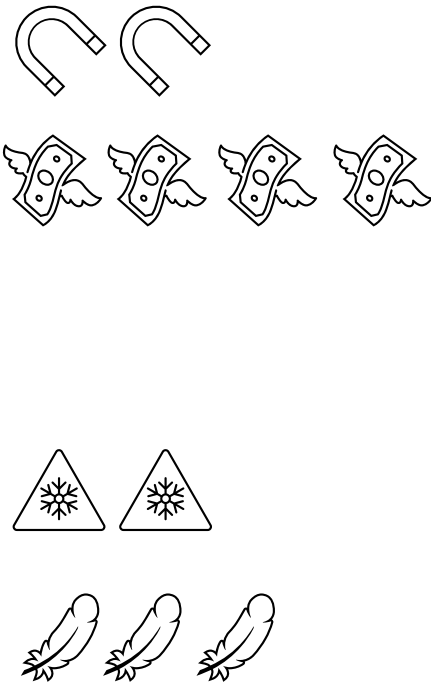


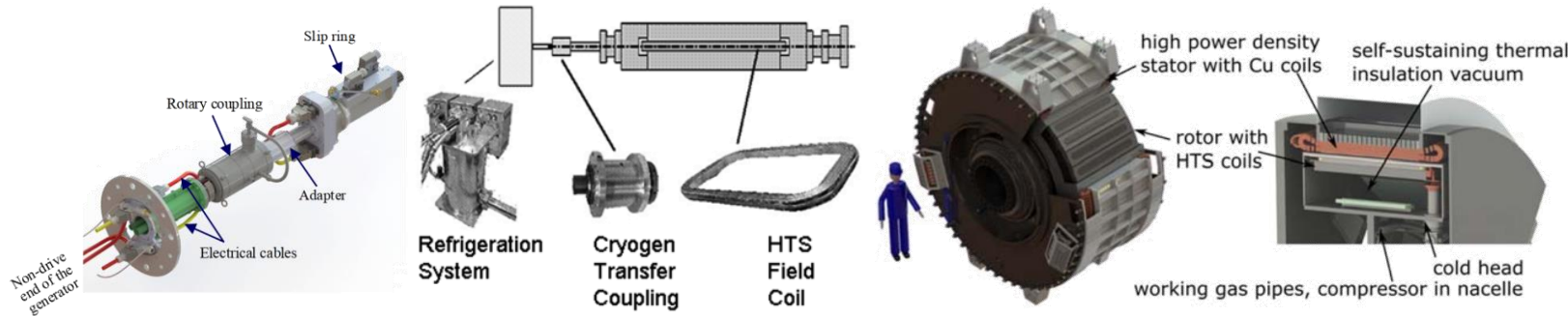
Fig 18. Topologías comunes en las máquinas rotativas superconductoras ¹⁸.

[18] Clive Lewis, "Direct drive superconducting wind generators", Converteam UK Ltd., Rugby, Warwickshire, UK, 2010

Enfriamiento del devanado HTS

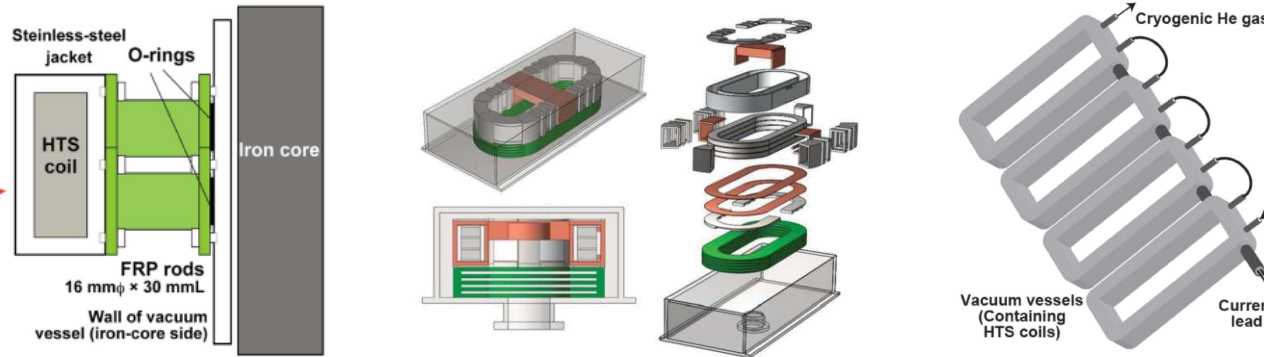
Topologías de enfriamiento en un generador HTS.

Rotor frío



- Enfriamiento lento.
- Desinstalación completa del rotor en caso de falla.
- Menor inercia térmica.
- Menos susceptible a deformaciones mecánicas por fallas.
- Sistema criogénico relativamente más sencillo

Rotor cálido



- Mayor inercia térmica.
- Mas susceptible a deformaciones mecánicas por fallas.
- Sistema criogénico y de suspensión complejo
- Enfriamiento rápido.
- Desinstalación parcial del rotor en caso de falla.

[19] Anne Bergen¹, Rasmus Andersen², Markus Bauer³, Hermann Boy⁴, Marcel ter Brake¹, Patrick Brutsaert⁵, Carsten Bühler⁶, Marc Dhallé¹, Jesper Hansen², Herman ten Kate¹ Design and in-field testing of the world's first ReBCO rotor for a 3.6 MW wind generator," *Superconductor Science and Technology*, Volume 32, Number 12, 2019.

[20] K. J. Song, S. H. Yang, G. P. Choi, J. Lim and C. Park, "The Magnetic Properties of Several HTS GdBCO-Coated Conductors," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 5, pp. 1-4, Aug. 2019.

[21] "Realization of a large-scale superconducting generator for a wind power generation system", Changwon National University.

Modelado del material HTS



Ley de potencia E-J

Factor de potencia

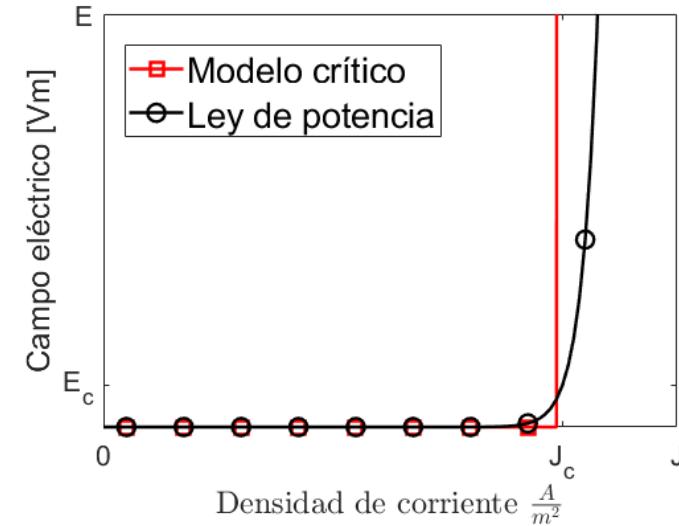
$$\vec{E}(\vec{J}_{sc}) = E_c \frac{J_{sc}}{J_c} \left(\frac{|J_{sc}|}{J_c} \right)^{n-1}$$

Criterio de campo eléctrico crítico

Densidad de corriente crítica

$$\rho_{sc}(T_{sc}, B, J_{sc}) = \frac{E_c}{J_c^n} |J_{sc}|^{n-1}$$

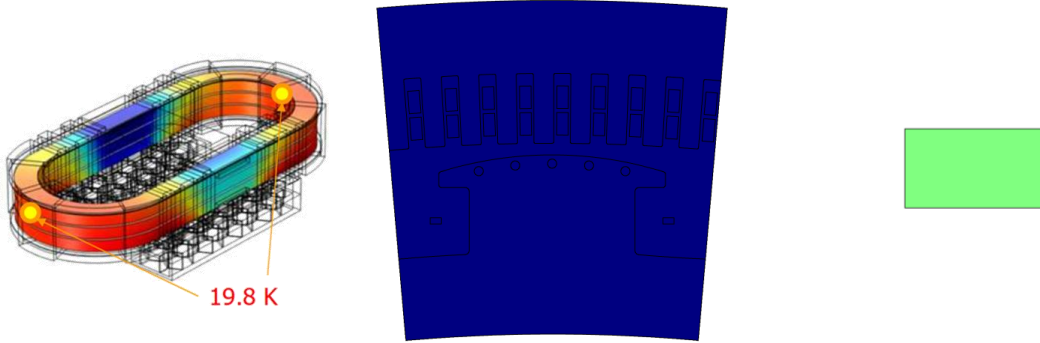
Derivado de la medición de la característica V-I



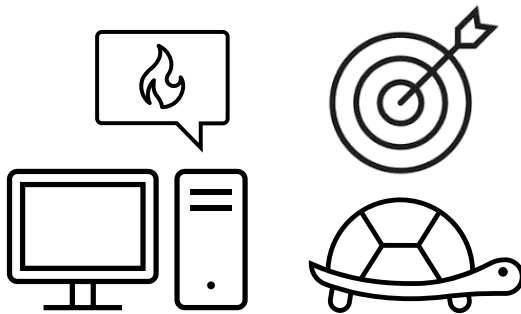
$$J_c(T, B) = \begin{cases} J_{c0}, & T_{sc} < T_{cs} \\ J_{c0} e^{(-B/B_0)} \left(\frac{T_c - T_{sc}}{T_c - T_{op}} \right), & T_{cs} \leq T_{sc} \leq T_c \\ 0, & T_{sc} > T_c \end{cases}$$

Modelado del generador HTS

Método de los elementos finitos (MEF)

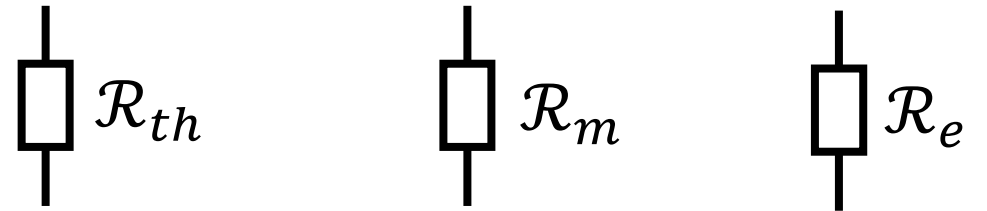


$$e_a \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla T - \alpha T + \gamma) + \beta \cdot \nabla T + aT = f$$

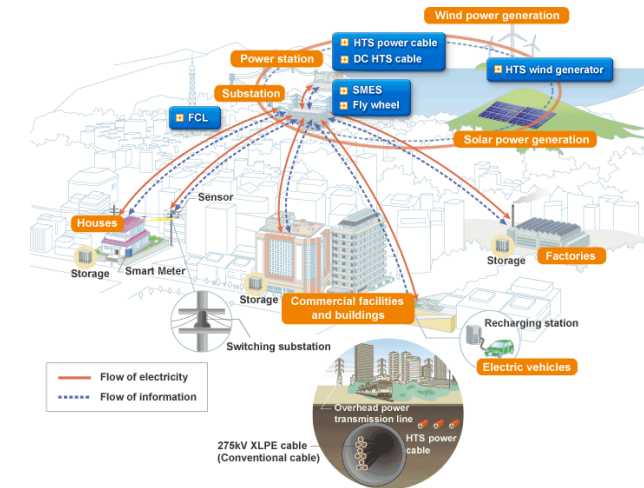
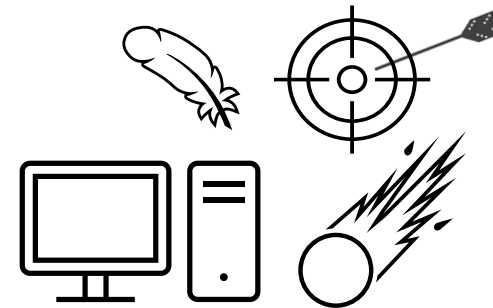


Método de parámetros concentrados (MPC)

Caracterizar la esencia de la física del superconductor simplificando el fenómeno distribuido en uno discreto.

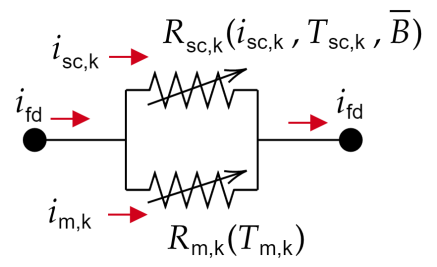
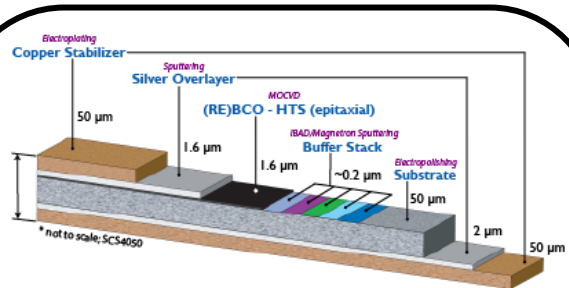


$$R(x) = k(x) \frac{l(x)}{A(x)}$$



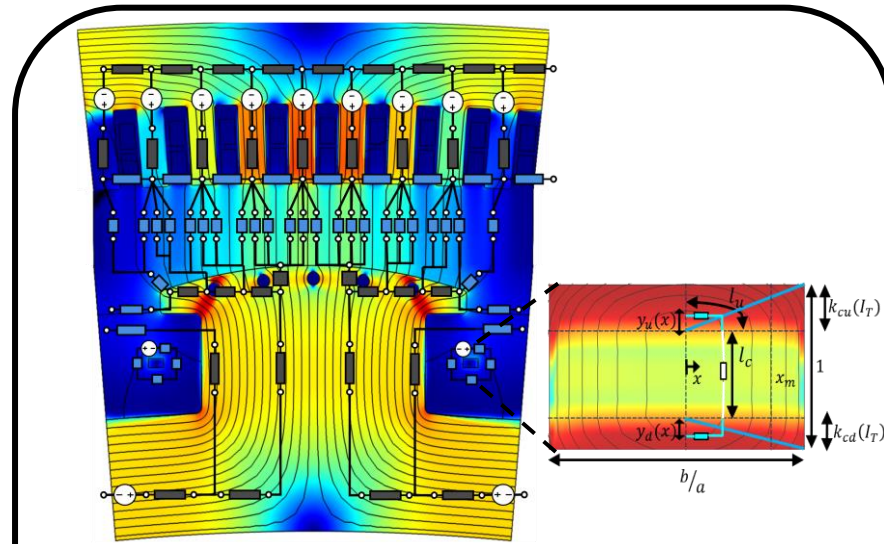
Modelado del devanado HTS por el MPC

Acoplamiento multifísico usando el MPC



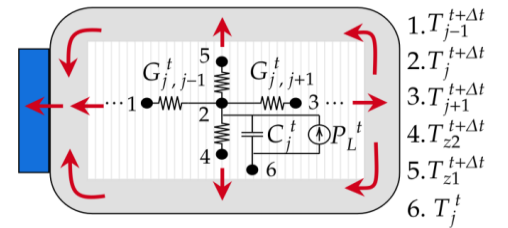
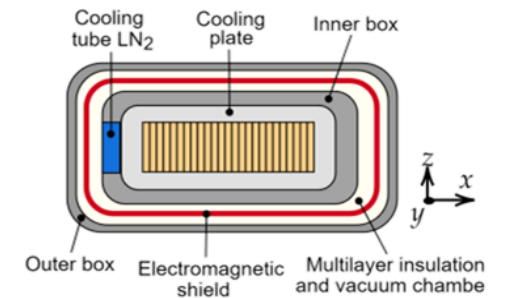
Modelo eléctrico

$B(i_{fd})$



Modelo magnético

$P_{loss,k}(i_{sc,k}, i_{m,k})$



Modelo térmico

Modelado eléctrico del devanado HTS

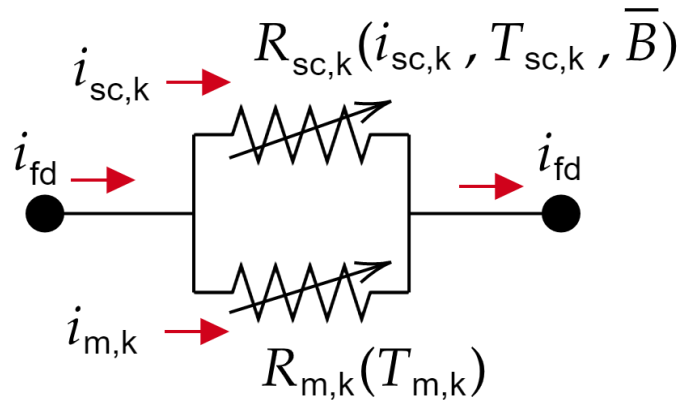
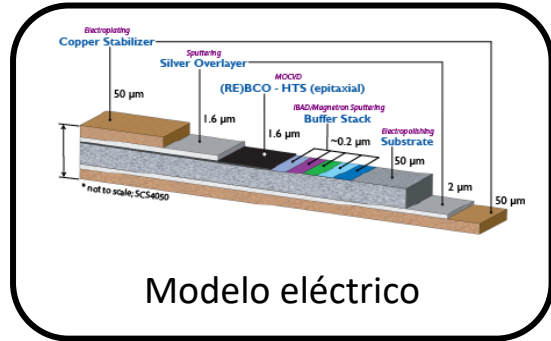


Fig 19. Diagrama equivalente paralelo por cada vuelta entre las capas metálicas y la capa superconductor

$R_{m,k}(T)$ = Equivalente del paralelo de las capas metálicas por vuelta

$$R_{sc,k} = \rho_{sc,k}(T_{sc,k}, \bar{B}_{sc}, i_{sc,k}) \frac{l_{sc,k}}{A_{sc,k}}$$

Se aplica la LVK para cada vuelta

$$i_{sc,k}^{n_k} + \frac{I_{c,k}^{n_k}}{V_{c,k}} R_{m,k} (i_{sc,k} - i_{fd}) = 0$$

Modelado termo-eléctrico del devanado HTS

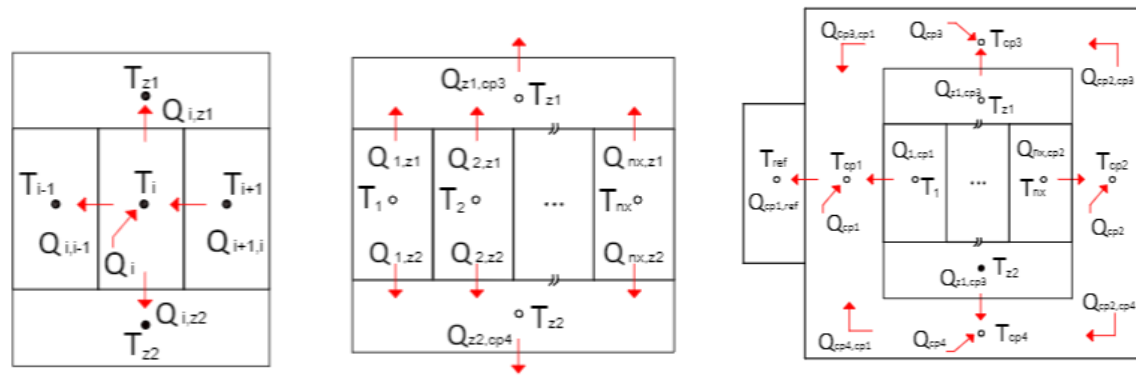
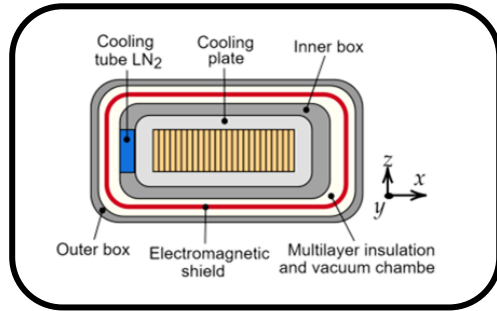


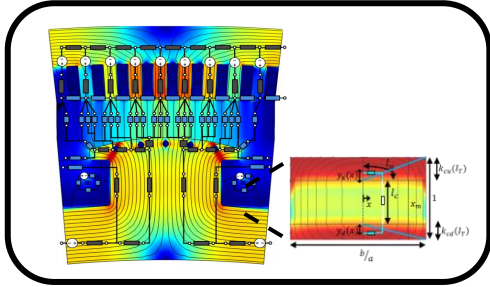
Fig 20. Submodelos utilizados para representar la transferencia de calor en el crióstato modular.

Utilizando el análisis nodal basado en la LCK y el método de Euler explícito

$$\mathcal{R}_{th} = \frac{l_{sc}}{k^{th}(T)A_{sc}} \quad C_{th} = \rho V_{ol} c_p^{th}(T) \quad P_{loss,k} = i_k^2 R_k$$

$$\mathbf{T}^{t+\Delta t} = \left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{C}^t + \mathbf{G}^t \right)^{-1} \cdot \left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{C}^t \mathbf{T}^t + \mathbf{T}_{op} \mathbf{G}_{bd}^t + \mathbf{P}_{tp}^t \right)$$

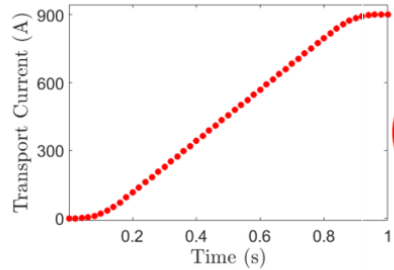
Modelado magnético del devanado HTS



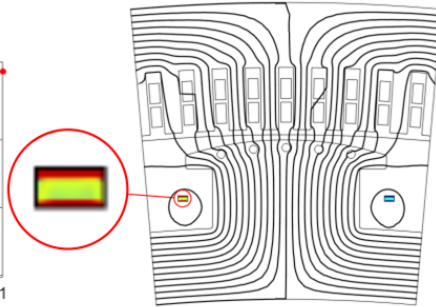
El modelo magnético está basado en un análisis del elemento finito utilizando la formulación **T-A** homogénea.

$$\nabla \times \rho_{sc} (\nabla \times \mathbf{T}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}$$



(a)



(b)

Fig 21. (a) Corriente de transporte utilizada para la simulación. (b) Distribuciones del flujo magnético y de densidad de corriente en la sección de un polo del generador.

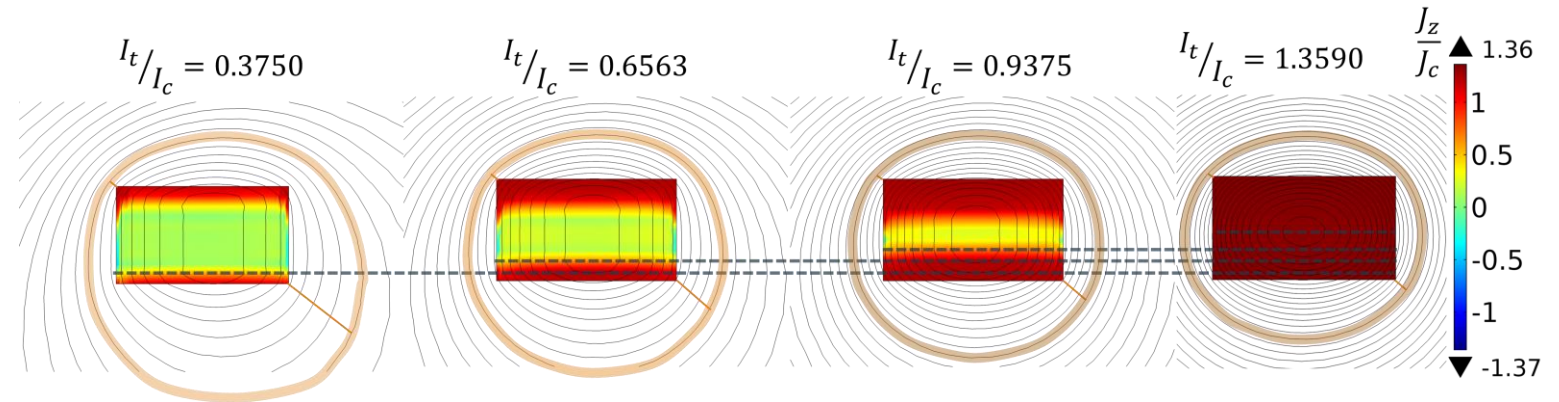


Fig 22. Distribuciones de flujo magnético y de densidad de corriente dentro y fuera del devanado para diferentes corrientes de transporte normalizadas.

Modelado magnético del devanado HTS

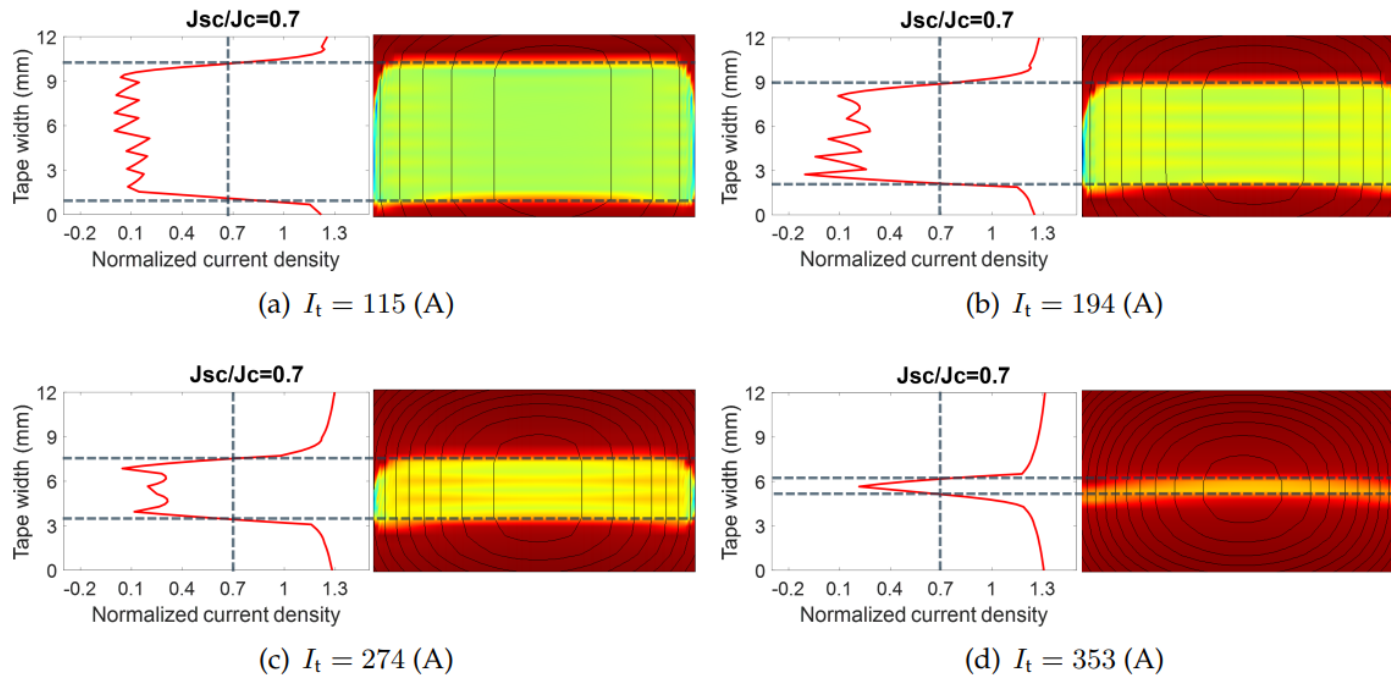


Fig 22. Distribuciones de flujo magnético y de densidad de corriente dentro y fuera del devanado para diferentes corrientes de transporte normalizadas.

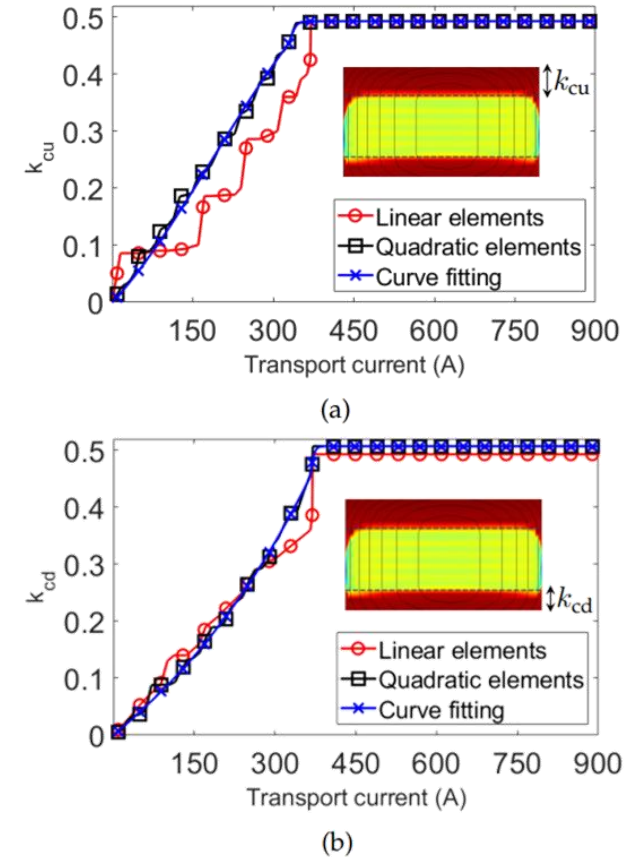
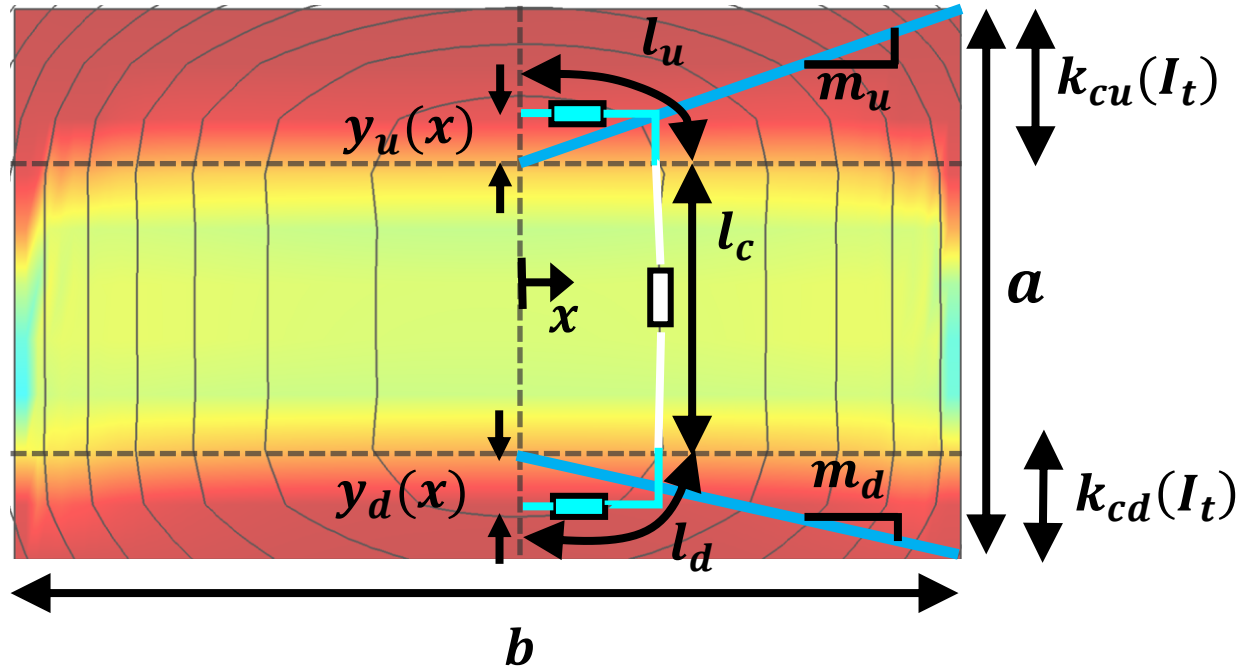


Fig 23. Fracción del ancho de la cinta por donde circulan los frentes de corriente en el devanado superconductor. (a) Frente superior. (b) Frente inferior

Modelado magnético del devanado HTS



$$l_{u,d} = \frac{\pi}{2} x (1 + m_{u,d}) \left(1 + \left(\frac{3h_{u,d}}{10 + \sqrt{4 - 3h_{u,d}}} \right) \right)$$

$$l_c = (1 - k_{cu}(I_T) - k_{cd}(I_T))$$

$$A_{u,d} = x m_{u,d} l_{axial} \quad A_c = x l_{axial}$$

Fig 24. Diagrama de reluctancias en el interior del devanado superconductor

$$\mathcal{R}_u = \frac{l_u(I_t)}{\mu_0 A_u(I_t)}$$

$$\mathcal{R}_d = \frac{l_d(I_t)}{\mu_0 A_d(I_t)}$$

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c(I_t)}{\mu_0 A_c(I_t)}$$

Modelado magnético del devanado HTS

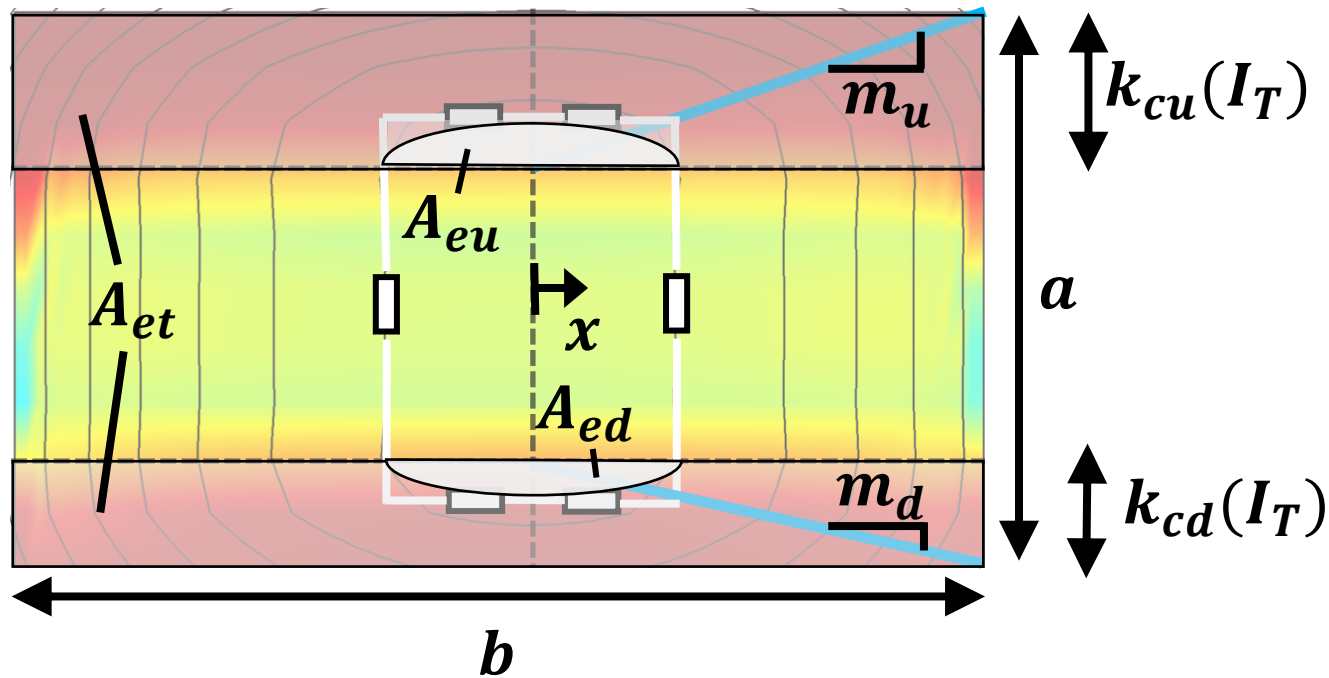


Fig 25. Áreas encerradas por los frentes de corriente dentro del devanado superconductor.

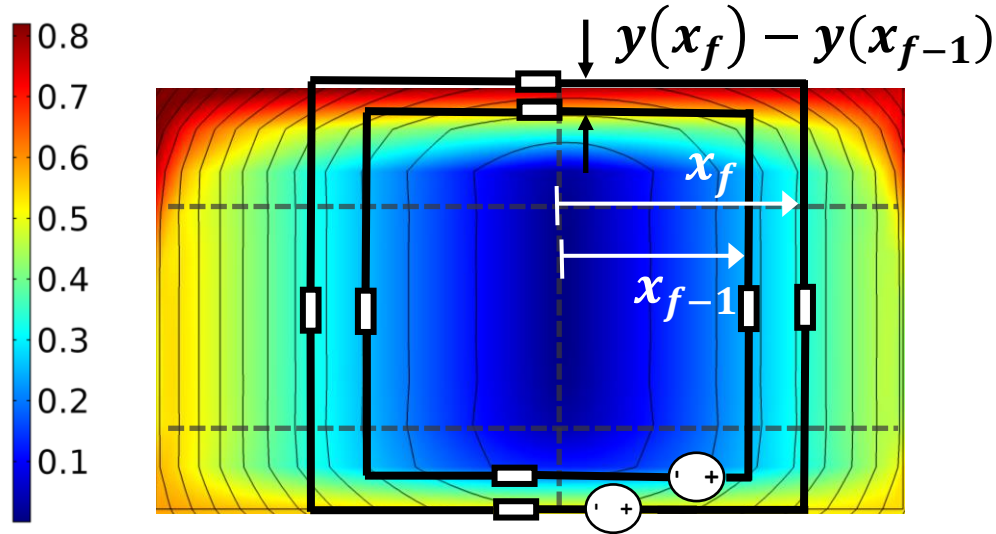
$$A_{eu,ed} = \frac{\pi}{2} x^2 m_{u,d}$$

$$A_{enc} = A_{eu} + A_{ed}$$

$$A_t = ab(k_{cu}(I_T) + k_{cd}(I_T))$$

$$F_{mm,x} = \frac{A_{enc}(x)}{A_t} N_f I_T$$

Modelado magnético del devanado HTS



$$\phi_x = \frac{F_{mm,x}}{(2\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_u + \mathcal{R}_d)}$$

$$d\phi_x \approx \phi_{x_f} - \phi_{x_{f-1}}$$

$$B = \frac{d\phi_x}{dA} \approx \frac{\phi_{x_f} - \phi_{x_{f-1}}}{l_{axial}(y(x_f) - y(x_{f-1}))}$$

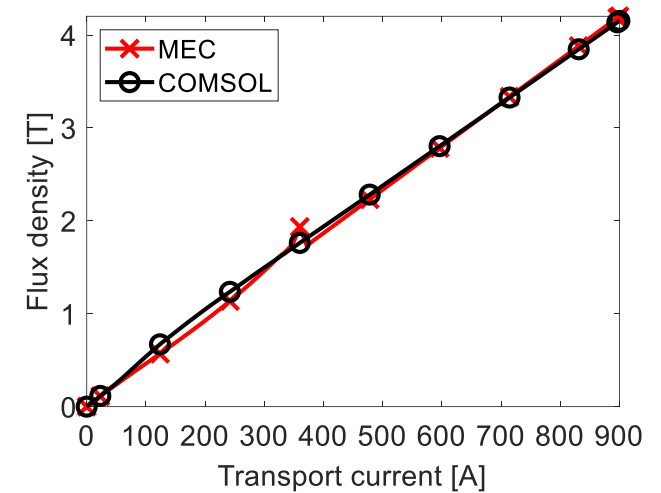
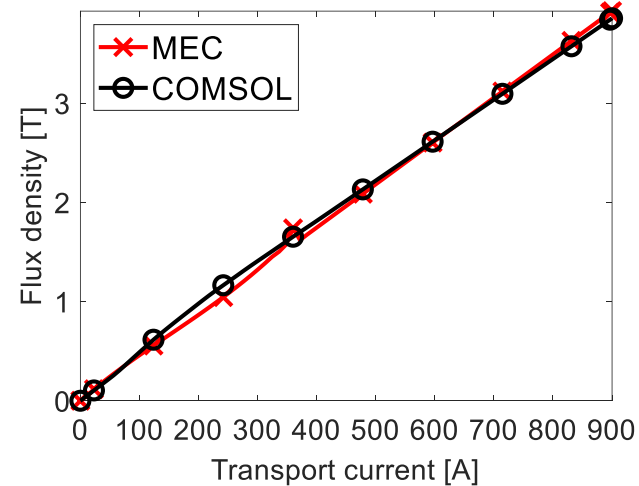
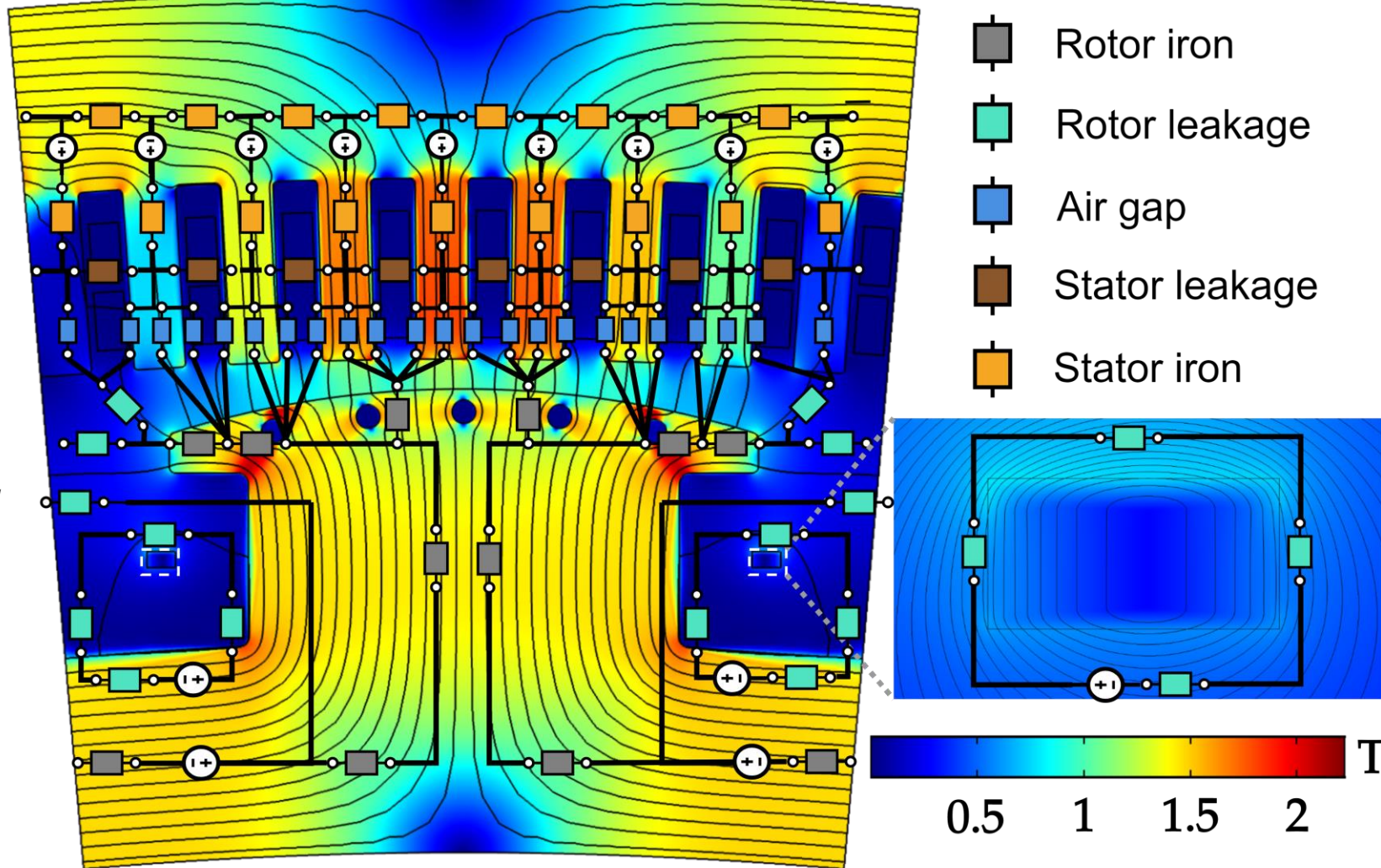


Fig 26. Comparación de la densidad de flujo magnético entre COMSOL y el circuito magnético equivalente. (a) Para un stack de espesor b . (b) Para un stack de espesor $2.5b$

Modelado magnético del generador HTS



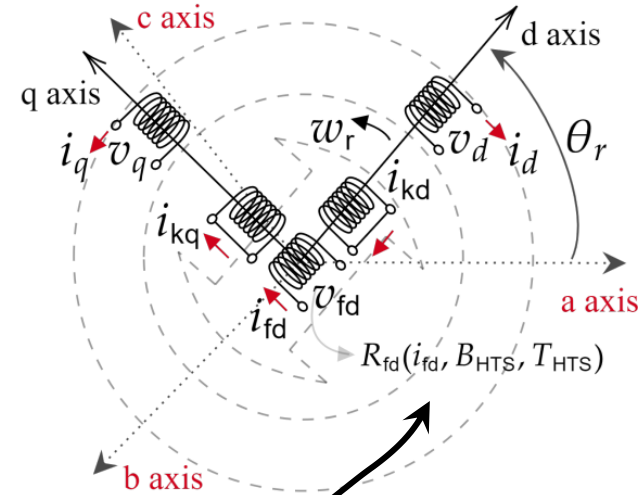
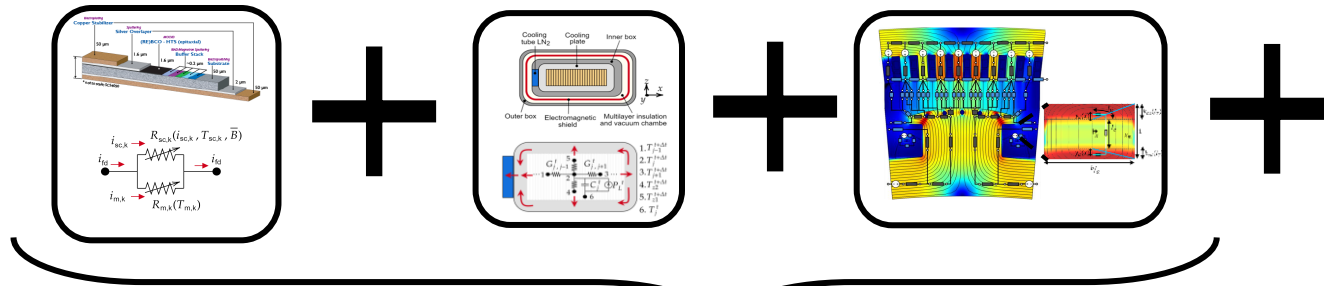
Utilizando el análisis de malla basado en la LVK

$$R_{mg}(\Phi)\Phi - F_{mmf} = 0$$

Φ

B

Modelado del generador HTS en dq0

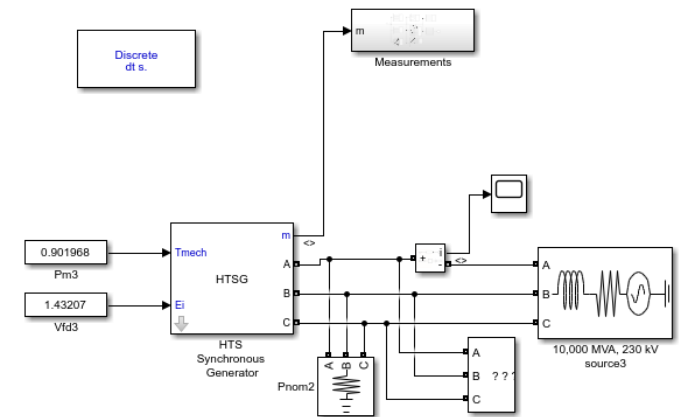
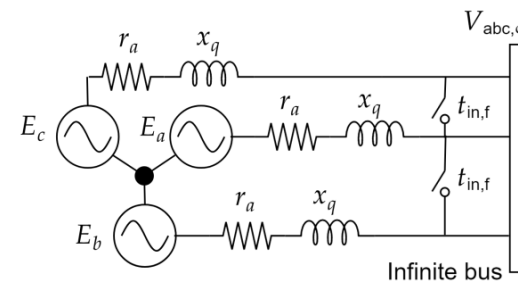


Modelo en el marco de referencia dq0

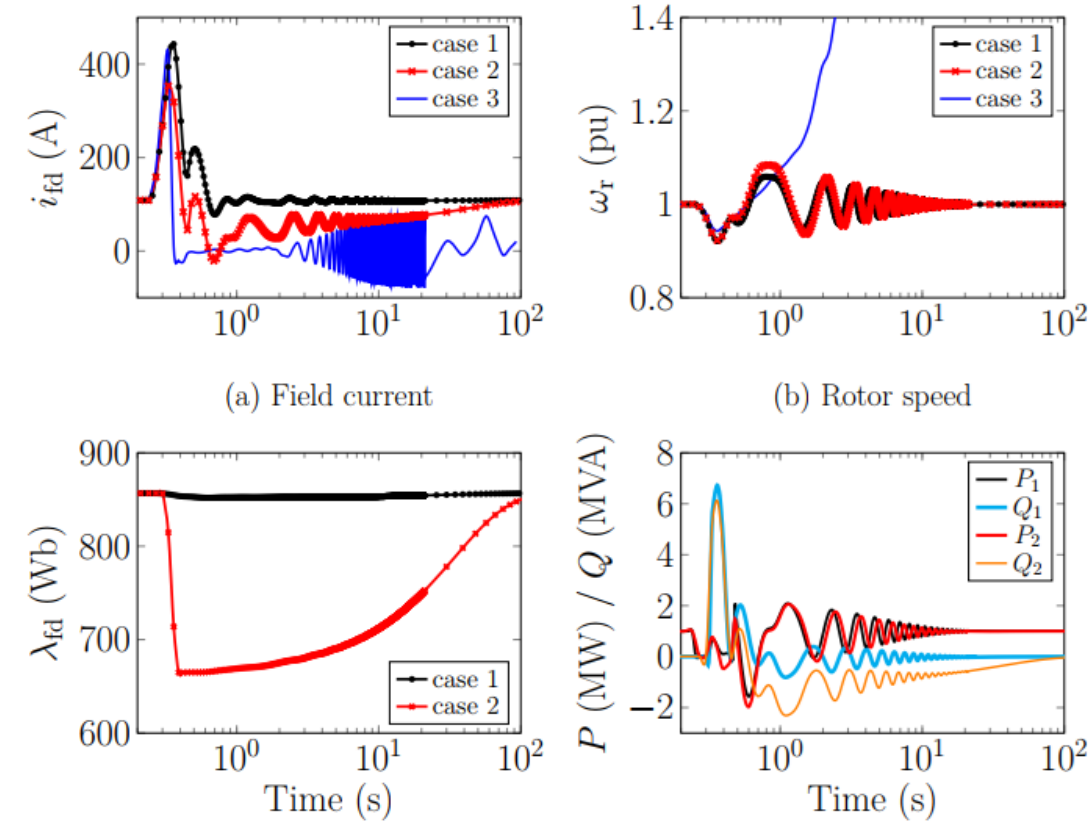
$$\frac{1}{R_{fd}} = N_{fd,p} \left(\sum_{k=1}^{N_{fd,p}} \left[\frac{1}{R_{sc,k}} + \frac{1}{R_{m,k}(T)} \right] \right)$$

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_{dq0,r}}{dt} = \omega_{rb} (\mathbf{v}_{dq0,r} - \mathbf{R} \mathbf{i}_{dq0,r}) \\ \lambda_{dq0,r} = \mathbf{L} \mathbf{i}_{dq0,r} \\ \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (\tau_m - \tau_e) \end{cases}$$

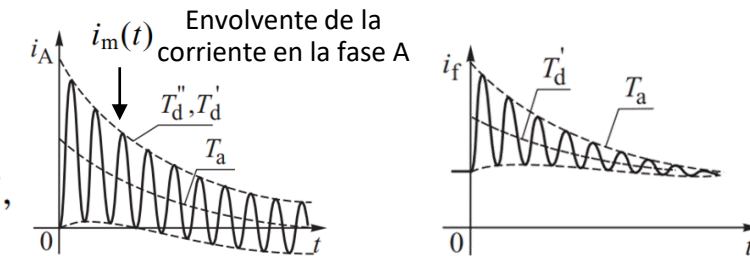
Caso de estudio



Falla trifásica del generador HTS para 3 casos



Existen 3 periodos principales en los transitorios del estator



- Caso 1:

Máquina convencional

$$i_m(t) = \Delta i'' e^{-t/T_d''} + \Delta i' e^{-t/T_d'} + \Delta i,$$

- Caso 2:

Máquina HTS con amortiguamiento (sin transición de estado)

- Caso 3:

Máquina HTS sin amortiguamiento (con transición de estado)

Fig 27. Comportamiento de un generador convencional y uno HTS cuando ocurre una falla trifásica en las terminales del estator ²⁴.

[22] A. Baez-Muñoz, F. Trillaud, J. R. Rodríguez-Rodríguez, L. M. Castro and R. Escarela-Perez, "Thermoelectromagnetic Lumped-Parameter Model of High Temperature Superconductor Generators for Transient Stability Analysis," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 31, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2021, Art no. 5201705, doi: 10.1109/TASC.2021.3060696.

Conclusiones y trabajo futuro

- La máquina superconductora es una opción atractiva para el desarrollo de la energía eólica mar-adentro.
- De igual forma la máquina superconductora podría ser una opción viable para repotencializar los parques eólicos aprovechando el decomisionamiento próximo de parques eólicos en algunos lugares del mundo.
- Es fundamental investigar el comportamiento transitorio de las máquinas HTS con el fin de garantizar una operación confiable y segura para el SEP.

- Es necesario implementar el modelo desarrollado conectado a un convertidor de potencia de plena escala y estudiar la interacción entre el generador HTS y la red eléctrica.



Gracias por su atención

