

5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Método inductivo para la medición de corriente crítica en cintas HTS BSCCO

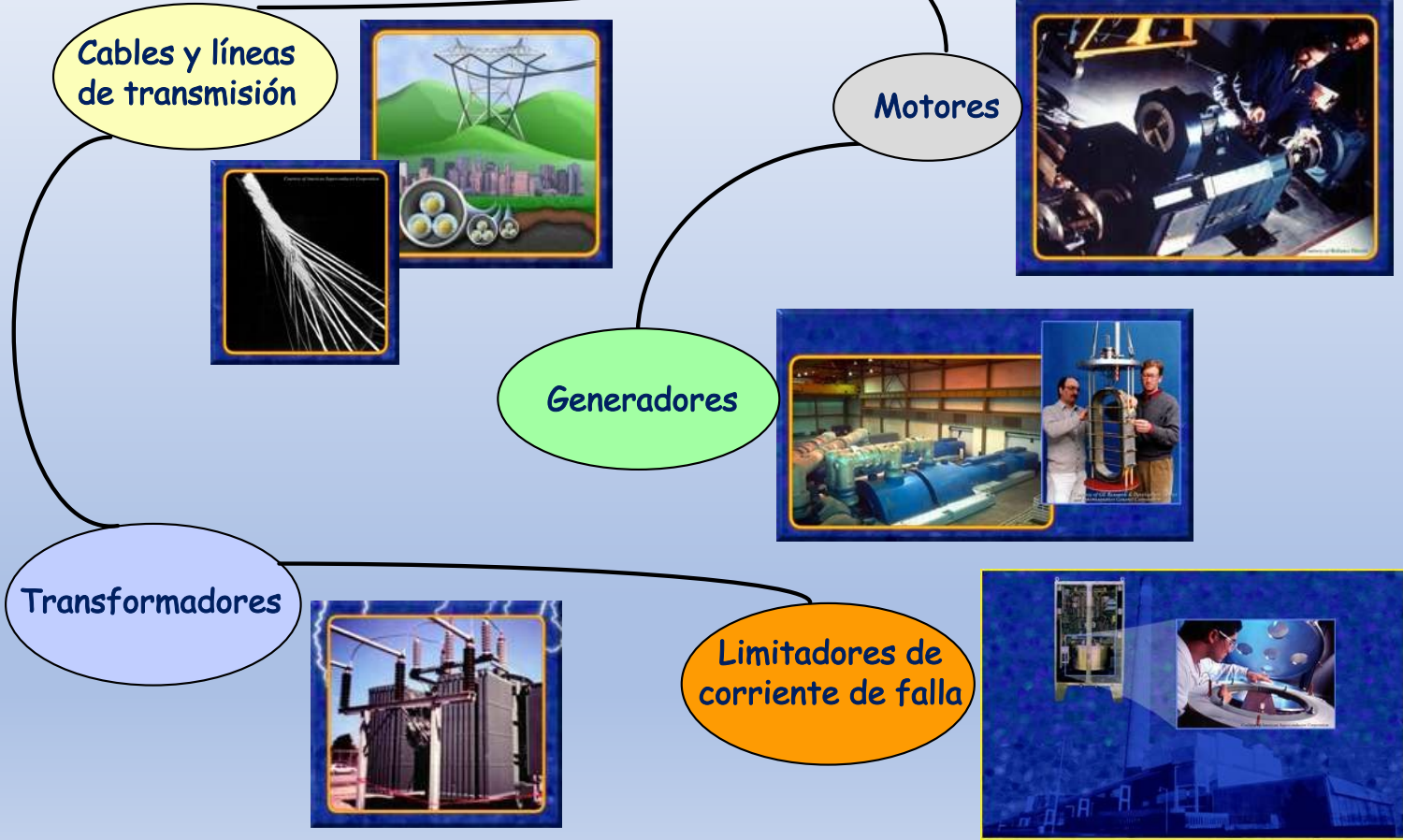
Dr. Adrián González Parada
DICIS – Universidad de Guanajuato

5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México



Aplicaciones de la superconductividad



5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Introducción

El desarrollo de equipos con materiales superconductores, requiere de evaluaciones con el fin de conocer su características principales, como son:

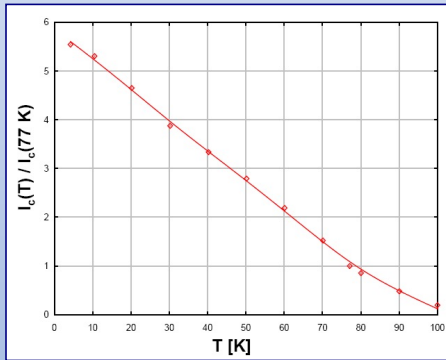
- Corriente crítica (I_c)
- Campo Magnético Crítico (B_c)
- Temperatura Crítica (T_c)

Siendo el principal parámetro de monitoreo la medición de la corriente crítica del equipo desarrollado para poder determinar los otros parámetros restantes

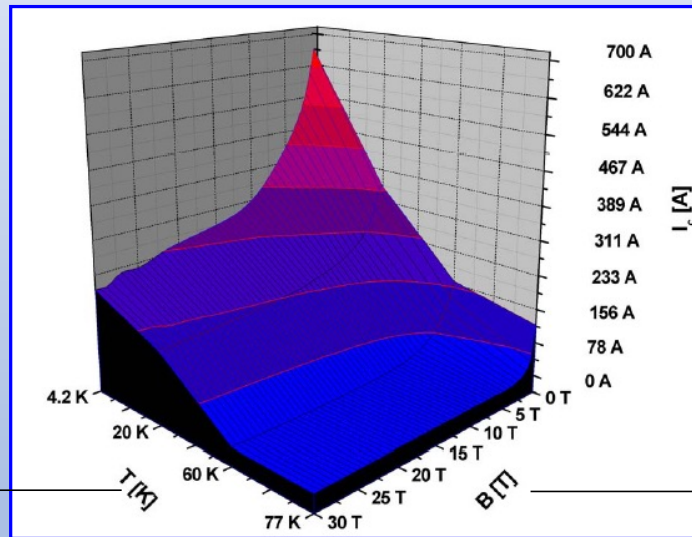
5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México

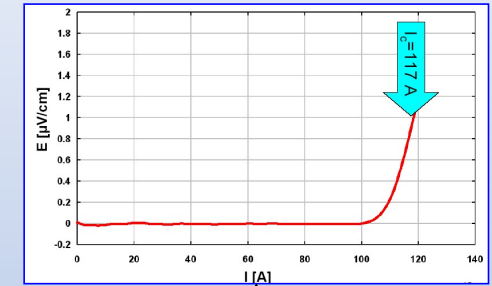
Estas condiciones son interdependientes y están definidas por las condiciones de operación del superconductor



Relación de $I_c - T_c$

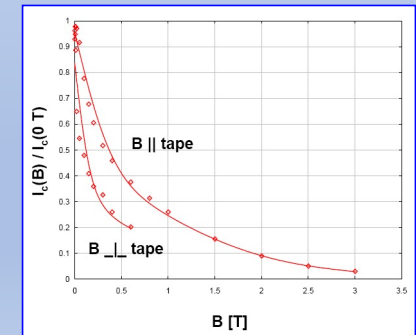


Interrelación B_c, T_c, I_c



Corriente I_c (77 K, B=0)

Relación de $I_c - B_c$



5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México

Métodos para determinar la I_c

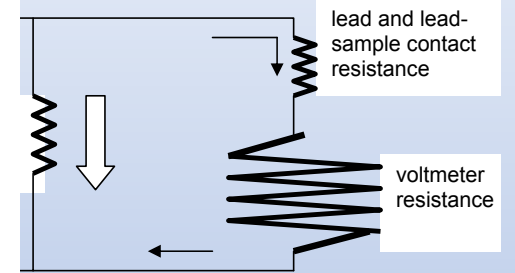
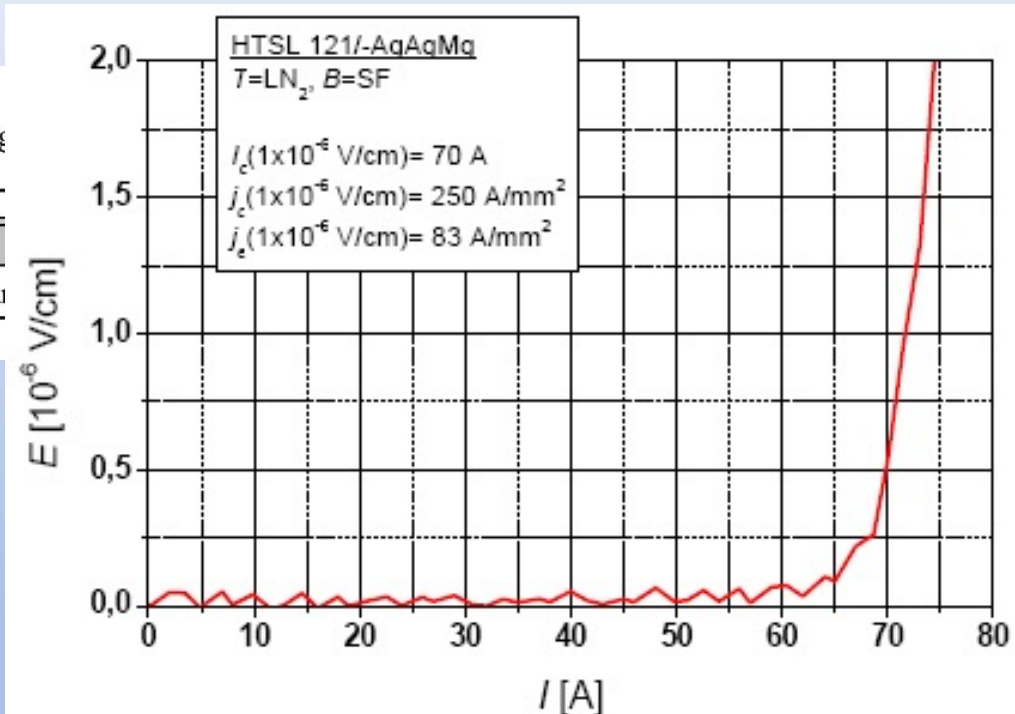
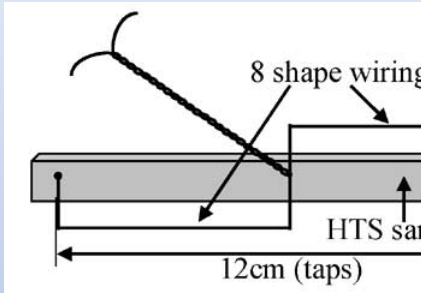


- ✓ **Método de las cuatro terminales:** cintas y materiales superconductores de dimensiones adecuadas para su manipulación a las cuales se les puedan colocar electrodos para evaluación.
- ✓ **Método Inductivos de dos bobinas:** materiales superconductores en placas delgadas o bulks para inducir una corriente y detectar su variación con respecto al campo magnético.
- ✓ **Método Inductivos de una bobina:** Detección del campo magnético generado por la corriente circulante en el material superconductor y su variación con respecto a la corriente cuando llega a valores de I_c

5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México

Método de cuatro terminales

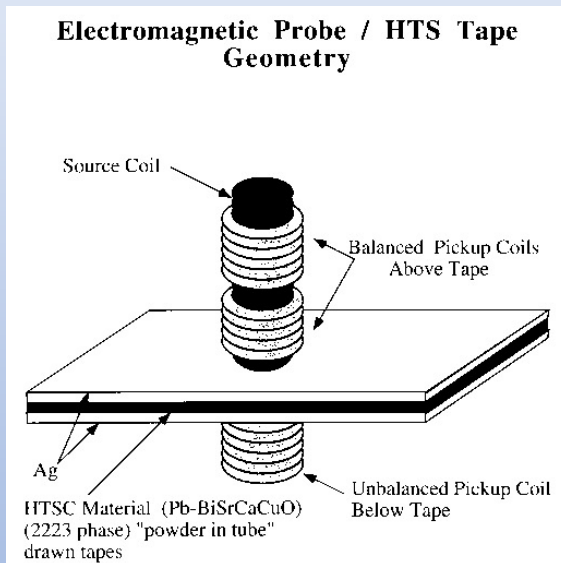


Modelo Eléctrico

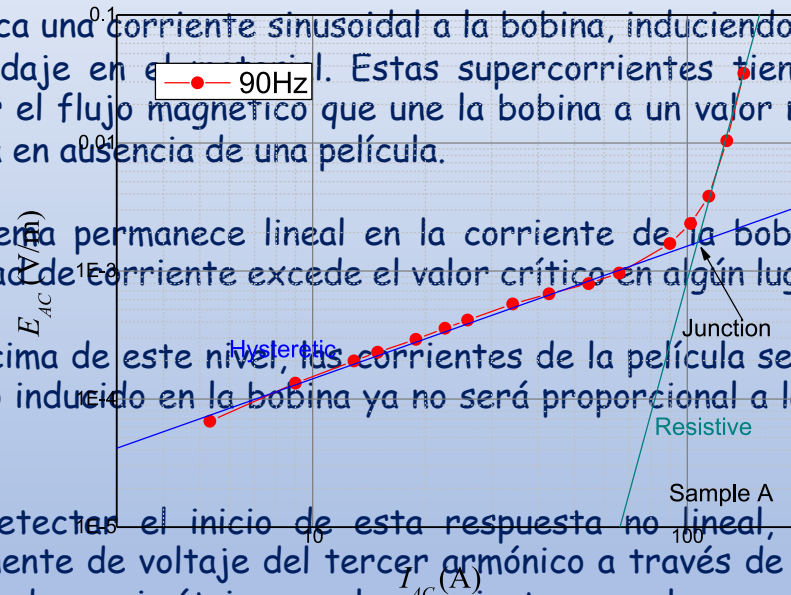
Método Inductivo dos Bobinas

Proceso de detección:

IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, NO. 7, OCTOBER 2016



- Se aplica una corriente sinusoidal a la bobina, induciendo supercorrientes de blindaje en el cable. Estas supercorrientes tienen el efecto de reducir el flujo magnético que une la bobina a un valor menor que el que tendría en ausencia de una película.
- El sistema permanece lineal en la corriente de la bobina hasta que la densidad de corriente excede el valor crítico en algún lugar de la película.
- Por encima de este nivel, las corrientes de la película se redistribuirán y el flujo inducido en la bobina ya no será proporcional a la corriente de la bobina.
- Para detectar el inicio de esta respuesta no lineal, se monitorea el componente de voltaje del tercer armónico a través de la bobina. (La no linealidad es simétrica en la corriente, por lo que solo aparecerán armónicos impares).



5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

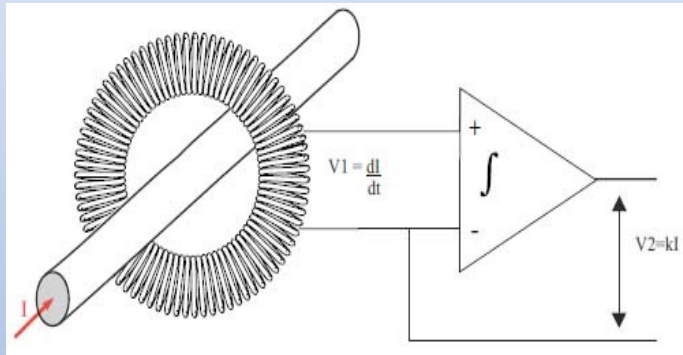
Desde la Ciudad de México

Método Inductivo una Bobina



Proceso de detección:

- Se aplica una corriente sinusoidal al material o equipo superconductor, esta corriente genera un flujo magnético que es detectado por la bobina alrededor.
- El sistema permanece lineal en la corriente de la bobina hasta que la densidad de corriente excede el valor crítico.
- Por encima de este nivel, flujo magnético inducido en la bobina ya no será proporcional a la corriente de la bobina.
- Para detectar el inicio de esta respuesta no lineal, se monitorea el componente de voltaje del tercer armónico a través de la bobina. La medición se hace por medio de una bobina Rogowski.



5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.



Una sensor de tipo Rogowski es un embobinado de área transversal constante, montada sobre cualquier material con propiedades no magnéticas.



Walter Rogowski (7 de mayo de 1881 en Obrighoven, Alemania - 10 de marzo de 1947 en Aachen, Alemania) fue un físico alemán que unió la física teórica y la tecnología aplicada en numerosas áreas de la electrónica.

5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Sensor de tipo Rogowski.



- Linealidad.
- Ancho de banda.
- Sistema de medición no intrusivo.
- Aislación eléctrica.
- Fácil instalación.
- Tiempo de respuesta.
- Tolerancia a sobre corrientes.
- Problemas de DC, saturación del núcleo e histéresis.
- Bajo coeficiente térmico.
- Bajo consumo de potencia.

5^a

Escuela de

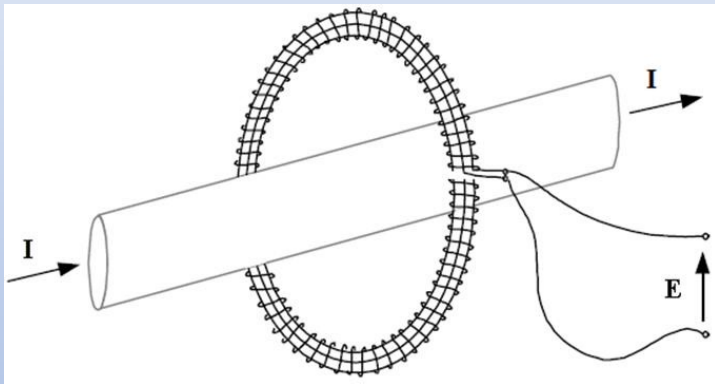
SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.



Principio de funcionamiento.



La bobina Rogowski forma un circuito cerrado en torno a la corriente a ser medida I , la tensión inducida E en la bobina es teóricamente independiente de su forma y de la posición del conductor de corriente dentro de esta

$$E = H \cdot \frac{dI}{dt}$$

$$H = \mu_0 \cdot N \cdot A$$

E es la tensión inducida

H es la sensibilidad de la bobina (Vs/A)

μ_0 es la permeabilidad magnética del núcleo

N es el número de vueltas

A es el área de una vuelta (m²)

5^a

Escuela de

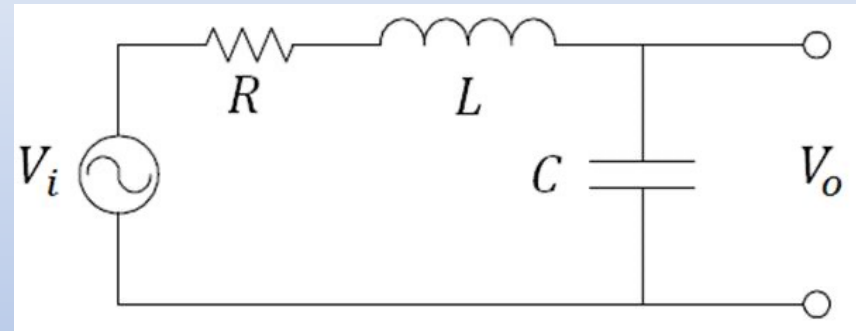
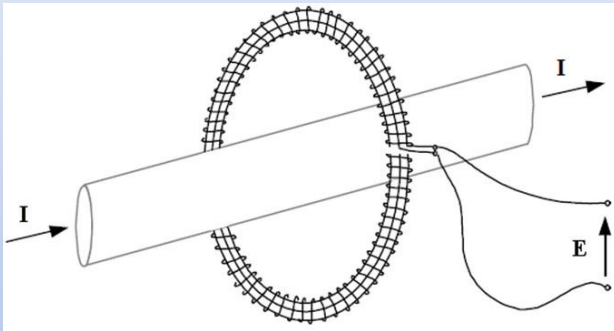
SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.



Características eléctricas.



Resistencia (R),

La Inductancia propia e inductancia mutua de la bobina (L , M)

La capacitancia (C)

5^a

Escuela de

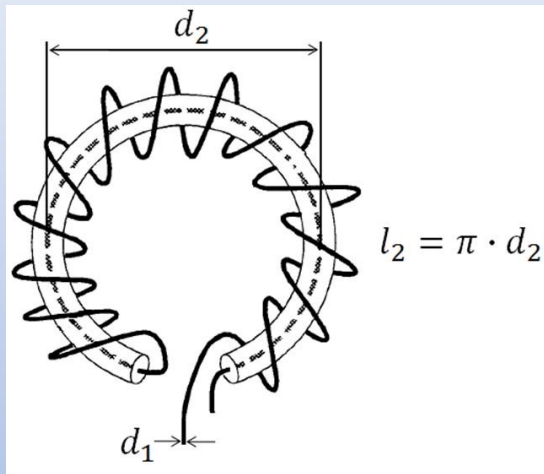
SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.



Características eléctricas.



$$R = \rho \cdot \frac{l_1}{\pi \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}$$

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l_2} \cdot S_2$$

$$C = \frac{16 \cdot \varepsilon \cdot l_2}{\pi \cdot \ln \left(\frac{S_2}{\pi \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \right)}$$

- Longitud y diámetro del cable de cobre: l_2, S_2
- Longitud y área transversal del núcleo: l_1, d_1
- Número de vueltas: N
- Resistividad del cobre: ρ
- Permeabilidad magnética del núcleo: μ_0
- Permitividad eléctrica del núcleo: ε_0

$$M = \mu_0 \cdot \frac{N}{l_2} \cdot S_2$$

$$BW = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

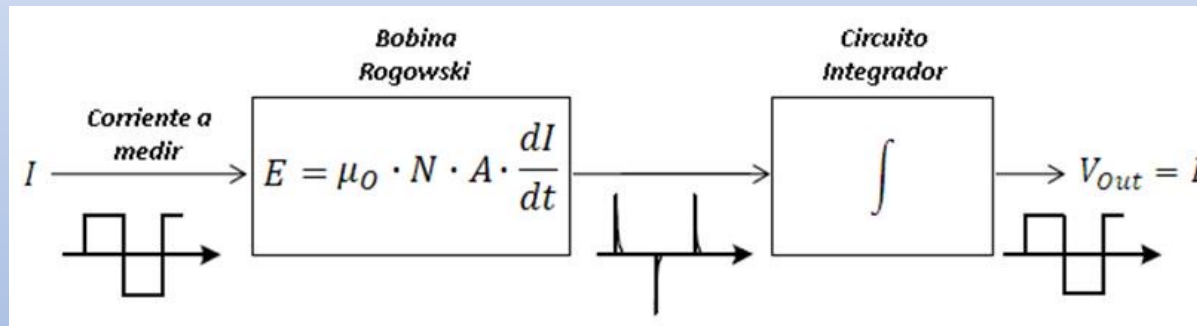
Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.



Método de integración.

La tensión inducida E en los extremos de la bobina, corresponde a la variación en el tiempo del flujo magnético que cruza el área transversal de esta. La integral de la tensión E en el tiempo, recupera la información de la corriente medida. Con una constante de tiempo de integración, T_i .



$$V = R_{sh} \cdot I \quad R_{sh} = \frac{H}{T_i}$$

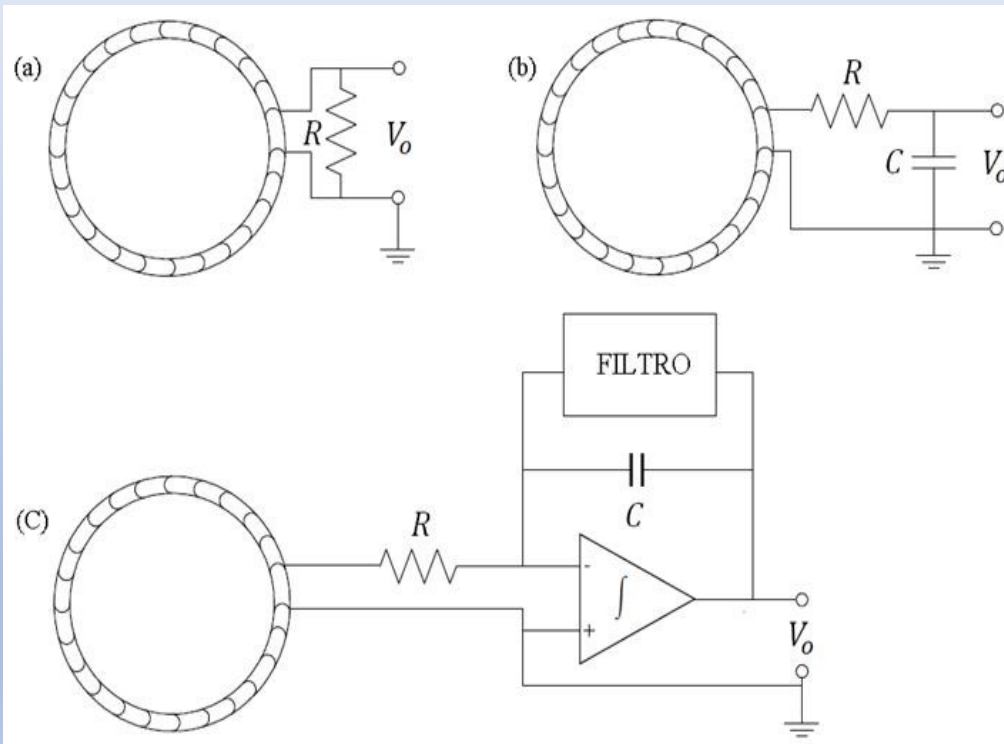
5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.



Método de integración.



a) integración pasiva

b) integración pasiva

c) integración activa

5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Sensor de tipo Rogowski.



Método de integración.

El método de integración activa supera muchos inconvenientes que se tienen con el uso de los métodos de integración pasiva como lo son:

- La bobina Rogowski debe de construirse sobre una forma rígida.
- Se obtienen oscilaciones en la señal de salida si la corriente a medir no se encuentra dentro de un arreglo simétrico,
- El cable por el cual circula la corriente a medir debe colocarse al centro de la bobina y no debe haber otros cables por los cuales circule corriente cerca de la bobina.

5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Sensor de tipo Rogowski.



Método de integración.

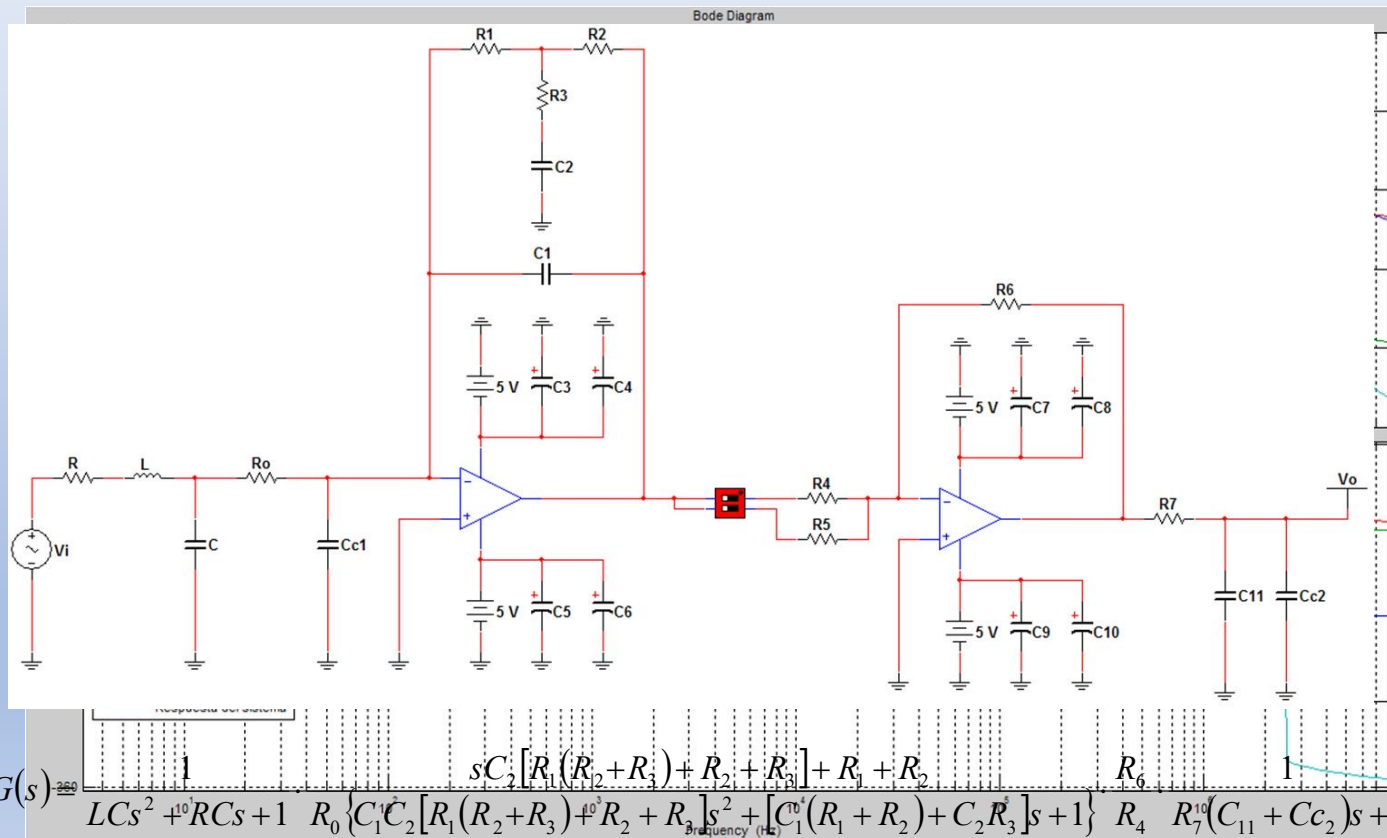
- Se debe de diseñar la bobina de Rogowski para que su frecuencia natural sea cuatro o cinco veces más alta que la frecuencia o las frecuencias a las que se desea medir la corriente.
- La distancia del cable que conecta a la bobina de Rogowski al circuito integrador debe de ser pequeña.
- El efecto de la impedancia de terminación de la bobina Rogowski afecta considerablemente las características dinámicas de esta.

5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.

Método de integración.



5^a

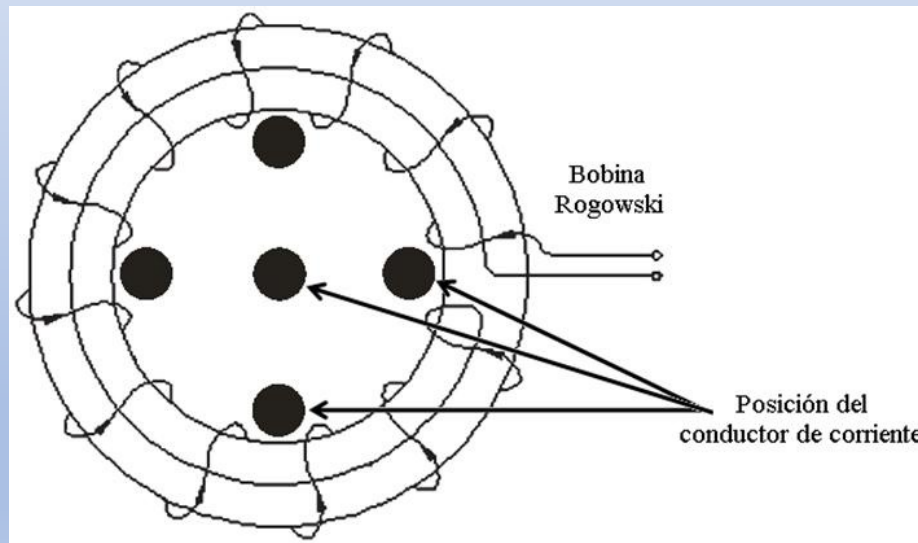
Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México

Sensor de tipo Rogowski.



Caracterización.

El transductor de corriente se caracterizó con el conductor de corriente en el centro y en sus extremos



5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México



Sensor de tipo Rogowski.

Arreglo de la prueba.

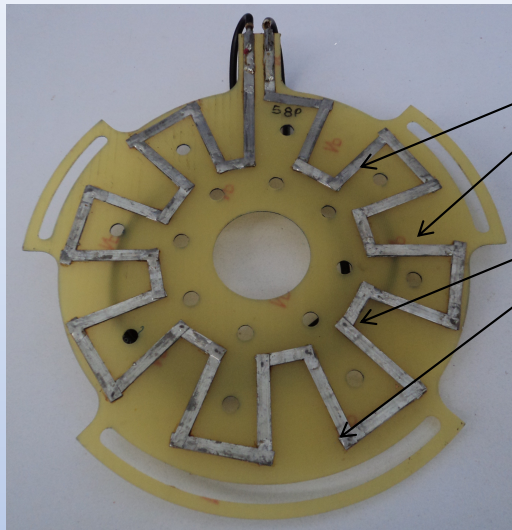


5_a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Cintas superconductoras

Uniones soldadas

Estator Superconductor



Tipo de material superconductor

Descripción	Característica
Material	BSCCO-2223
Tipo	Resistente a compresión
Corriente Crítica (I_c)	124 A ($B_c=0$; 77 K)
Diámetro externo (D_o)	4.8 mm (± 0.2 mm) 85 mm
Diámetro interno (D_i)	0.3 mm (± 0.1 mm) 40 mm
Separación entre estatores (T)	70 mm (mínimo) 5 mm **
Esfuerzo de tensión	265 MPa

5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México

Determinación de I_c por el método inductivo



Consideraciones principales:

- ✚ Existe una corriente circulante $I_0 \cos \omega t$ en el material superconductor.
- ✚ I_0 genera un campo magnético $H_0 \cos \omega t$ y una corriente superconductor autoinducida K_s que puede blindar el campo magnético generado.

Se pueden presentar dos estados

- ✚ Cuando $I_0 < I_c$, el campo magnético que es detectado es debido unicamente a la corriente circulante en el material.
- ✚ Cuando $I_0 > I_c$, El blindaje en el campo magnético no es completo y el campo magnético acomplado a la bobina puede ser expresado como una función no lineal de $I_0 \cos \omega t$, obteniendo una tensión $V_3 \cos(3\omega t + \theta_3)$.

5^a

Escuela de

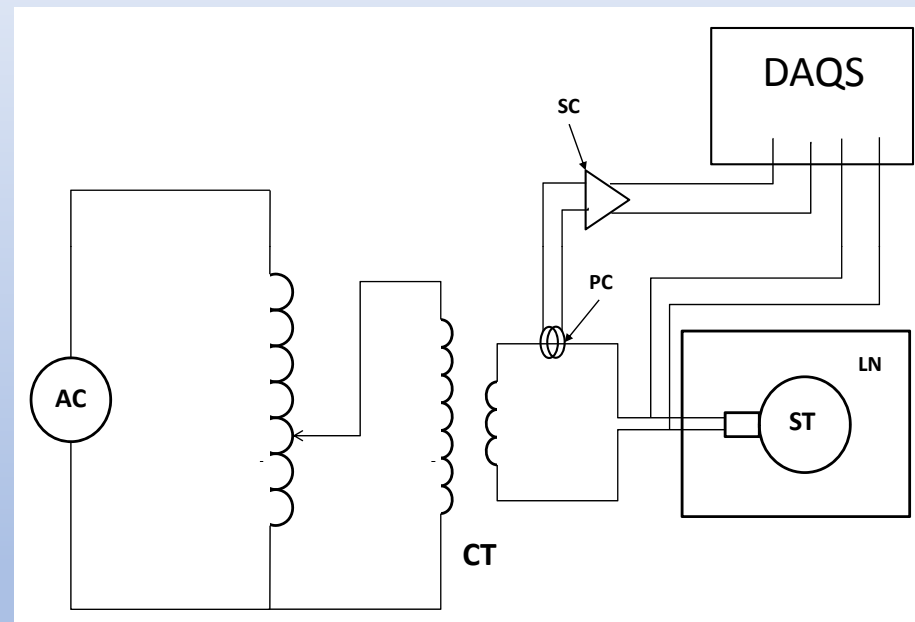
SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México

Esquema del sistema de medición



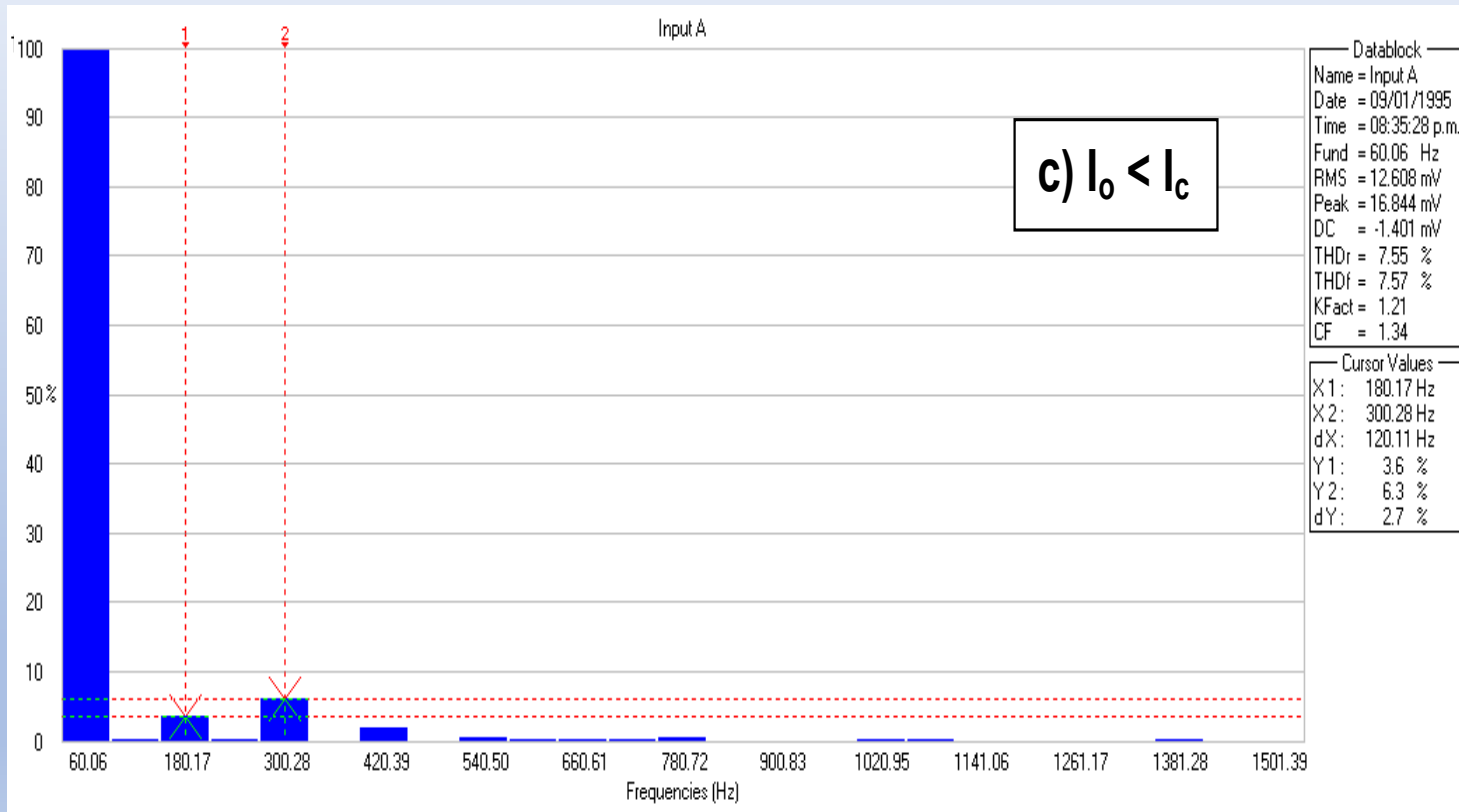
- **AC:** Fuente de CA
- **CT:** Transformador Variable
- **PC:** Bobina Rogwoski
- **SC:** Acondicionador de señal
- **DAQS:** Sistema de adquisición
- **ST:** Estator superconductor
- **LN:** Contenedor de LN



5^a

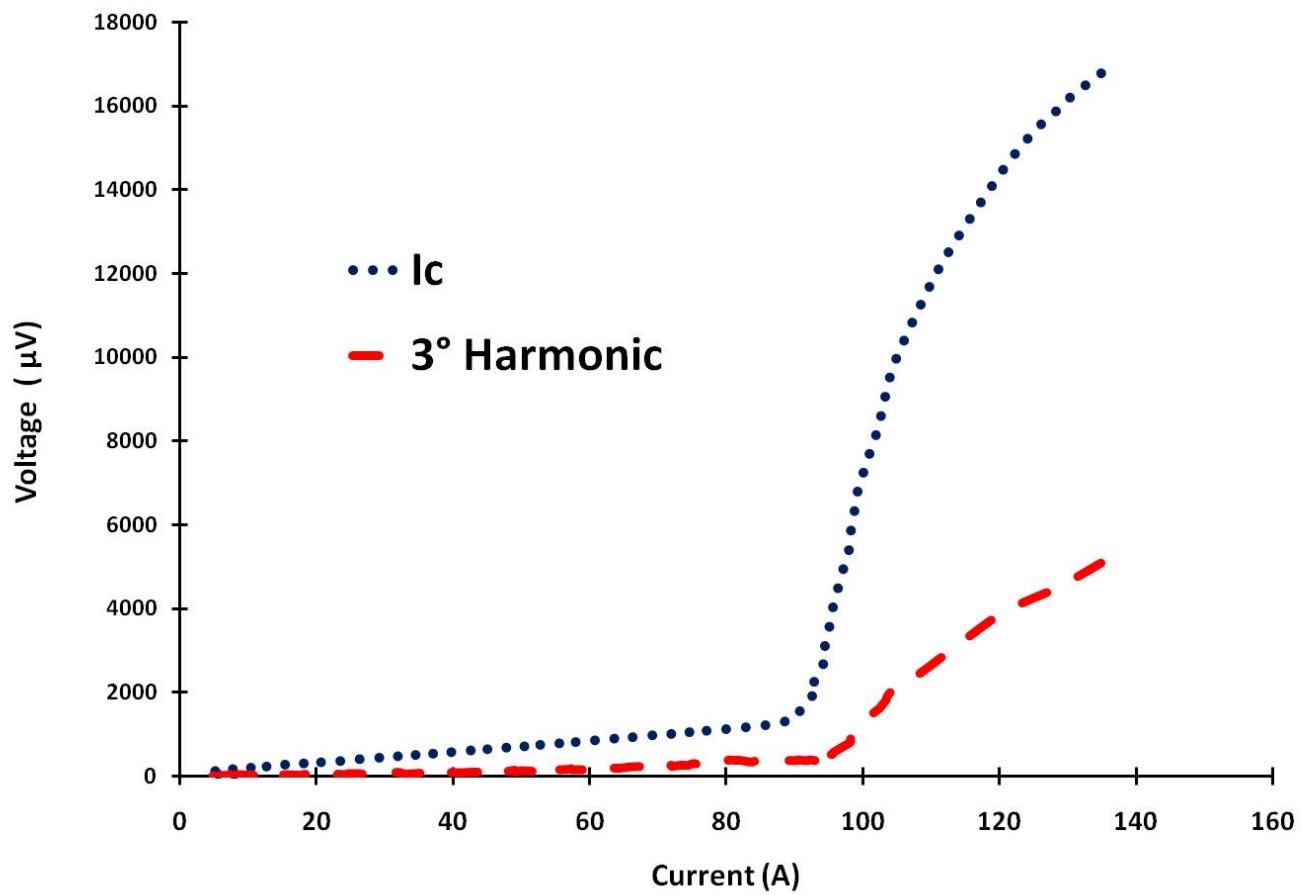
Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México

Evolución del 3º Armónico respecto a la I_c



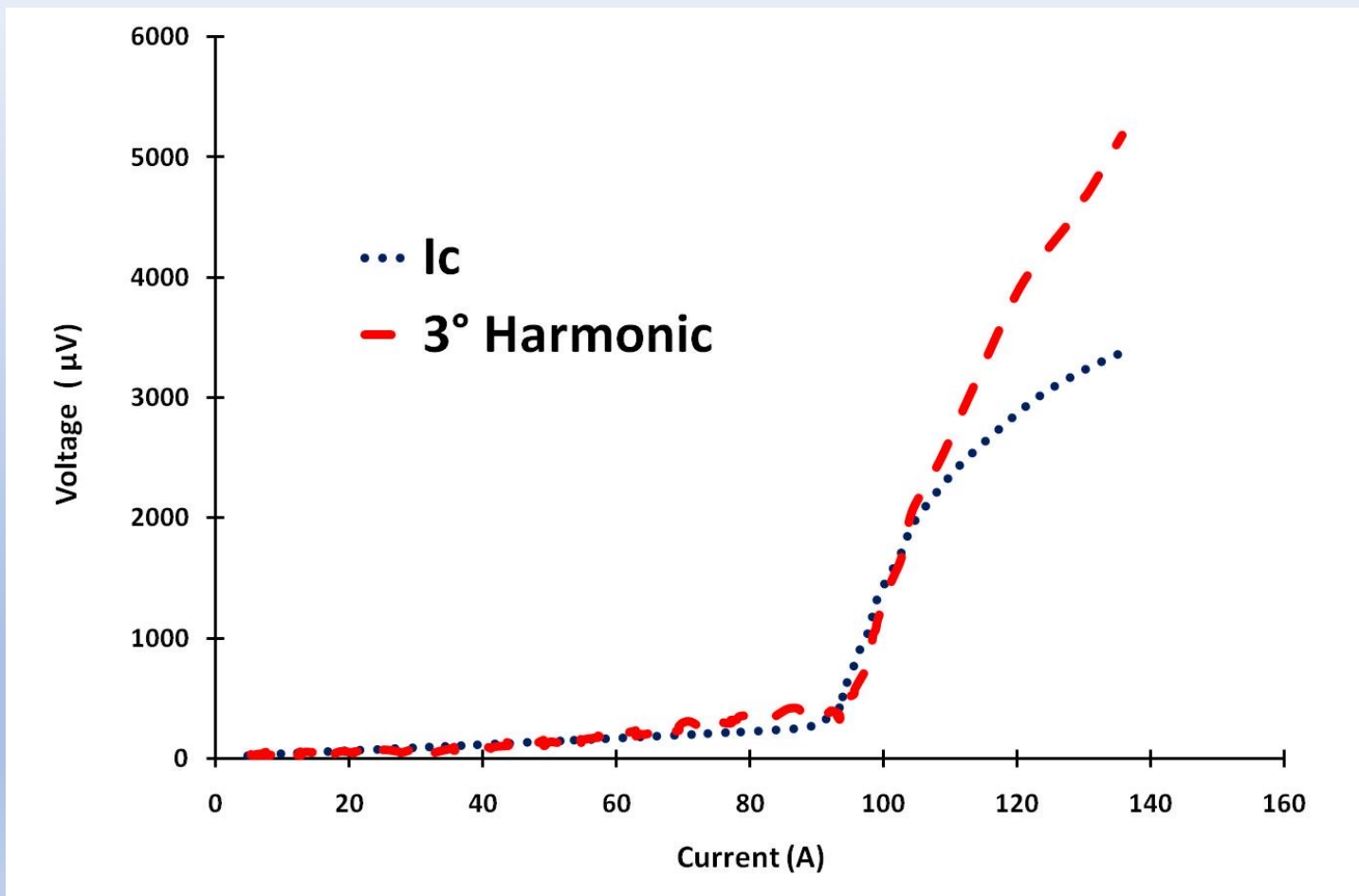
5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México



5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México

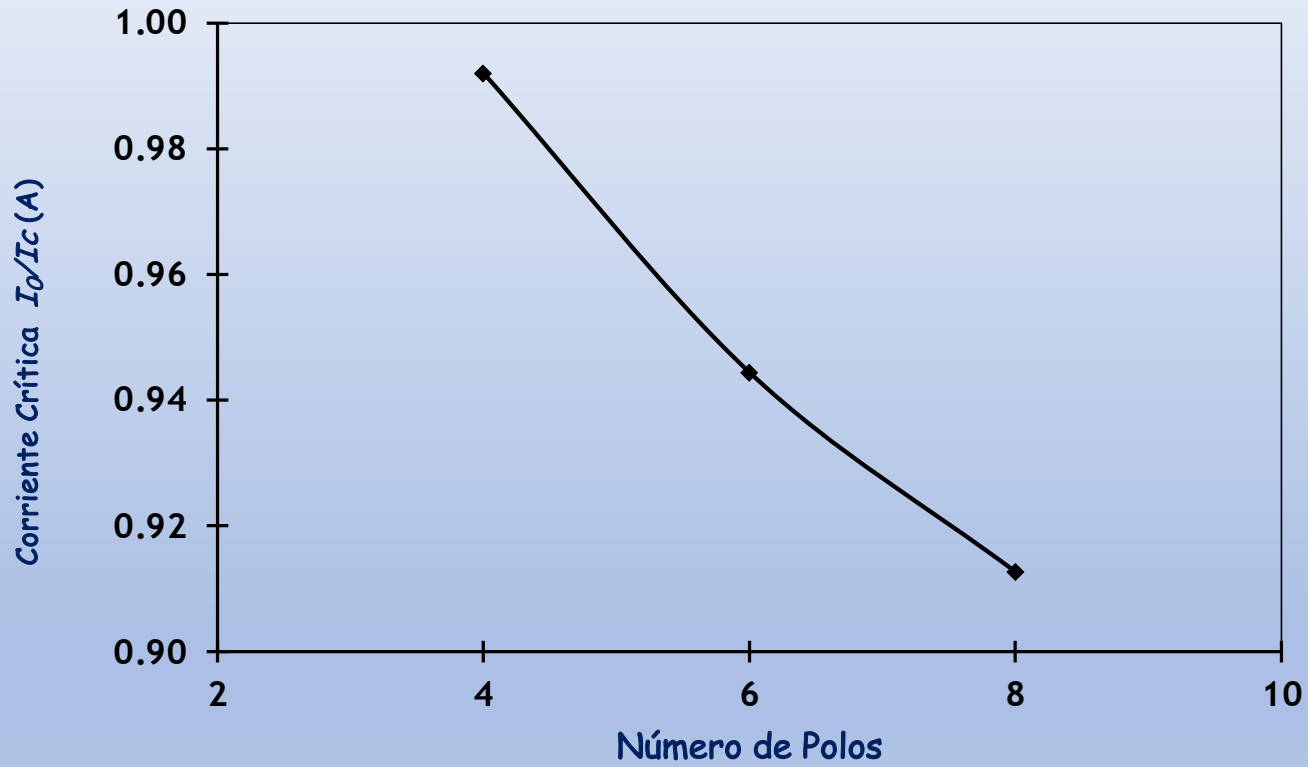


5^a

Escuela de
SUPERCONDUCTIVIDAD
Desde la Ciudad de México



Disminución de la Corriente Crítica en función del número de polos en el estator



5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Bibliografía

1. H. Yamasaki, Y. Mawatari and Y. Nakagawa, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 15, no. 2 June 2005, pp. 3636-3639.
2. H. Yamasaki, Y. Mawatari. Y. Nakagawa and H. Yamada, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 13, no. 2, June 2003, pp. 3718-3721.
3. J. H. Claassen, M.E. Reeves and R.J. Soulen, *Rev. Sci. Instrument.*, 62 (4) April 1991. pp. 996-1004.
4. H. Yamada, *et al*, *Physica C*, 433 (2005) pp. 59-64.
5. W. A. Cavagnino, *et al*, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol 38, no. 6, April 2002, pp. 1517-1524.
6. C. Chan, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-2, 2, June 1987.
7. P. Campbell, *Proc. Inst. Elec. Eng.* Vol. 121, Dec 1974.
8. Y. Mawatari, H. Yamasaki and Y. Nakagawa, *Appl. Phys. Lett.* February 2008.

5^a

Escuela de

SUPERCONDUCTIVIDAD

Desde la Ciudad de México



Muchas gracias por su atención

gonzaleza@ugto.mx