



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA – SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN LIMITADOR DE CORRIENTE DE FALLA  
BASADO EN SUPERCONDUCTORES

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JOSÉ JUAN PÉREZ CHÁVEZ

TUTOR PRINCIPAL  
DR. FREDERIC TRILLAUD, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM  
COMITÉ TUTOR  
DR. RAFAEL ESCARELA PÉREZ, UAM-AZCAPOTZALCO  
DR. ADRIÁN GONZÁLEZ PARADA, UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO 2019

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Rafael Escarela Pérez  
Secretario: Dr. Luis Miguel Castro González  
Vocal: Dr. Frederic Trillaud  
1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Adrián González Parada  
2<sup>d o.</sup> Suplente: Dr. Daniel Guillén Aparicio

Lugar donde se realizó la tesis: Cd. Universitaria, UNAM, Ciudad de México.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Frederic Trillaud

-----  
**FIRMA**

# Agradecimientos

---

A mis padres, Juan y María, por todo el apoyo proporcionado.

A mi hermano, el Dr. Nicolás Pérez, por el gran apoyo incondicional que ha aportado en todos mis proyectos importantes.

A mis hermanas, Verónica y Juana.

Al Dr. Frederic Trillaud, por todo el apoyo proporcionado.

Al Dr. Alexander Polasek, por todo el apoyo proporcionado y por darme la oportunidad de realizar una estancia académica en el CEPTEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Brasil.

Al Dr. Rubens de Andrade Jr., por todo el apoyo proporcionado y por darme la oportunidad de realizar una estancia académica en el Laboratório de Aplicações de Supercondutores de la Universidad Federal de Río de Janeiro - LASUP, COPPE/UFRJ, Brasil.

Al Dr. Wesley Tiago Batista de Sousa, del Karlsruher Institut für Technologie KIT, por proporcionar las bases teóricas del modelo desarrollado en el presente trabajo.

Al Dr. Loïc Quéval, por todo el apoyo proporcionado, las aportaciones teóricas esenciales y el constante seguimiento en el presente trabajo.

Al Dr. Luis Miguel Castro González, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por las importantes aportaciones teóricas de Sistemas Eléctricos de Potencia en el presente trabajo.

---

Al Dr. Rafael Escarela, de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, al Dr. Adrián González, de la Universidad de Guanajuato, y al Dr. Daniel Guillén Aparicio, del Tecnológico de Monterrey, por formar parte de mi comité de evaluación.

Al Dr. Petr Dolgosheev y al CIDEAC, Centro de Investigación y Desarrollo CARSO, por todo el apoyo proporcionado y las aportaciones realizadas en el presente trabajo, en cuestiones prácticas de superconductividad y su aplicación en sistemas eléctricos de potencia, y por la oportunidad de realizar prácticas profesionales en uno de los centros de investigación más importantes de México y América Latina.

Al Ing. Javier Yáñez, por todo el apoyo proporcionado y la excelente capacitación en cuestiones prácticas de superconductividad, instrumentación y manufactura eléctrica.

A Fernando Dias, Rodrigo Dias, Micahel Martins, Felipe Dicler, Vina Guedes y Paulo Sergio, por todo su apoyo y su amistad.

A Tho Tran y Víctor Flores, por el apoyo proporcionado en los primeros modelos realizados en el presente trabajo.

Al CONACYT, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través del CVU 569094, por proporcionar el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado, CEP.

Al Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la UNAM.

A los fondos DGAPA-UNAM PAPIIT-2015 IA101915, PAPIIT-2017 TA100617 y PAPIIT-2019 IN107119.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por proporcionar los recursos técnicos necesarios para la realización del presente trabajo.

A los organizadores de EUCAS 2017 y al Consejo de Superconductividad del IEEE (IEEE-CSC), por proporcionar el apoyo necesario para presentar parte del trabajo de doctorado en EUCAS 2017, celebrado en Ginebra, Suiza.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por proveer los medios necesarios para la realización del presente trabajo y por otorgarme una excelente formación humana y científica a lo largo de mis años de estudio.

# Dedicatoria

---

Al Dr. Isaac Ortega, por el apoyo proporcionado y por ser una guía indispensable en esta etapa académica.

Al M. I. Alejandro Baez, por todo el apoyo y amistad.

A mis amigos de la preparatoria, Alejandro y Christopher, por todo el apoyo ofrecido durante estos años.

A mi amiga Lorena, por todo su apoyo y consejos.

Al Dr. Antonio Álvarez, por sus consejos y su amistad.

Al profesor Ángel García, por la gran amistad y apoyo ofrecido durante muchos años.

A mis amigos Tonatiuh y Oscar Almeida, que en paz descansen, cuyo ejemplo de dedicación, excelencia y servicio ha de ser recordado.

# Resumen

---

Este trabajo presenta el modelado y simulación de un Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo (LCF-R), el cual consiste en una bobina no inductiva, construida con cintas superconductoras comerciales de segunda generación (YBCO), la cual se sumerge en nitrógeno líquido ( $\text{LN}_2$ ) y se conecta en paralelo con una resistencia en derivación a temperatura ambiente.

El modelo termoeléctrico desarrollado describe el comportamiento eléctrico y térmico del LCF-R antes, durante y después de una falla en un sistema eléctrico de potencia, el cual es validado con los resultados experimentales y teóricos obtenidos de la literatura. El modelo se desarrolló en Matlab-Simulink<sup>®</sup>.

Se construyó un LCF-R, consistente en una bobina bifilar de geometría axial fabricada con cintas de YBCO con estabilizador de cobre, con el fin de realizar las pruebas de cortocircuito en corriente alterna y comparar los resultados obtenidos con los resultados del modelo desarrollado, obteniéndose buenos resultados.

Con el modelo validado experimentalmente, se analizó el impacto del LCF-R (uno por cada fase) en un sistema eléctrico de potencia trifásico sujeto a una falla trifásica, consistente en un generador síncrono conectado a la red eléctrica mediante un transformador elevador de voltaje y una línea de transmisión larga. La red eléctrica se modeló como un bus infinito.

Se analizó el impacto de los parámetros del LCF-R, como la longitud de las cintas superconductoras, el número de cintas en paralelo y el valor de la resistencia en derivación, en la respuesta del sistema ante una falla trifásica, hallándose que el ajuste de dichos parámetros determina una respuesta balanceada o no balanceada en los tres LCF-R, además de la estabilidad del generador, la limitación de corriente, el voltaje desarrollado en el LCF-R durante una falla y su tiempo de recuperación. Para el caso de estudio seleccionado, el LCF-R incrementó la estabilidad transitoria del generador síncrono.

# Abstract

---

This work presents the modeling and simulation of a resistive-Superconducting Fault Current Limiter (r-ScFCL), that consists of a non inductive coil made with commercial superconducting tapes of second generation (YBCO). The coil is immersed in liquid nitrogen ( $\text{LN}_2$ ) and is connected in paralel with a resistive shunt at room temperature.

A thermoelectric model describes the electrical and thermal behaviors of the r-ScFCL before, during and after a fault in an electric power system. The model was validated with experimental and theoretical results obtained from the literature. The model was built in Matlab-Simulink<sup>®</sup>.

A r-ScFCL model was built, which consists of an axial bifilar coil made with copper-stabilized YBCO tapes. The AC short-circuit tests were done, which results were compared with the results obtained from the theoretical model, showing good agreements.

The theoretical model was used to analyse the impact of three r-ScFCL in a three-phase electric power system under a fault, which consists of a synchronous generator connected to the electric power grid with a power transformer and a long transmission line. The grid was modelled as an infinite bus.

The impact of the r-ScFCL parameters in the transient response of the system under a fault was analysed. Those parameters are the length of the HTS tapes, the number of tapes connected in parallel and the shunt resistance, which ajustement determines a balanced or an unbalanced response of the three r-SCFCL, besides the transient stability of the generator, the current limitation, the voltage of the ScFCL terminals under a fault and the r-ScFCL time recovery. For the study case, the r-ScFCL increased the transient stability of the generator.

# Contenido

---

<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XII</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Tipos de LCF superconductor . . . . .	2
1.2. Superconductores usados en la fabricación del LCF . . . . .	4
1.3. Modelo genérico del LCF-R . . . . .	5
1.4. Objetivo . . . . .	6
1.5. Justificación . . . . .	6
1.6. Planteamiento del problema . . . . .	7
1.7. Metodología . . . . .	8
1.8. Hipótesis generales . . . . .	9
1.9. Contribuciones de la tesis . . . . .	10
1.10. Organización de la tesis . . . . .	10
<b>2. Antecedentes</b>	<b>12</b>
2.1. Concepto básico del LCF-R . . . . .	12
2.2. Proyectos realizados del LCF-R . . . . .	13
2.3. Modelos del LCF-R . . . . .	15
2.4. Revisión de la literatura . . . . .	17
<b>3. Superconductividad</b>	<b>19</b>
3.1. Tipos de superconductores . . . . .	21
3.2. Curva característica de los SAT . . . . .	23
3.3. Descripción de las cintas SAT . . . . .	25

---

<b>4. Modelo teórico del LCF-R</b>	<b>26</b>
4.1. Diseño genérico del LCF-R . . . . .	26
4.2. Modelo termoeléctrico genérico . . . . .	28
4.2.1. Modelo eléctrico . . . . .	29
4.2.2. Modelo térmico . . . . .	34
<b>5. Validación del modelo genérico</b>	<b>40</b>
5.1. Validación del modelo genérico con resultados obtenidos de la literatura . .	40
5.2. Validación del modelo genérico con resultados experimentales . . . . .	44
5.2.1. Caracterización de las cintas superconductoras . . . . .	44
5.2.2. Construcción del LCF-R . . . . .	46
5.2.3. Mediciones en corriente directa . . . . .	47
5.2.4. Mediciones en corriente alterna . . . . .	48
5.2.5. Resultados de las pruebas con corriente directa . . . . .	50
5.2.6. Corriente alterna . . . . .	51
<b>6. Caso de estudio</b>	<b>54</b>
6.1. Caso de estudio: Modelo del sistema eléctrico de potencia . . . . .	54
6.2. Resultados y discusiones . . . . .	56
6.2.1. Limitación de la corriente de falla . . . . .	56
6.2.2. Evolución de la estabilidad transitoria del generador . . . . .	59
6.2.3. Respuesta eléctrica del LCF-R . . . . .	60
6.2.4. Respuesta térmica del LCF-R . . . . .	62
6.3. Impacto del tiempo de falla en la respuesta del LCF-R trifásico . . . . .	64
6.4. Estudio paramétrico . . . . .	71
6.4.1. Impacto de las curvas de enfriamiento . . . . .	71
6.4.2. Impacto del índice $n$ del superconductor . . . . .	73
<b>7. Conclusiones</b>	<b>75</b>
<b>A. Apéndice A</b>	<b>77</b>
<b>B. Apéndice B</b>	<b>78</b>
B.1. Resistividad eléctrica vs temperatura . . . . .	78
B.2. Capacidad calorífica específica vs temperatura . . . . .	79
B.3. Conductividad térmica vs temperatura . . . . .	80
<b>Bibliografía</b>	<b>82</b>

# Índice de figuras

---

1.1.	Limitadores de corriente de falla basados en superconductores: a) LCF-R. b) LCF-I. . . . .	3
2.1.	a) Resistencia en el superconductor con respecto a la corriente $i$ [33]. b) Efecto del LCF-R en la corriente de falla de un sistema eléctrico de potencia. . . . .	13
2.2.	a) Componentes del LCF-R fabricados con tubos de Bi-2212. b) Componente bifilar de LCF-R fabricado con cintas de YBCO. Cortesía Nexans [14, 35, 37, 41, 42]. . . . .	14
3.1.	Evolución cronológica de $T_c$ de los superconductores [53]. . . . .	19
3.2.	Diagrama que representa el efecto Meissner-Ochsenfeld en un material superconductor ante la presencia de un campo magnético con densidad $B$ . a) $B < B_c$ . b) $B > B_c$ . . . . .	20
3.3.	Superficie crítica de un superconductor. . . . .	21
3.4.	Diagrama magnético para superconductores: a) Tipo I. b) Tipo II. . . . .	22
3.5.	a) Estado mixto de un superconductor tipo II. b) Circulación de corriente en un superconductor tipo II en estado mixto. . . . .	22
3.6.	a) Método de cuatro puntos para caracterizar una muestra de superconductor. b) Curva característica del superconductor a diferentes temperaturas. . . . .	23
3.7.	Curva característica del SAT tipo II, en escala logarítmica. . . . .	24
3.8.	Detalle de la cinta de Bi-2223 [65]. . . . .	25
3.9.	Capas que componen a las cintas SAT G2. a) Cinta SF12100. b) Cinta SCN04150 [66, 67]. . . . .	25
4.1.	Diagrama de conexiones entre el LCF-R y la resistencia de derivación externa. . . . .	26
4.2.	Diseño genérico de un módulo del LCF-R. a) Bobina bifilar. b) Módulo del LCF-R, el cual consiste en dos bobinas bifilares conectadas en serie. . . . .	27

4.3.	a) Bobina bifilar plana. b) Corte transversal de la bobina bifilar, donde se indica la dirección de la corriente. El símbolo $\odot$ indica corriente saliente con respecto a la página, mientras que $\otimes$ indica una corriente entrante. $d$ indica la separación entre cada cinta en el arreglo bifilar. . . . .	31
4.4.	Pérdidas en corriente alterna para arreglos de bobinas bifilares: a) Comparación entre valores experimentales y simulados, con $d = 3$ mm [42]. b) Considerando diferentes separaciones entre las cintas [41]. . . . .	31
4.5.	Disposición de las capas que conforman a la cinta superconductora, donde: Aislamiento ( $Ais$ ), Plata ( $Ag$ ), Superconductor ( $Sc$ ) y Hastelloy <sup>®</sup> ( $HS$ ). Los subíndices $s$ e $i$ son para distinguir las capas superior e inferior de la cinta, respectivamente. . . . .	35
4.6.	Diagramas que representan el intercambio de calor entre: a) La frontera de la última capa de la cinta y el LN <sub>2</sub> . b) Entre las capas adyacentes de la cinta. . . . .	35
4.7.	Modelo térmico de una capa de la cinta. . . . .	37
4.8.	a) Evolución del flujo de calor $q$ entre la superficie del aislamiento de la cinta a temperatura $T$ y el LN <sub>2</sub> circundante a $T_{ref} = 77$ K [60]. b) Comparación entre la potencia extraída por el LN <sub>2</sub> $q_e$ a $T_{ref} = 77$ K con las pérdidas en CA $p_{CA}$ en un metro de cinta superconductora SF12100. . . . .	39
5.1.	a) Componente del LCF-R analizado. b) Bobina bifilar de cintas G2 utilizada en el módulo del LCF-R analizado [22, 45]. . . . .	40
5.2.	Circuito de prueba del LCF-R para las pruebas realizadas en [22]. . . . .	41
5.3.	Validación del modelo genérico contra los datos experimentales y el modelo citado en la literatura para una corriente de falla pico de 5 kA [22]: a) Corrientes de falla con y sin LCF-R. b) Comparación entre las corrientes limitadas experimental y teórica (modelo genérico y de literatura). . . . .	42
5.4.	Validación del modelo genérico con una corriente de falla pico de 20 kA: a) Corrientes de falla con y sin LCF-R. b) Comparación entre las corrientes limitadas experimental y teórica (modelo genérico y [22]). . . . .	43
5.5.	Validación del modelo genérico con una corriente de falla pico de 30 kA: a) Corrientes de falla con y sin LCF-R. b) Comparación entre las corrientes limitadas experimental y teórica (modelo genérico y [22]). . . . .	43
5.6.	Detalle de las diferentes capas de la cinta G2: cobre superior $Cu_s$ , plata $Ag$ , superconductor $Sc$ , acero inoxidable $AI$ y cobre inferior $Cu_i$ . . . . .	44
5.7.	Caracterización de la muestra de cinta G2 SCN04150-01: a) Campo eléctrico vs corriente. b) Resistencia por metro vs corriente. . . . .	45
5.8.	Caracterización de las muestras de cinta G2 SCN04150-01 y SCN04150-02 con cinta adicional de cobre: a) Campo eléctrico vs corriente. b) Resistencia por metro vs corriente. . . . .	45
5.9.	a) Bobina bifilar. b) Arreglo de cintas y aislamiento en la bobina bifilar, donde: cobre $Cu$ , superconductor $Sc$ y alambre esmaltado $AE$ . . . . .	47

5.10. Diagrama eléctrico de la conexión de los sensores de voltaje del modelo del LCF-R (Cortesía CIDEDEC). . . . .	48
5.11. Diagrama eléctrico del circuito de pruebas para el LCF-R, donde $Z$ es la impedancia en % de cada transformador (Cortesía CIDEDEC). . . . .	49
5.12. Esquema de apertura y cierre de los interruptores del circuito de prueba. . . . .	51
5.13. Comparación entre las corrientes de cortocircuito con y sin LCF-R, obtenidas del experimento realizado y del modelo genérico. . . . .	52
6.1. Sistema trifásico de prueba considerando un LCF-R. . . . .	54
6.2. Corrientes para la fase “a”, con y sin LCF-R, para los casos optimizado y no optimizado con el LCF-R: a) Corriente instantánea. b) Corriente RMS. . . . .	57
6.3. Distribución de la corriente total RMS en la fase “a” del LCF-R, a través de las diferentes capas de materiales que conforman a la cinta superconductora ( $N_{tp}I_k$ , donde $k$ se refiere a las distintas capas de la cinta) y la resistencia de derivación. . . . .	58
6.4. Velocidad del rotor $\omega$ en pu, con y sin LCF-R. . . . .	59
6.5. Voltaje RMS a través de las terminales del LCF-R. . . . .	60
6.6. Resistencia por fase del LCF-R como función del tiempo: a) Para el LCF-R1. b) Para el LCF-R2. . . . .	61
6.7. Temperatura en una capa superconductora por fase: a) En el LCF-R1. b) En el LCF-R2. . . . .	62
6.8. a) Potencias de disipación y de enfriamiento para una cinta de la fase “a” del LCF-R1. b) Comparación entre las potencias de enfriamiento para una cinta de la fase “a” del LCF-R1 y el LCF-R2. Se utilizó la curva de enfriamiento presentada en la Fig. 4.8(a). . . . .	64
6.9. Velocidad del rotor $\omega$ en pu para el sistema eléctrico con el LCF-R conectado, considerando diferentes tiempos de falla $t_f$ . . . . .	65
6.10. Corrientes obtenidas con diferentes tiempos de falla en cada una de las fases del sistema estudiado: a) Para $t_{f1}$ , sin LCF-R. b) Para $t_{f1}$ , con LCF-R. c) Para $t_{f2}$ , sin LCF-R. d) Para $t_{f2}$ , con LCF-R. e) Para $t_{f3}$ , sin LCF-R. f) Para $t_{f3}$ , con LCF-R. . . . .	67
6.11. a), c) y e) Resistencias como función del tiempo de los LCF-R de cada una de las fases, considerando los tiempos de falla $t_{f1}$ , $t_{f2}$ y $t_{f3}$ . b), d) y f) Temperaturas como función del tiempo de las capas superconductoras de una de las cintas de los LCF-R de cada una de las fases, considerando los tiempos de falla $t_{f1}$ , $t_{f2}$ y $t_{f3}$ . . . . .	68
6.12. a) Corrientes de falla en cada una de las fases del sistema estudiado con $t_{f4}$ . b) Corrientes de falla limitadas. c) Resistencia como función del tiempo de los LCF-R de cada una de las fases. d) Temperatura como función del tiempo de las capas superconductoras de una de las cintas de los LCF-R de cada una de las fases. . . . .	70

6.13. Evolución del flujo de calor entre la superficie de la cinta a una temperatura $T$ y el nitrógeno líquido circundante a $T_{\text{ref}} = 77$ K [60, 106, 107]. . . . .	71
6.14. a) Resistencia del LCF-Ra como función del tiempo para las distintas curvas de enfriamiento y el caso adiabático. El tiempo de recuperación $t_r$ se mide a partir del tiempo de liberación de la falla hasta el tiempo de la completa recuperación del LCF-R. b) Temperatura de la capa superconductora de una de las cintas del LCF-Ra para cada uno de los casos de estudio. . . . .	72
6.15. Estudios paramétricos realizados con diferentes valores del índice $n$ . a) Resistencia RMS del LCF-Ra como función de la corriente RMS $I_{a, \text{RMS}}$ . b) Temperatura RMS del LCF-Ra como función de la corriente RMS $I_{a, \text{RMS}}$ . Las flechas indican la evolución de la resistencia y de la temperatura de la capa superconductora con el tiempo durante y después de la falla. . . . .	73
B.1. Resistividad eléctrica $\rho$ vs temperatura $T$ de los materiales que conforman las capas de la cinta de YBCO. . . . .	79
B.2. Capacidad calorífica específica $\zeta$ como función de la temperatura $T$ de los materiales de la cinta de YBCO. . . . .	80
B.3. Conductividad térmica $k$ como función de la temperatura $T$ de los materiales de las capas de la cinta de YBCO. . . . .	81

## Índice de tablas

---

2.1.	Proyectos internacionales realizados con el LCF-R [9, 39]. . . . .	14
2.2.	Modelos de LCF-R. . . . .	15
4.1.	Características de la cinta G2 sin estabilizador de cobre (SF12100) [70, 71].	28
4.2.	Pérdidas en corriente alterna, con $d = 3$ mm y considerando diferentes corrientes, a partir de los datos obtenidos de la Fig. 4.4(b). . . . .	32
4.3.	Equivalencia entre elementos eléctricos y térmicos. . . . .	36
5.1.	Parámetros del circuito de prueba para obtener las corrientes de cortocircuito presentadas en [22]. . . . .	41
5.2.	Parámetros utilizados en la validación del modelo genérico con los datos experimentales y el modelo citado en [22]. . . . .	42
5.3.	Valores máximos de operación obtenidos con la caracterización en CD de las muestras de cintas G2 con estabilizador adicional de cobre. . . . .	46
5.4.	Resultados principales de la caracterización del LCF-R con corriente directa.	50
5.5.	Resultados principales de las pruebas de falla realizadas con el LCF-R. . .	53
6.1.	Parámetros del sistema eléctrico analizado ( $f = 60$ Hz, con impedancias base de $0.1904 \Omega$ y $250 \Omega$ para los lados de baja y alta tensión del transformador, LV y HV respectivamente) [99]. . . . .	55
6.2.	Especificaciones para el LCF-R1 y el LCF-R2. Los parámetros de la cinta superconductora utilizada se dan en la Tabla 4.1. . . . .	56
6.3.	Valores máximos de corriente de falla RMS, voltaje de falla RMS en las terminales del LCF-R y temperatura en el LCF-R, además del tiempo de recuperación por fase para el sistema estudiado. . . . .	57
B.1.	Densidades de los materiales de las cinta de YBCO. . . . .	78

# Nomenclatura

---

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
LCF	Limitador de Corriente de Falla Superconductor.
LCF-R	LCF resistivo.
LCF-I	LCF inductivo.
LCF-NB	LCF de núcleo blindado.
LCF-NA	LCF de núcleo de aire.
LCF-R1	Diseño balanceado del LCF-R.
LCF-R2	Diseño no balanceado del LCF-R.
r-ScFCL	Resistive-Superconducting Fault Current Limiter.
Sc	Superconductor.
SAT	Superconductor de Alta Temperatura Crítica.
SBT	Superconductor de Baja Temperatura Crítica.
G1	Cintas superconductoras de primera generación.
G2	Cintas superconductoras de segunda generación.
$V - I$	Curva característica de voltaje-corriente del superconductor.
$R - I$	Curva característica de resistencia eléctrica-corriente del superconductor.
LN <sub>2</sub>	Nitrógeno líquido.
CC	Curva de enfriamiento con LN <sub>2</sub> .
®	Marca registrada.
MEF	Método de elemento finito.
CIDEC	Centro de Investigación y Desarrollo CARSO.
$\nabla$	Operador nabra.
$\partial$	Derivada parcial.
$x, y, z$	Ejes del sistema cartesiano de coordenadas.
$a, n$	Superíndices para indicar los valores obtenidos del paso iterativo anterior y actual en un método numérico iterativo.
$s, i$	Subíndices para designar capas superior e inferior, respectivamente.

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
SF12100	Cinta comercial G2 sin estabilizador de cobre de Superpower <sup>®</sup> .
SCN04150	Cinta comercial G2 con estabilizador de cobre de SuNAM <sup>®</sup> .
NbTi	Aleación de Niobio-Titanio.
Nb <sub>3</sub> Sn	Aleación de Niobio-Estaño.
BiSCCO	Compuesto cerámico de Bismuto-Estroncio-Calcio-Cobre-Óxido.
BiSCCO-2223	Compuesto cerámico de Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10+x</sub> .
BiSCCO-2212	Compuesto cerámico de Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>8+x</sub> .
YBCO	Compuesto cerámico de YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> (Ytrio-Bismuto-Cobre-Óxido), también conocido como (RE)BCO.
MgB <sub>2</sub>	Compuesto de dibórido de magnesio.
Cu	Cobre.
Ag	Plata.
AI	Acero inoxidable.
Ais	Aislamiento.
Kp	Kapton <sup>®</sup> .
AE	Alambre esmaltado.
Hs	Hastelloy <sup>®</sup> .
BI	Bus infinito.
MS	Generador síncrono.
TF	Transformador.
LT	Línea de transmisión.
Δ/Yg	Conexión delta-estrella de un transformador eléctrico trifásico.
PSS	Estabilizador de potencia del generador.
“a”, “b”, “c”	Fases de un sistema eléctrico de potencia.
LV	Baja tensión.
HV	Alta tensión.
CPU	Unidad central de proceso.
sw	Interruptor.
K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub>	Contactores magnéticos.
RL <sub>1</sub> , RL <sub>2</sub>	Relevadores electrónicos de estado sólido.
CA	Corriente Alterna.
CD	Corriente Directa.
NI-9472	Módulo de salida digital.
NI-9205	Módulo de adquisición de datos.
NI-cDAQ-9172	Chasis de módulos diversos.

<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>
$V$	[V]	Voltaje.
$I$	[A]	Corriente.
$R$	[ $\Omega$ ]	Resistencia eléctrica.
$G$	[ $\Omega^{-1}$ ]	Conductancia eléctrica.
$\rho$	[ $\Omega$ m]	Resistividad eléctrica de un material.
$L$	[H]	Inductancia.
$T$	[K]	Temperatura.
$B$	[T]	Densidad de flujo magnético.
$H$	[A/m]	Intensidad de campo magnético.
$t$	[s]	Tiempo.
$F$	[N]	Fuerza de Lorentz.
$\Phi$	[W]	Flujo de calor.
$R^{th}$	[K/W]	Resistencia térmica de un material.
$G^{th}$	[W/K]	Conductancia térmica de un material.
$\Delta T$	[K]	Diferencia de temperatura entre dos nodos.
$k$	[W/(mK)]	Conductividad térmica de un material.
$\varsigma$	[J/(kgK)]	Capacidad calorífica específica de un material.
$Q$	[W]	Potencia disipada.
$q$	[W/m <sup>2</sup> ]	Flujo de calor entre la superficie de una cinta y el LN <sub>2</sub> .
$\Phi_{i,j}$	[W]	Flujo de calor entre los nodos adyacentes $i$ y $j$ .
$\Phi_{i,i}$	[W]	Calor interno generado en un nodo $i$ .
$\mathcal{V}$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen.
$\gamma$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad de un material.
$C_{th}$	[J/K]	Capacidad térmica de un material.
$\Delta t$	[s]	Paso de tiempo.
$\mathbf{T}$	[K]	Vector de temperaturas.
$\mathbf{Q}$	[W]	Vector del calor disipado en las capas que conforman a la cinta.
$\mathbf{T}_{ref}$	[K]	Vector de la temperatura en la frontera de la cinta.
$\mathbf{C}^a$	[J/K]	Matriz diagonal de capacidades caloríficas dependiente de la temperatura.
$\mathbf{G}_b^a$	[W/K]	Vector de conductancias térmicas en la frontera de la cinta.
$\mathbf{G}^a$	[W/K]	Matriz de conductancias térmicas.
$t_0$	[s]	Tiempo en el que ocurre la falla.
$t_r$	[s]	Tiempo de recuperación del LCF-R.
$t_f$	[s]	Tiempo de falla.
$\Delta t_f$	[s]	Tiempo de duración de la falla.

Símbolo	Unidades	Descripción
$V_{sc}$	[V]	Voltaje en el superconductor.
$i_{sc}$	[A]	Corriente que fluye por el superconductor.
$R_{sc}$	[ $\Omega$ ]	Resistencia total del superconductor.
$E_{sc}$	[V/m]	Campo eléctrico en el superconductor.
$J_{sc}$	[A/m <sup>2</sup> ]	Densidad de corriente del superconductor.
$T_{sc}$	[K]	Temperatura del superconductor.
$E_c$	[V/m]	Campo eléctrico crítico, igual a 1 $\mu$ V/cm.
$V_c$	[V]	Voltaje crítico en el superconductor ( $V_c = E_c l_{tp}$ ).
$I_c$	[A]	Corriente crítica del superconductor.
$T_c$	[K]	Temperatura crítica del superconductor.
$B_c$	[T]	Densidad de campo magnético crítica.
$H_c$	[A/m]	Intensidad de campo magnético crítica.
$J_c$	[A/m <sup>2</sup> ]	Densidad de corriente crítica del superconductor.
$n$		Índice $n$ del superconductor.
$T_{ref}$	[K]	Temperatura de referencia = 77 K.
$I_{c0}$	[A]	Corriente crítica con campo propio de la cinta a $T_{ref}$ .
$n_0$		Índice $n$ a la temperatura de referencia $T_{ref} = 77$ K.
$F_p$	[N]	Fuerza de sujeción del superconductor (pinning = sujeción).
SF	[T]	Campo magnético propio de la cinta (Self field).
$l_{tp}$	[m]	Longitud total de la cinta superconductora.
$th$	[m]	Espesor de una capa de la cinta superconductora.
$r_m$	[m]	Radio mínimo de curvatura de la cinta superconductora.
$w$	[m]	Ancho de la cinta superconductora.
$A_k$	[m <sup>2</sup> ]	Área de la sección transversal de una capa $k$ de la cinta superconductora.
$r_p$	[m]	Radio mínimo de los bloques de una bobina superconductora.
$N_{tp}$		Número de cintas conectadas en paralelo en una bobina.
$N_c$		Número de bobinas conectadas en serie en un LCF-R.
$V_{max}$	[V]	Voltaje máximo.
$I_{max}$	[A]	Corriente máxima.
$R_{max}$	[ $\Omega$ /m]	Resistencia máxima por metro de cinta superconductora.
$E_{max}$	[V/m]	Voltaje máximo por metro de cinta superconductora.
$I_{RMS,max}$	[A]	Corriente máxima de falla RMS.

<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>
$R_n$	$[\Omega]$	Resistencia nominal o máxima del LCF-R.
$R_j$	$[\Omega]$	Resistencia debida a las uniones soldadas entre las cintas y las terminales.
$R_{sc0}$	$[\Omega]$	Resistencia del superconductor ideal.
$R_{sj}$	$[\Omega]$	Resistencia de una unión soldada.
$R_{sh}$	$[\Omega]$	Resistencia de derivación.
$R_m$	$[\Omega]$	Resistencia equivalente de la matriz metálica de una cinta.
$i$	$[A]$	Corriente.
$I_n$	$[A]$	Corriente nominal del sistema eléctrico de potencia.
$I_p$	$[A]$	Corriente pico.
$I_{fp}$	$[A]$	Corriente de falla pico.
$i_t$	$[A]$	Corriente total.
$i_d$	$[A]$	Corriente de disparo.
$R_{LCF}$	$[\Omega]$	Resistencia equivalente del LCF-R.
$R_{LCF, RMS}$	$[\Omega]$	Resistencia equivalente RMS del LCF-R.
$i_{sh}$	$[A]$	Corriente a través de la resistencia de derivación.
$i_{LCF}$	$[A]$	Corriente que circula a través del LCF-R.
$i_m$	$[A]$	Corriente en la matriz metálica de una sola cinta.
$V_m$	$[V]$	Voltaje en la matriz metálica.
$\tau$	$[s]$	Constante de tiempo del LCF.
$V_{RMS,max}$	$[V]$	Voltaje RMS en las terminales del LCF-R.
$V_s$	$[V]$	Voltaje de la fuente de prueba.
$V_{BI}$	$[kV]$	Voltaje nominal línea a línea del Bus Infinito.
SIL	$[W]$	Límite de cargabilidad de la línea por impedancia (SIL = Surge Impedance Loading).
$f$	$[Hz]$	Frecuencia eléctrica.
$c$	$[s]$	Ciclo eléctrico ( $c = 0.0167$ s).
$Z_b$	$[\Omega]$	Impedancia base.
$\omega$	$[rad/s]$	Velocidad angular del rotor.
$\omega_0$	$[rad/s]$	Velocidad síncrona del sistema.
$\Delta\omega$	$[rad/s]$	Diferencia entre la velocidad angular del rotor $\omega$ y $\omega_0$ .
$\omega/\omega_0$		Velocidad del rotor normalizada.
fp		Factor de potencia.
$S_G$	$[GVA]$	Potencia nominal del generador.
$V_G$	$[kV]$	Voltaje nominal RMS del generador (línea a línea).
$p$		Número de pares de polos del generador.
$H$	$[s]$	Constante de inercia de la máquina síncrona.

<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>
$i_a, i_b, i_c$	[A]	Corrientes de las fases de un sistema eléctrico de potencia.
$i_{a, RMS}, i_{b, RMS}, i_{c, RMS}$	[A]	Corrientes RMS por fase.
$V_{a, RMS}, V_{b, RMS}, V_{c, RMS}$	[V]	Voltajes RMS en las terminales del LCF-R por fase.
$P_m$	[MW]	Potencia mecánica.
$P_e$	[MW]	Potencia eléctrica entregada por la máquina síncrona al sistema.
$X_d, X'_d, X''_d$	[p.u.]	Reactancias síncrona, transitoria y subtransitoria del eje directo del generador síncrono.
$X_q, X''_q, X_l$	[p.u.]	Reactancias síncrona, transitoria y subtransitoria del eje en cuadratura del generador síncrono.
$T'_d, T''_d, T''_{qo}$	[s]	Constantes de tiempo de la máquina síncrona.
CNT	[GVA]	Capacidad nominal del transformador.
$Z_L$	[ $\Omega$ ]	Impedancia de la línea de transmisión.
$R_0$	[p.u.]	Resistencia positiva de secuencia cero.
$X_{L,0}$	[p.u.]	Reactancia inductiva positiva de secuencia cero.
$X_{C,0}$	[p.u.]	Reactancia capacitiva positiva de secuencia cero.
$\eta$	[%]	Eficiencia.
$Z_{cc}$	[%]	Impedancia de cortocircuito.

---

## Capítulo 1

# Introducción

---

El aumento constante de la demanda de energía en el sistema eléctrico ha ocasionado el incremento en los niveles de corriente de falla en las distintas secciones del sistema, lo cual ha provocado daños severos en la red eléctrica, incapacidad de acción de los interruptores de las subestaciones, inestabilidad en los generadores de la red y pérdidas económicas considerables [1, 2, 3]. Por lo tanto, para asegurar la confiabilidad en el sistema eléctrico, es necesario resolver los problemas provocados por las fallas y garantizar la continuidad del suministro eléctrico [4]. Actualmente, se tienen varios métodos para limitar el impacto de las corrientes de falla, pero ninguno de ellos es totalmente satisfactorio, como los que se presentan a continuación [5, 6]:

- **Sobre-dimensionamiento.** Constituye una de las estrategias más sencillas y efectivas, con la construcción de subestaciones con mayor capacidad de cortocircuito y el reemplazo de los interruptores por otros de mayor capacidad interruptora, lo que implica un aumento considerable en el costo de las instalaciones.
- **Fusibles limitadores de corriente.** Interrumpen la corriente de falla de manera casi instantánea, con la desventaja de tener que ser sustituidos manualmente una vez que la falla ha sido liberada, lo que afecta la continuidad del servicio eléctrico.
- **Reactores limitadores de corriente y transformadores de alta impedancia.** Aumentan la impedancia de la red donde son instalados, con lo que reducen las corrientes de falla, aunque, reducen la transferencia de potencia durante la operación normal de un sistema eléctrico y provocan caídas de voltaje no deseables, lo que repercute en la calidad del suministro eléctrico.
- **Limitadores de corriente de falla de estado sólido.** Son dispositivos constituidos de semiconductores, inductores y capacitores, que introducen impedancia en la línea donde son conectados cuando se presenta un cortocircuito, con la capacidad de interrumpir una corriente de falla. Tienen las desventajas de introducir armónicas en la red, provocar caídas de voltaje no deseables, necesitan circuitos externos para operar y pueden presentar pérdidas eléctricas considerables y sobrecalentamiento.

El Limitador de Corriente de Falla Superconductor (LCF) es un dispositivo pasivo construido con materiales superconductores, que ofrece una solución prometedora a los problemas causados por el cortocircuito con respecto a otros equipos, ya que podría actuar como un interruptor automático ante una falla que no necesita de la intervención humana y que requiere de poco mantenimiento [7, 8, 9]. El LCF se conecta en serie con una línea eléctrica y reduce la magnitud de las corrientes de falla a través del rápido cambio del estado superconductor del material cuando la corriente, temperatura o campo magnético se encuentran por encima de un valor crítico [10, 11].

El LCF aprovecha las características de los superconductores, que presentan ausencia de resistencia debajo de una cierta corriente llamada corriente crítica y una resistencia grande, más allá de la resistencia del cobre, por encima de la corriente crítica. Este cambio de estado permite gastar el exceso de energía contenida en la falla, limitando la corriente a valores tolerables por los equipos conectados en la red eléctrica. La transición del superconductor entre los dos estados mencionados es conocida como efecto avalancha (“quench” en inglés), por su rapidez y su efecto dramático (ocurriendo en tiempos cortos) [10, 12].

En condiciones normales de operación, la corriente fluye a través del LCF con una resistencia casi cero, por lo que las pérdidas son despreciables. En caso de que ocurra una falla, el LCF presenta un gran aumento de resistencia eléctrica, con lo que se reduce la magnitud de la corriente [11]. La resistencia del LCF vuelve a ser despreciable cuando la falla es liberada después de un cierto tiempo llamado tiempo de recuperación, el cual depende de la magnitud, la duración de la falla y del diseño del limitador.

## 1.1. Tipos de LCF superconductor

Se tienen diversos diseños y prototipos de LCF superconductor, dentro de los cuales destacan los siguientes [9, 10, 13, 14]:

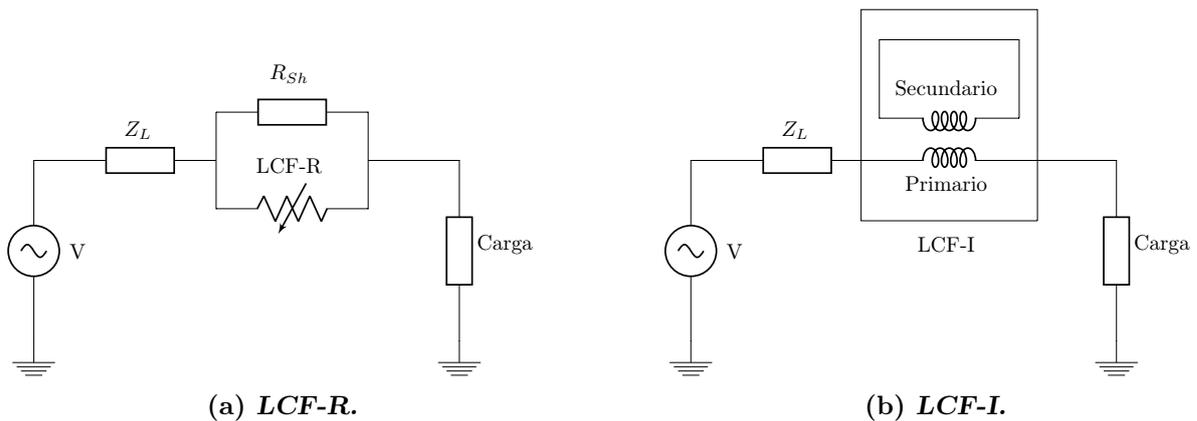
- LCF resistivo (LCF-R): Consiste en módulos conectados en serie conformados por una bobina bifilar no inductiva fabricada con cintas, o tubos superconductores, los cuales presentan una resistencia casi nula con corriente nominal de operación y una resistencia elevada cuando se tiene una corriente de falla, con la desventaja de tener un tiempo de recuperación de varios segundos después de que la falla ha sido liberada, debido al calentamiento del material por su alta resistencia en estado normal [10].

Con el fin de reducir el tiempo de recuperación, es necesario conectar el LCF-R con una resistencia de derivación en paralelo  $R_{Sh}$ , como se muestra en la Fig. 1.1(a), la cual ofrece un camino extra para la corriente de falla. En la Fig. 1.1(a) se tiene una fuente de voltaje  $V$  conectada a una línea con impedancia  $Z_L$ , la cual alimenta a

una carga. El circuito es protegido con un LCF-R y una resistencia de derivación conectada en paralelo [9].

- LCF inductivo (LCF-I): Consiste en un transformador con el devanado primario de cobre conectado en serie con la línea, mientras que el devanado secundario es de material superconductor y está cortocircuitado, lo que genera grandes corrientes inducidas que reducen el flujo magnético neto y la reactancia inductiva del limitador en condiciones normales de operación.

Cuando se presenta una corriente de falla, el devanado secundario deja su estado superconductor y su resistencia aumenta considerablemente, junto con la reactancia del limitador. Dentro de los limitadores inductivos, se tiene el limitador de núcleo blindado o LCF-NB, con núcleo de acero al silicio, y el LCF de núcleo de aire o LCF-NA, cuya ventaja consiste en que ocupa menos espacio y materiales que el LCF-R [9, 15]. En la Fig. 1.1(b) se muestra el concepto del limitador inductivo [16].



**Fig. 1.1:** Limitadores de corriente de falla basados en superconductores: a) LCF-R. b) LCF-I.

En esta tesis se analiza un LCF-R, ya que es un equipo que no requiere de núcleo de acero y un crióstato especial, a diferencia del LCF-I. Además, el LCF-R tiene dimensiones reducidas y su impedancia es despreciable en condiciones normales de operación, a diferencia del LCF-I [9, 14].

## 1.2. Superconductores usados en la fabricación del LCF

Los primeros superconductores comerciales usados en la fabricación del LCF fueron superconductores de Baja Temperatura Crítica (SBT), como el NbTi y el Nb<sub>3</sub>Sn (Niobio-Titanio y Niobio-Estaño), los cuales requieren ser enfriados con temperaturas cercanas a los 5 K para mantener su estado superconductor, por lo que los costos de enfriamiento son muy elevados [10].

Actualmente existen materiales que mantienen su estado superconductor con una temperatura de operación entre 77 K y 90 K, la cual se obtiene con nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>)\*, que es un fluido industrial con excelentes propiedades aislantes y con bajo costo por litro [17]. Estos materiales son conocidos como Superconductores de Alta Temperatura (SAT) y presentan excelentes características para aplicaciones comerciales.

Existen dos tecnologías de SAT usados en la fabricación de diferentes diseños y prototipos de LCF-R, los SAT de primera y segunda generación (G1 y G2) [7, 9, 13]. Aunque existen bultos de SAT, el presente trabajo se enfoca en las cintas comerciales. Las cintas G1 contienen filamentos de BiSCCO (Bismuto-Estroncio-Calcio-Cobre-Óxido) inmersos en una matriz de plata y se tienen dos compuestos principales: el Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10+x</sub> (BiSCCO-2223) y el Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+x</sub> (BiSCCO-2212). Las cintas G2 están constituidas por capas delgadas de YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (Ytrio-Bismuto-Cobre-Óxido, conocido comúnmente como YBCO o (RE)BCO) y otros materiales conductores como el cobre, con el fin de que las cintas soporten la corriente cuando el superconductor pase a un estado resistivo [18]. En los últimos años se ha tenido preferencia por el (RE)BCO y el MgB<sub>2</sub> para construir prototipos de LCF-R [11, 19].

Las cintas de YBCO presentan características superiores a las cintas de BiSCCO, ya que tienen alta densidad de corriente, soportan campos magnéticos de alta intensidad, además de que presentan menos pérdidas eléctricas en régimen nominal, por lo que el YBCO es el material más prometedor para aplicaciones en la potencia eléctrica y desarrollo del LCF, mostrándose su desempeño en numerosos proyectos internacionales, aunque actualmente representa una tecnología en desarrollo. En la actualidad, el BiSCCO es el material superconductor más conocido y usado en aplicaciones de potencia eléctrica [20, 21].

---

\*La temperatura de equilibrio líquido-gas del nitrógeno a presión atmosférica es igual a 77.3 K.

### 1.3. Modelo genérico del LCF-R

Para este trabajo se emplea un modelo electrotérmico para describir el proceso de transferencia de calor entre cada una de las capas que conforman a las cintas SAT del LCF-R, en respuesta a una falla en un sistema eléctrico de potencia, el cual está inspirado en [15, 22, 23]. Con el modelo electrotérmico se tiene el acoplamiento entre las ecuaciones térmicas y eléctricas que describen el comportamiento de las cintas SAT empleadas en el LCF-R. El modelo del LCF fue desarrollado en Matlab-Simulink<sup>®</sup>, con el módulo Simscape. Se eligen cintas de YBCO para los estudios realizados con el LCF-R, debido a sus características superiores con respecto a otras tecnologías [20, 21].

Con el modelo empleado se tiene una descripción genérica del proceso de distribución de corriente en las cintas superconductoras durante la transición de estado normal al estado de falla en el sistema analizado [24]. El modelo emplea la ley clásica de potencia para relacionar el voltaje y la corriente en el superconductor, considerando la dependencia del índice  $n$  y la corriente crítica  $I_c$  del superconductor con respecto a la temperatura del mismo [25, 26, 27]. Lo anterior proporciona un mejor entendimiento de la dinámica que ocurre en el superconductor durante una falla y durante la lenta recuperación del estado superconductor de la cinta [24]. El modelo del LCF-R considera condiciones no adiabáticas con parámetros que dependen de la temperatura de cada elemento que conforma a la cinta (calor específico, conductividad térmica, etc.). El modelo es validado con resultados experimentales presentados en trabajos anteriores [22, 23].

El modelo electrotérmico se emplea para analizar la estabilidad transitoria de un generador síncrono sujeto a una falla trifásica, al cual se le conecta en serie un LCF-R en cada una de sus fases. El generador está conectado a la red eléctrica mediante un transformador elevador de voltaje y una línea de transmisión larga y la red está representada mediante un bus infinito. El LCF-R consiste en una bobina bifilar enfriada con LN<sub>2</sub>, fabricada de cintas SAT de YBCO sin estabilizador de cobre y aisladas, conectadas entre ellas en paralelo. La bobina se conecta en paralelo a una resistencia en derivación enfriada a temperatura ambiente. El LCF-R se conecta del lado de bajo voltaje, entre el generador y el transformador.

Los parámetros de diseño que definen el modelo del LCF-R son: el tipo de cinta SAT utilizada, la longitud de las cintas, el valor de la resistencia en derivación, el número de cintas conectadas en paralelo y el número de bobinas de LCF-R conectadas en serie, cuyo ajuste tiene por objetivo el garantizar la estabilidad del generador cuando se presenta una falla trifásica en sus terminales, además de la recuperación del superconductor una vez que la falla ha sido liberada [28, 29]. Se muestra que la elección correcta de los parámetros de diseño permite obtener una respuesta balanceada de los tres LCF-R que constituyen al LCF-R trifásico.

Se presentan los resultados de medición de voltaje-corriente ( $V - I$ ) y resistencia eléctrica-corriente ( $R - I$ ) en muestras de cintas de YBCO sumergidas en nitrógeno líquido, con el fin de obtener parámetros de diseño para modelos de LCF-R. Además, se realizaron pruebas en corriente alterna y directa de un modelo de LCF-R fabricado con cintas G2 con estabilizador de cobre. Los resultados de las pruebas se compararon con los resultados obtenidos con el modelo teórico, obteniéndose buenos resultados.

## 1.4. Objetivo

Desarrollar un modelo electrotérmico genérico de un Limitador de Corriente de Falla Resistivo (LCF-R) fabricado con cintas superconductoras de segunda generación (YBCO), con el propósito de obtener un modelo general que represente fielmente el comportamiento transitorio del LCF-R en condiciones normales de operación y de falla, que a su vez pueda ser validado mediante resultados experimentales.

Los objetivos particulares de la tesis son:

- Realizar la caracterización de cintas SAT de YBCO, con nitrógeno líquido y corriente directa, para obtener los datos preliminares de diseño del LCF-R.
- Construir un modelo físico de LCF-R con cintas SAT de segunda generación, para realizar pruebas posteriores.
- Realizar las pruebas de cortocircuito en corriente alterna del modelo del LCF-R construido, enfriado con nitrógeno líquido.
- Comparar los resultados experimentales de las pruebas de cortocircuito realizadas al LCF-R con los resultados obtenidos del modelo teórico.
- Aplicar el modelo realizado en un caso de estudio de sistemas eléctricos de potencia.

## 1.5. Justificación

El crecimiento de la demanda de energía eléctrica ha provocado un gran aumento en los niveles de corriente de cortocircuito, los cuales podrían provocar daños severos en una red eléctrica [1, 2, 3]. Además, el constante crecimiento de la generación distribuida (generación eólica, solar, etc.), ha incrementado los niveles de corriente de falla en las diferentes secciones de un sistema eléctrico [30].

El LCF-R representa una excelente alternativa para disminuir los daños causados por un cortocircuito, ya que limita una corriente de falla automáticamente, minimizando la intervención humana necesaria para el re-suministro de energía eléctrica con las fallas permanentes o de larga duración. El LCF-R permite disminuir el tamaño de los interruptores, ya que limita la corriente de falla a valores reducidos, con caídas de tensión reducidas en los buses de la red eléctrica durante una falla [31]. En caso de fallas de corta duración o transitorias, ninguna intervención externa es necesaria.

Debido a que el LCF-R presenta una resistencia casi nula en condiciones normales de operación, no genera pérdidas ni impacta en la transferencia de potencia. Cuando se presenta un cortocircuito, el LCF-R reduce eficientemente la corriente de falla, ya que su resistencia aumenta considerablemente en un tiempo menor a un ciclo de operación.

Entre los diferentes diseños que se tienen de LCF se elige el LCF-R, ya que es un equipo que no requiere de núcleo de acero y un crióstato especial, tiene dimensiones reducidas y su impedancia es despreciable en condiciones normales de operación, a diferencia de otros diseños de LCF [10]. Se elige la cinta SAT de YBCO porque presenta características superiores a las demás cintas SAT, ya que tiene alta densidad de corriente, soporta campos magnéticos intensos, presenta menos pérdidas eléctricas en régimen nominal y puede ser operada en LN<sub>2</sub>.

Por lo tanto, se requiere de un modelo genérico que describa el comportamiento transitorio del LCF-R, con el fin de verificar teóricamente diseños del LCF-R y realizar análisis de redes eléctricas, con el fin de conocer el impacto del LCF en el comportamiento transitorio de las redes ante una falla y en condiciones normales de operación.

## 1.6. Planteamiento del problema

Debido al constante crecimiento en la demanda de energía eléctrica y al aumento de la generación distribuida (generación solar, eólica, etc.), los niveles de corriente de cortocircuito en la red eléctrica han aumentado considerablemente, por lo que se requiere de una solución para mitigar los efectos dañinos provocados por tales corrientes. El LCF basado en superconductores es una alternativa excepcional para disminuir los daños provocados por las corrientes de cortocircuito, ya que reduce la corriente de falla automáticamente, debido a que su resistencia aumenta considerablemente cuando la corriente supera a un valor crítico en un tiempo menor a un ciclo de operación. El LCF presenta una resistencia casi nula en condiciones normales de operación, por lo que no genera pérdidas ni impacta en la transferencia de potencia en la red eléctrica.

El LCF minimiza la intervención humana necesaria para el re-suministro de energía eléctrica ante fallas permanentes o de larga duración, mientras que en el caso de fallas de corta duración o transitorias no requiere de intervención externa. El LCF-R es un equipo sin núcleo de acero, por lo que sus dimensiones son reducidas y no requiere de un crióstato especial, además de que su impedancia es despreciable en condiciones normales de operación, a diferencia de otros diseños de LCF [10]. La cinta SAT de YBCO es adecuada para el diseño del LCF-R, ya que presenta características superiores a las demás cintas SAT, como su alta densidad de corriente, soporta campos magnéticos intensos, presenta menos pérdidas eléctricas en régimen nominal y puede ser operada en LN<sub>2</sub>.

Se requiere definir un modelo electrotérmico confiable que represente el comportamiento transitorio del LCF-R ante una falla y en condiciones normales de operación, ya que es una tecnología de reciente ingreso en los sistemas eléctricos de potencia. El modelo propuesto debe aplicarse al análisis de sistemas eléctricos de potencia con LCF-R conectado y sujetos a condiciones de cortocircuito, con el fin de conocer el impacto del LCF-R en la reducción de los efectos negativos del cortocircuito en la red.

El modelo propuesto debe predecir de manera confiable el comportamiento del LCF-R con variaciones en sus parámetros de diseño para distintas condiciones de cortocircuito, como la longitud de la cinta superconductora a utilizar, el número de cintas conectadas en paralelo y el valor de la resistencia de derivación, con el fin de definir un diseño de LCF-R adecuado para una red eléctrica. Además, el modelo debe ser capaz de reproducir los resultados experimentales obtenidos de pruebas de cortocircuito aplicadas a un LCF-R, con el fin de verificar su validez.

## 1.7. Metodología

Para la realización del proyecto de doctorado, se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Constituir el marco teórico acerca del LCF-R, además de las características de las cintas de YBCO de diversos fabricantes y metodologías de modelado y diseño de LCF-R.
2. Realizar el modelado y simulación de redes eléctricas y obtener los parámetros de cortocircuito de las redes analizadas, con el fin de identificar los parámetros de la corriente de falla necesarios para el diseño del LCF-R.
3. Desarrollar un modelo teórico que represente el comportamiento eléctrico y térmico del LCF-R.

4. Comparar los resultados obtenidos con el modelo teórico del LCF-R con resultados experimentales, con el fin de corroborar la validez del modelo teórico y su posible aplicación para el análisis de modelos de sistemas eléctricos de potencia reales.
5. Fabricar una bobina experimental de cintas de YBCO con estabilizador de cobre y geometría axial y realizar las pruebas de cortocircuito correspondientes. Comparar los resultados experimentales obtenidos con los resultados obtenidos con el modelo teórico realizado.
6. Aplicar el modelo teórico desarrollado y validado en un caso de estudio de sistemas eléctricos de potencia, con el fin de analizar los efectos de la variación de los parámetros de diseño del LCF-R en un sistema eléctrico de potencia.
7. Reportar los resultados y las conclusiones de la investigación realizada en la tesis de doctorado.

## 1.8. Hipótesis generales

Las hipótesis planteadas en esta tesis se presentan a continuación:

- El LCF-R presenta una resistencia despreciable cuando la corriente es inferior a la corriente crítica del superconductor, por lo que presenta pérdidas y caídas de voltaje despreciables bajo condiciones normales de operación. Lo anterior ocurre siempre que la temperatura y la intensidad de campo magnético se mantengan por debajo de los valores críticos del superconductor.
- El LCF-R presenta un gran aumento en su resistencia en una fracción de ciclo de potencia a 60 Hz cuando la corriente que circula a través de sus terminales supera a la corriente crítica, por lo que limita la corriente de falla de manera automática, en un tiempo menor a un ciclo.
- Acoplar el modelo termoeléctrico del LCF-R con modelos de la red eléctrica permite predecir el comportamiento del LCF-R al interactuar con los sistemas eléctricos de potencia, con lo cual es posible definir un diseño adecuado del LCF-R con el cual se obtenga un comportamiento esperado en la red eléctrica ante una falla y en condiciones normales de operación.

## 1.9. Contribuciones de la tesis

Las contribuciones del presente trabajo son las siguientes:

1. Se presenta un modelo genérico basado en técnicas convencionales que describe el comportamiento eléctrico y térmico del LCF-R ante una falla en un sistema eléctrico de potencia y que describe de manera detallada la transición del estado superconductor al estado normal del LCF-R, la distribución de corriente en las cintas superconductoras que lo conforman y la resistencia en derivación, además del proceso de transferencia de calor dentro del dispositivo. Con lo anterior, se tiene un modelo confiable del LCF-R que puede ser acoplado a un sistema eléctrico de potencia, con el fin de definir el diseño del LCF-R que tenga un impacto positivo en el comportamiento transitorio del sistema eléctrico ante una falla.
2. Se presenta un diseño alternativo de LCF-R, que consiste en dos bobinas bifilares en forma de lemniscata, arregladas de tal manera que la inductancia remanente del dispositivo es cancelada. La resistencia en derivación se coloca al exterior del crióstato, con el fin de reducir el gasto de  $\text{LN}_2$ , además de facilitar el cambio de la resistencia afuera del crióstato.

## 1.10. Organización de la tesis

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presenta la introducción, el objetivo de la tesis, la justificación del proyecto, el planteamiento del problema, la metodología empleada, las hipótesis planteadas, las contribuciones aportadas en el presente trabajo y la organización de la tesis.

En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes sobre los trabajos de investigación y proyectos realizados sobre LCF-R y modelos desarrollados.

En el Capítulo 3 se presenta una breve historia del desarrollo de la superconductividad a lo largo del tiempo y la teoría de la superconductividad implicada en el desarrollo del LCF.

En el Capítulo 4 se presenta una descripción del diseño del LCF-R empleado y del modelo genérico mostrado en el presente trabajo, el cual es empleado para conocer el comportamiento térmico y eléctrico del LCF-R.

En el Capítulo 5 se presenta la validación del modelo desarrollado con los resultados teóricos y experimentales de un caso de estudio obtenido de la literatura. Además, se presentan los resultados de las pruebas de cortocircuito en corriente alterna aplicadas a un modelo físico de LCF-R, construido con cintas SAT de YBCO con estabilizador de cobre y los resultados experimentales se comparan con los resultados teóricos obtenidos del modelo termoeléctrico del LCF-R.

En el Capítulo 6 se utiliza el modelo realizado para analizar el comportamiento transitorio de tres LCF-R conectados a un sistema eléctrico de potencia trifásico conformado por un generador síncrono conectado a un bus infinito a través de un transformador elevador de voltaje y una línea de transmisión, el cual es sujeto a una falla trifásica que provoca la inestabilidad del sistema. Se ajustan los parámetros del modelo de los LCF-R, como la longitud de las cintas superconductoras, el número de cintas en paralelo y el valor de la resistencia en derivación conectada en paralelo, con el fin de analizar el impacto del LCF-R en la estabilidad transitoria del generador, además de la limitación de corriente y el tiempo de recuperación de los LCF-R.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones obtenidas en el presente trabajo.

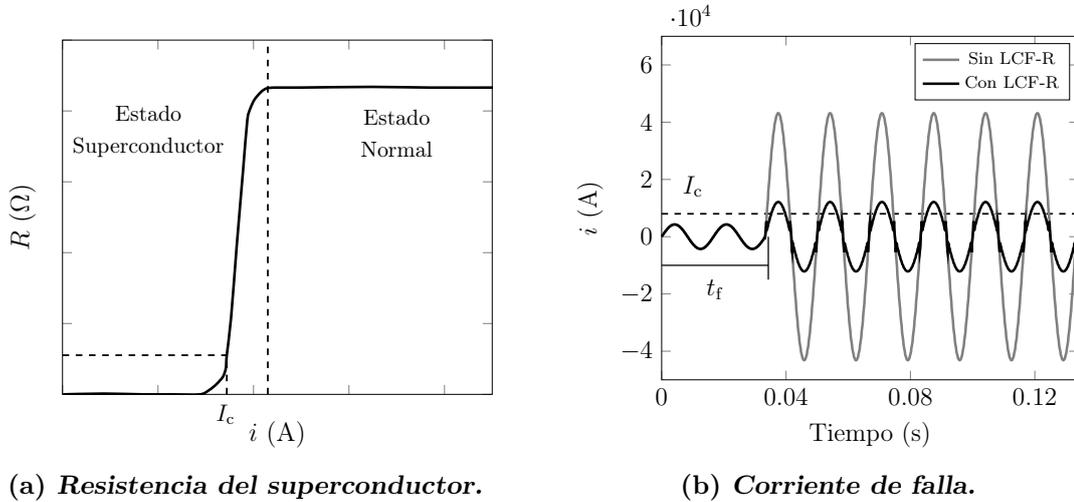
Finalmente, en el Apéndice se muestran las curvas que representan las propiedades térmicas y eléctricas con respecto de la temperatura de los materiales que conforman la cinta superconductora empleada en los modelos analizados.

En este capítulo se muestra el estado de arte referente al modelado y construcción de diversos prototipos del LCF-R. Además, se presentan los antecedentes de los modelos que describen el comportamiento físico del LCF-R, presentando modelos desde los más sencillos, utilizados en el análisis de redes eléctricas, hasta los más complejos, utilizados para conocer detalles en el diseño del LCF-R.

## 2.1. Concepto básico del LCF-R

El principio básico de funcionamiento del LCF-R depende del comportamiento no lineal de la resistencia del superconductor con respecto de la corriente que fluye a través de él, actuando como un interruptor. En la Fig. 2.1(a) se observa la transición del estado superconductor al estado normal en un material cuando la corriente que fluye a través de él supera a la corriente crítica  $I_c$ , con un aumento drástico en la resistencia del superconductor hasta alcanzar un valor de saturación, determinado por el estabilizador de la cinta o la resistencia en derivación conectada en paralelo con el LCF-R, si se tiene presente [32, 33].

En la Fig. 2.1(b) se muestra la corriente de falla presentada en un sistema eléctrico de potencia ocurrida en un tiempo  $t_f$ , la cual es aproximadamente diez veces mayor que la corriente nominal presentada antes de la falla, lo cual podría provocar daños severos en el sistema eléctrico. Se muestra que si se conecta un LCF-R en el sistema eléctrico anterior, la corriente de falla se reduce a un valor tolerable por el sistema en un tiempo muy reducido, ya que cuando la corriente de falla supera a la corriente crítica  $I_c$  se tiene un aumento drástico en la resistencia del LCF-R, como se muestra en la Fig. 2.1(a), en un tiempo de operación menor a un ciclo eléctrico, lo que permite reducir la corriente de falla a un valor tolerable por el sistema eléctrico de potencia, aproximadamente tres veces mayor que la corriente nominal.



**Fig. 2.1:** a) Resistencia en el superconductor con respecto a la corriente  $i$  [33]. b) Efecto del LCF-R en la corriente de falla de un sistema eléctrico de potencia.

## 2.2. Proyectos realizados del LCF-R

Los primeros superconductores comerciales usados en la fabricación del LCF fueron el NbTi y el Nb<sub>3</sub>Sn (Niobio-Titanio y Niobio-Estaño), los cuales son Superconductores de Baja Temperatura Crítica (SBT) y deben ser enfriados con temperaturas cercanas a los 5 K para mantener su estado superconductor, con lo que el costo de enfriamiento es muy elevado [10]. Posteriormente, se realizaron proyectos con Superconductores de Alta Temperatura Crítica (SAT) como los mostrados en la Tabla 2.1, con el fin de reducir el costo de enfriamiento, el cual es realizado con nitrógeno líquido, que es un material abundante en la naturaleza y de bajo costo [17].

En el año 2001, ABB construyó en Suiza el primer limitador monofásico con tubos de Bi-2212, con un voltaje de 8 kV y una corriente de 800 A [9, 16, 34, 35]. En el año 2004, bajo el proyecto denominado CURL 10, Nexans fabricó un LCF-R trifásico con tubos de Bi-2212 como los mostrados en la Fig. 2.2(a), con un voltaje de 10 kV y capacidad de 10 MVA, el cual fue instalado en la red eléctrica de Alemania y cuyas pruebas en campo resultaron exitosas [36]. Posteriormente, en el año 2009, Nexans fabricó los primeros LCF-R trifásicos comerciales con tubos de Bi-2212, con voltaje de 12 kV y corrientes de 100 A y 800 A, con el fin de ser instalados en la red eléctrica de Alemania [14, 35, 37]. Para reducir los costos de fabricación, el desarrollo de prototipos de LCF-R comenzó a enfocarse en el uso de cintas SAT, como el LCF-R trifásico fabricado con cintas de BiSCCO Bi-2223, construido en el año 2005 por la empresa CESI RICERCA en Italia, con un voltaje de 3.2 kV y una corriente de 220 A [9, 38, 39].

**Tabla 2.1:** Proyectos internacionales realizados con el LCF-R [9, 39].

Fabricante	País	Año	kV	A	MVA	Fases	Material
ABB	Suiza	2001	8	800	6.4	1	bulto de BiSCCO
Nexans SC	Alemania	2004	10	600	10	3	bulto de BiSCCO
CESI RICERCA	Italia	2005	3.2	220	1.2	3	cinta de BiSCCO
Hyundai/AMSC	Corea	2007	13.2	630	8.3	1	cinta de YBCO
KEPRI	Corea	2007	23	630	25	3	bulto de BiSCCO
Nexans SC	Alemania	2009	12	100/800	2/16	3	bulto de BiSCCO
RSE	Italia	2011	9	250	3.9	3	cinta de BiSCCO
KEPRI	Corea	2011	23	3000	120	3	cinta de YBCO
AMSC/Siemens	EUA	2012	115	1200	240	3	cinta de YBCO
Nexans SC	Alemania	2015	10	2300	40	3	cinta de YBCO

La tendencia actual es la fabricación del LCF-R con cintas de YBCO, ya que es una tecnología que presenta bajas pérdidas en corriente alterna con respecto a los demás superconductores. En el año 2011, bajo el proyecto llamado ENSYSTROB, Nexans construyó en Alemania un LCF-R trifásico de 12 kV y 800 A, con módulos de bobinas bifilares de cinta de YBCO conectados en serie como el mostrado en la Fig. 2.2(b), cuyas pruebas de laboratorio resultaron exitosas [37]. El proyecto AmpaCity, desarrollado en Alemania a partir del año 2011, incluyó la instalación de un LCF-R trifásico de cintas de YBCO como parte de un sistema superconductor de distribución de energía eléctrica, el cual ha mostrado buenos resultados [19, 38, 40].



(a) Componentes del LCF-R [35].



(b) Bobina bifilar [41].

**Fig. 2.2:** a) Componentes del LCF-R fabricados con tubos de Bi-2212. b) Componente bifilar de LCF-R fabricado con cintas de YBCO. Cortesía Nexans [14, 35, 37, 41, 42].

## 2.3. Modelos del LCF-R

Para representar el comportamiento del LCF-R se ha recurrido de diversos modelos, como los que se presentan en la Tabla 2.2, los cuales varían desde los más simples, los cuales involucran los parámetros eléctricos básicos del superconductor y son de gran utilidad para el análisis de sistemas eléctricos de potencia, a los más complejos, los cuales involucran detalles geométricos para analizar el comportamiento local del LCF-R [22, 43]. El grado de detalle de los modelos del LCF-R depende de los requerimientos del análisis a realizar [11, 27, 43].

**Tabla 2.2:** Modelos de LCF-R.

Modelo	Breve Descripción
Escalón de resistencia	La resistencia del LCF-R es despreciable para corrientes menores que el valor de disparo. Si la corriente excede dicho valor, la resistencia del LCF-R se incrementará a su valor nominal. Cuando la corriente es inferior al valor de disparo después de que la falla ha sido liberada, el LCF-R recuperará su estado superconductor después de cierto tiempo.
Exponencial con el tiempo	La resistencia del superconductor es despreciable por debajo de la corriente crítica, incrementándose exponencialmente con el tiempo para corrientes mayores que el valor crítico hasta una resistencia máxima, donde el LCF-R pierde totalmente su estado superconductor.
Termoeléctrico simplificado	Considera que el calor fluye en una sola dirección del componente superconductor con una geometría simplificada, la cual es conectada en paralelo con una resistencia de derivación metálica.
Modelo electrotérmico equivalente	Las ecuaciones de transferencia de calor dentro de cada componente del LCF se consideran equivalentes a circuitos eléctricos, con el fin de describir los comportamientos eléctricos y térmicos de los componentes del LCF-R.
Elemento finito	Las ecuaciones electromagnéticas y térmicas que describen el comportamiento del LCF-R son implementadas en el método de elemento finito (MEF), con el fin de obtener modelos cercanos a la realidad para la investigación del comportamiento eléctrico y térmico del LCF-R.

Entre los modelos más simples, se tiene el modelo de escalón de resistencia y el modelo exponencial con el tiempo. En el modelo de escalón de resistencia, mostrado en la Ec. (2.1), si el valor absoluto de la corriente  $i$  es menor que la corriente de disparo  $i_d$ , el LCF-R estará en estado superconductor y su resistencia  $R_{sc}$  será despreciable. Por el contrario, si la corriente excede el valor de disparo, la resistencia del LCF-R se incrementará al valor nominal  $R_n$ . Finalmente, cuando la corriente a través del LCF-R cae por debajo del valor de disparo, debido a la liberación de la falla, el LCF-R será restaurado a su estado superconductor después de un tiempo de recuperación [43].

$$R_{sc} = \begin{cases} 0 & i < i_d \\ R_n & i \geq i_d \end{cases} \quad (2.1)$$

El modelo exponencial con el tiempo representa con mayor precisión el comportamiento real del LCF-R que los demás modelos simplificados, el cual se muestra en la Ec. (2.2), donde la resistencia del superconductor  $R_{sc}$  es despreciable antes del tiempo en el que ocurre la falla  $t_0$ , ya que la corriente es inferior a la corriente crítica del superconductor  $I_c$ . A partir del momento en el que ocurre la falla, la resistencia del superconductor se incrementa exponencialmente con el tiempo con una constante de tiempo  $\tau$ , ya que se supera el valor crítico de la corriente, hasta alcanzar el valor máximo de resistencia  $R_n$  en el que el LCF-R pierde por completo su estado superconductor [44, 45]. En el modelo exponencial no se consideran los efectos térmicos del LCF-R, lo que no permite incluir la fenomenología básica de los superconductores [43].

$$R_{sc} = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ R_n[1 - \exp(-\frac{t-t_0}{\tau})] & t \geq t_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Los modelos más refinados consideran las propiedades físicas y las dimensiones de los componentes del LCF-R [43]. Tales modelos emplean la ley de potencia del superconductor para representar su comportamiento eléctrico, la cual es mostrada en la Ec. (2.3), donde  $E_{sc}$  es el campo eléctrico del superconductor,  $E_c$  es el campo eléctrico crítico igual a  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ,  $J_{sc}$  es la densidad de corriente del superconductor,  $J_c$  es la densidad de corriente crítica y  $n$  es el índice  $n$  del superconductor [46]. Para describir el comportamiento térmico del superconductor se utiliza ecuación de la transferencia de calor, mostrada en la Ec. (2.4), donde  $C_{th}$  es la capacidad térmica,  $k$  es la conductividad térmica y  $Q$  es la densidad de potencia gastada [47].

$$E_{sc} = E_c \left( \frac{J_{sc}}{J_c} \right)^n \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot (-k\nabla T) + C_{th} \frac{\partial T}{\partial t} = Q \quad (2.4)$$

En los modelos refinados se considera que el calor fluye en una sola dirección del componente superconductor con una geometría simplificada, el cual se conecta en paralelo con una resistencia de derivación metálica, lo que permite simplificar la Ec. (2.4) [43]. En los modelos de elemento finito, las ecuaciones electromagnéticas y térmicas que describen el comportamiento del LCF son implementadas a través de software especializado con el método de elemento finito (MEF), con el fin de obtener una mejor aproximación a los modelos reales para investigar los comportamientos electromagnéticos y térmicos del superconductor, incluyendo detalles finos de la geometría del dispositivo [47].

En el modelo electrotérmico, las ecuaciones de transferencia de calor dentro de cada componente del LCF-R se consideran equivalentes a circuitos eléctricos, lo cual permite manipular con cierta facilidad los acoplamientos no lineales entre los fenómenos eléctricos y térmicos en los componentes del LCF-R, con lo que es posible predecir el comportamiento térmico [15]. En el modelo genérico presentado en este trabajo, se resuelve la distribución de corriente a través de las diferentes capas que conforman la cinta superconductora a través del método de Newton-Raphson, que en este caso considera la resolución de la ecuación no lineal del superconductor y que el voltaje entre las cintas que conforman al superconductor es el mismo. Además, se considera la dependencia de la corriente crítica y del índice  $n$  con la temperatura del superconductor [48].

## 2.4. Revisión de la literatura

Con respecto al modelado del LCF-R, en [15, 22, 23, 45] se presenta la aplicación del modelo termoelectrónico para definir el comportamiento físico del LCF-R ante una falla en sistemas eléctricos de potencia monofásicos, en el cual, a través de una analogía electrotérmica, se utilizan circuitos eléctricos equivalentes para describir el comportamiento térmico y el proceso de intercambio de calor entre los elementos que conforman al LCF-R. Con respecto al modelo presentado en estos trabajos, se tienen los siguientes detalles:

- No se analiza el proceso de recuperación del LCF-R cuando se libera una falla ni la interacción del LCF-R con un sistema eléctrico de potencia trifásico.
- No se toma en cuenta la dependencia de la temperatura del índice  $n$  del superconductor, ya que la relación entre  $V$  e  $I$  en el superconductor depende de valores experimentales específicos.
- La distribución de corriente entre los elementos que conforman al LCF-R está determinada mediante divisores de corriente y depende fuertemente de las condiciones iniciales del modelo y del paso iterativo usado para resolver las ecuaciones eléctricas y térmicas empleadas en el modelo.

- Se considera que el  $\text{LN}_2$  es similar a una fuente de voltaje constante a la que se conectan las capas de la cinta superconductora, lo cual no es una aproximación típica para un análisis térmico, ya que la temperatura de las capas depende de la estimación obtenida en la iteración previa con el método numérico empleado, por lo que no deben conectarse directamente a la fuente fija de 77 K, correspondiente al  $\text{LN}_2$ .

Posteriormente, en [49] se emplea el modelo termoelectrico descrito anteriormente en el análisis de la recuperación del LCF-R después de una falla trifásica, en el que la temperatura del superconductor se encuentra cerca de  $T_c$  y no se considera una temperatura más alta.

Con respecto al análisis de la estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia ante una falla utilizando diversos modelos del LCF-R, en [50] se tiene el análisis de la estabilidad transitoria de un generador síncrono ante una falla trifásica mediante el criterio de áreas iguales, con un LCF-R conectado en serie en cada una de las fases del generador síncrono. Se utiliza un modelo exponencial dependiente del tiempo para representar el comportamiento eléctrico del LCF-R, con el cual no se toma en cuenta la dinámica térmica del LCF-R ni se representa adecuadamente su comportamiento físico ante una falla, ya los parámetros del modelo son determinados mediante el ajuste de datos experimentales, por lo que no se presenta un análisis detallado del proceso de recuperación del limitador después de la liberación de la falla. Además, en este trabajo no se tiene una descripción del diseño del LCF-R.

En [51], se presenta un modelo que describe el comportamiento eléctrico del LCF-R sin considerar su comportamiento térmico y el proceso de distribución de corriente en los elementos que lo conforman. En este trabajo no se presenta una descripción del diseño del LCF-R empleado, el tipo de superconductor usado ni de los elementos que conforman al dispositivo. Además, el LCF-R se coloca en la zona de transmisión (alto voltaje y bajas corrientes), con lo cual no se aprovechan las características de los superconductores comerciales: alta corriente y aislamiento dieléctrico frío, con ruptura a bajos voltajes.

Por lo tanto, con respecto a la literatura revisada, a excepción de los trabajos presentados en [15, 22, 23, 45, 49], no se tiene una descripción clara del impacto del LCF-R en la estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia trifásicos, ya que se emplean modelos simplificados que no representan satisfactoriamente el comportamiento físico del LCF-R ante una falla, los cuales son basados en ajustes a datos experimentales y en diseños específicos que no consideran la dinámica termoelectrica del LCF-R. Con los modelos convencionales del LCF-R usados en el análisis de redes no se representa el proceso de distribución de corriente, no se contempla el análisis del impacto los parámetros del LCF-R ni se analiza su proceso de recuperación.

---

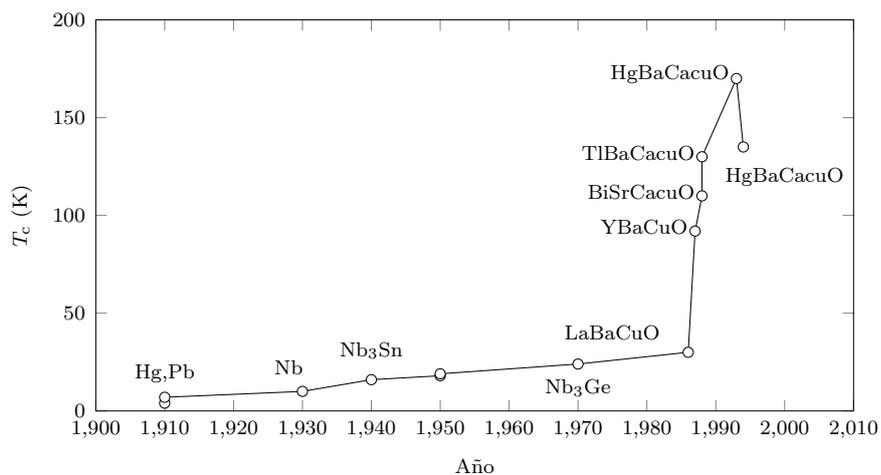
Capítulo 3

# Superconductividad

---

La superconductividad es un fenómeno físico en el que algunos materiales presentan resistividad eléctrica nula cuando son enfriados a bajas temperaturas. La superconductividad fue descubierta por el científico Heike Kamerlingh Onnes en 1911, quien realizó experimentos enfocados en la resistividad de diversos materiales a muy bajas temperaturas y encontró que el mercurio presentó un valor nulo de resistividad con una temperatura de 4.2 K, por lo que fue el primer superconductor descubierto. Desde aquel momento ha crecido el interés científico por descubrir las propiedades superconductoras de diversos materiales y aleaciones [45, 52].

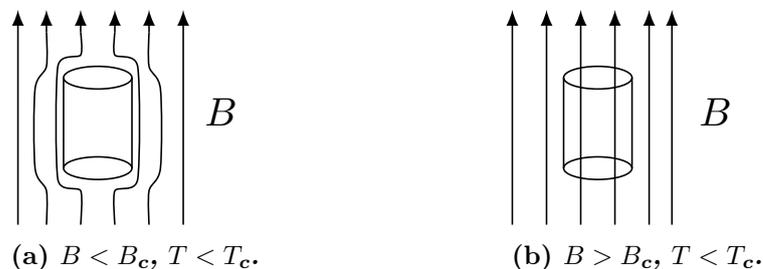
La temperatura en la que un material pierde su superconductividad se conoce como temperatura crítica, la cual es denotada por  $T_c$ . En la Fig. 3.1 se muestra la evolución cronológica de la temperatura crítica de varios superconductores. En 1986, los físicos Johannes Georg Bednorz y Karl Alexander Müller descubrieron el compuesto cerámico  $\text{LaBaCuO}$ , con una  $T_c$  por encima de 30 K, con lo cual aparecieron los Superconductores de Alta Temperatura Crítica (SAT), los cuales tienen una  $T_c$  superior a 30 K.



**Fig. 3.1:** Evolución cronológica de  $T_c$  de los superconductores [53].

Los SAT tienen una gran aplicación en sistemas de uso práctico, en especial los superconductores con  $T_c$  por encima de la temperatura del nitrógeno líquido (77.3 K a presión atmosférica), debido a la reducción de los costos de enfriamiento [10, 45, 53, 54]. En 1987, los físicos Wa-Kuen Wu, Ching-Wu y colaboradores descubrieron el YBCO, con una  $T_c$  de 92 K [55]. En 1988, los superconductores basados en Bismuto (BiSCCO) fueron descubiertos, los cuales tienen una temperatura crítica de 110 K [56]. Tanto el YBCO como el BiSCCO son SAT comerciales con una gran aplicación en los sistemas eléctricos de potencia [10, 14, 48].

En la Fig. 3.2(a) se muestra el comportamiento de un superconductor en la presencia de un campo magnético externo, con una temperatura menor que  $T_c$  ( $T < T_c$ ), donde se observa que las líneas de flujo magnético  $B$  son excluidas completamente del material, por lo que presenta diamagnetismo perfecto. Este fenómeno, conocido como fenómeno Meissner-Ochsenfeld, fue descubierto en 1933 por los físicos Walter Meissner y Roberto Ochsenfeld [57]. Si la densidad de campo magnético aumenta hasta superar un valor límite, el campo magnético penetra completamente en el material, como se muestra en la Fig. 3.2(b). En esta etapa, el material pierde su estado superconductor y se vuelve resistivo, aunque la temperatura sea menor que  $T_c$  ( $T < T_c$ ). Al valor límite de densidad de campo magnético con la que un material pierde su estado superconductor se conoce como densidad de campo magnético crítica, la cual es denotada por  $B_c$ . El  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_3$  tiene una  $B_c$  de 180 T, mientras que el  $\text{Bi}_3\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$  tiene una  $B_c$  de 225 T [45].



**Fig. 3.2:** Diagrama que representa el efecto Meissner-Ochsenfeld en un material superconductor ante la presencia de un campo magnético con densidad  $B$ . a)  $B < B_c$ . b)  $B > B_c$ .

Un material pierde su estado superconductor cuando por él fluye una corriente superior a un valor límite conocido como corriente crítica, la cual es denotada por  $I_c$ . Tanto  $I_c$  como  $T_c$  y  $B_c$  determinan una superficie que define los límites dentro de los cuales un material mantiene su estado superconductor con respecto a su temperatura, corriente y campo magnético, la cual se conoce como superficie crítica de un superconductor, como la que se muestra en la Fig. 3.3. Cualquier condición del superconductor por encima de dicha superficie determina la pérdida de la superconductividad en un material.

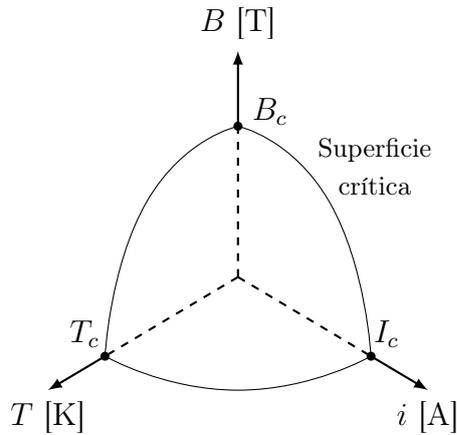


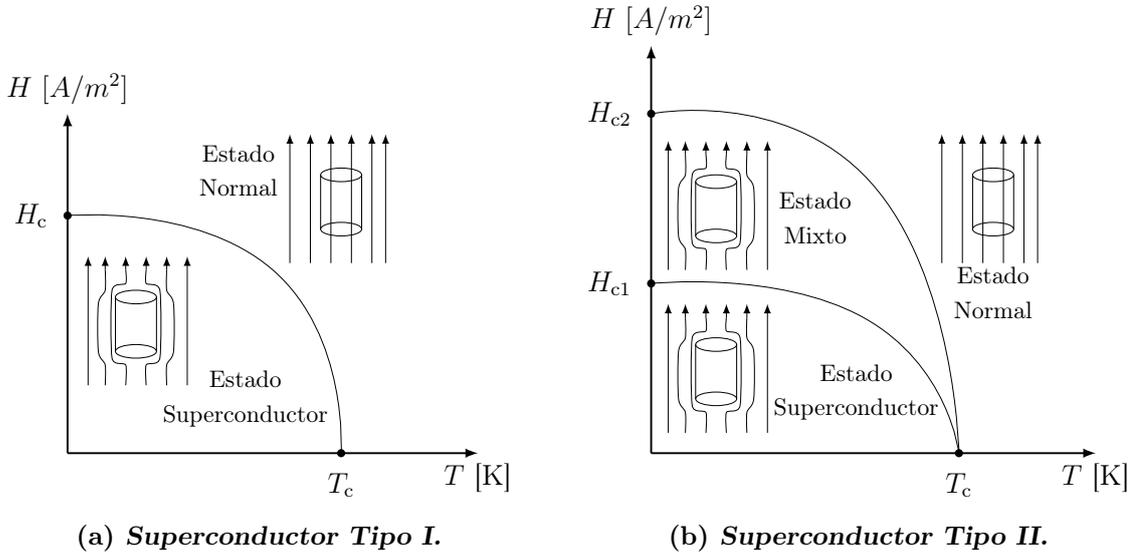
Fig. 3.3: Superficie crítica de un superconductor.

### 3.1. Tipos de superconductores

Algunos superconductores no permiten la penetración de campos magnéticos externos inferiores al valor crítico, los cuales se conocen como superconductores tipo I y su comportamiento ante un campo magnético externo de intensidad  $H$  se representa en la Fig. 3.4(a), donde el campo magnético es representado por líneas. Mientras que la temperatura del superconductor sea inferior a  $T_c$ , el material repele todo el campo magnético externo si  $H$  es inferior a  $H_c$ . Cuando  $H$  supera a  $H_c$ , el material pierde su estado superconductor y permite la entrada de todo el campo magnético exterior.

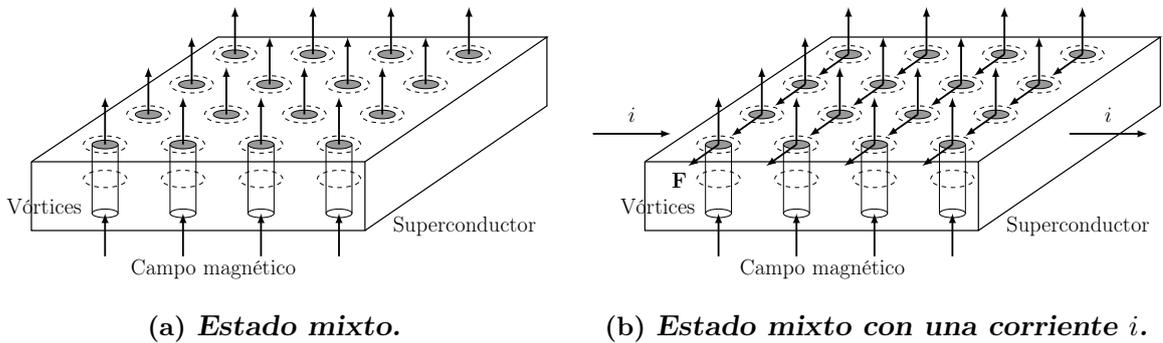
Por otro lado, existen superconductores que permiten la penetración parcial de campos magnéticos externos, lo que resulta en una mezcla entre el estado normal y el estado superconductor del material conocida como estado mixto del superconductor, los cuales se conocen como superconductores tipo II, cuyo comportamiento ante la presencia de un campo magnético externo de intensidad  $H$  se representa en la Fig. 3.4(b), en la cual el campo magnético no penetra al superconductor mientras que  $H$  sea menor que un valor crítico  $H_{c1}$ , como en el caso del superconductor tipo I.

Cuando  $H$  se incrementa por encima de  $H_{c1}$ , el material permite la entrada parcial del campo magnético externo en filamentos microscópicos cuantizados llamadas vórtices, los cuales forman una red teóricamente regular como la que se muestra en la Fig. 3.5(a) y aparecen desde la frontera del superconductor, ocupando el material hasta que no hay más espacio o el calentamiento llega a exceder  $T_c$  si se tienen corrientes en el superconductor. A partir de  $H_{c2}$ , el material pierde por completo su estado superconductor y permite la entrada de todo el campo magnético externo.



**Fig. 3.4:** Diagrama magnético para superconductores: a) Tipo I. b) Tipo II.

Si una corriente  $i$  circula por un superconductor de Tipo II en estado mixto, como se muestra en la Fig. 3.5(b), aparecerán fuerzas de Lorentz  $F$  que tienden a mover los vórtices del superconductor en una dirección perpendicular a  $i$ . La fuerza de sujeción del superconductor  $F_p$  (pinning = sujeción), que es una propiedad extrínseca provocada por defectos en la microestructura del superconductor, impide el movimiento de los vórtices, por lo que si  $i$  es menor que  $I_c$ ,  $F$  es menor que  $F_p$  ( $F < F_p$ ), con lo que los vórtices permanecen estáticos. En esta etapa, la resistencia del superconductor es despreciable. Cuando  $i$  supera a  $I_c$ ,  $F$  supera a  $F_p$  ( $F > F_p$ ) y los vórtices se mueven en una dirección perpendicular a  $i$ , con lo que se genera un campo eléctrico a lo largo del superconductor, asociado al gasto y al aumento en la temperatura.



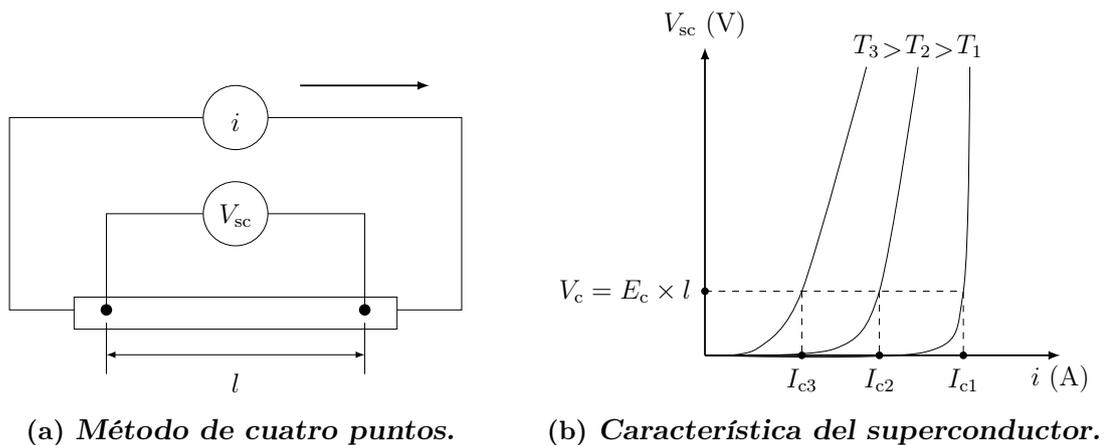
**Fig. 3.5:** a) Estado mixto de un superconductor tipo II. b) Circulación de corriente en un superconductor tipo II en estado mixto.

En esta etapa, el material comienza a tener un comportamiento resistivo debido al campo eléctrico, aunque la temperatura esté por debajo de  $T_c$  y de que exista un camino continuo de resistencia nula a través de la trayectoria de  $i$  en el superconductor. El aumento de la resistencia conlleva a la producción de calor y a un incremento en la temperatura, la cual puede superar  $T_c$  y llevar al superconductor a su estado normal.

### 3.2. Curva característica de los SAT

La curva característica representa el comportamiento del voltaje en un superconductor con respecto a la corriente que fluye a través de él, la cual se obtiene de manera experimental con el método de los cuatro puntos mostrado en la Fig. 3.6(a), en el cual se conectan las terminales de una fuente de CD variable en serie con la muestra del superconductor y se colocan sensores de voltaje en las terminales de la muestra, con una distancia de medición  $l$  [58].

Con el método de los cuatro puntos se obtiene la corriente crítica de un superconductor  $I_c$ , que es el valor de corriente con la cual el voltaje en el superconductor  $V_{sc}$  es igual a  $V_c = E_c \times l$ , donde  $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$  es el campo eléctrico crítico [47, 59, 60]. Con corrientes menores que  $I_c$ ,  $V_{sc}$  es prácticamente nulo, mientras que para corrientes mayores que  $I_c$ ,  $V_{sc}$  se incrementa de manera exponencial. En la Fig. 3.6(b) se muestran las curvas características de un superconductor obtenidas con diferentes temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , para las cuales se tienen las corrientes críticas  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  e  $I_{c3}$ , respectivamente. Se observa que  $I_c$  disminuye con el aumento de la temperatura en el superconductor, con lo que  $I_c$  puede modelarse como una función de la temperatura del material [61, 62, 63].



**Fig. 3.6:** a) Método de cuatro puntos para caracterizar una muestra de superconductor. b) Curva característica del superconductor a diferentes temperaturas.

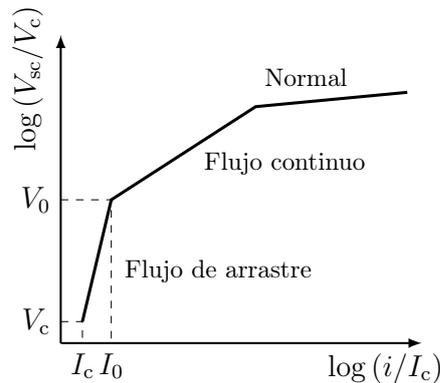
La curva característica del superconductor puede representarse con la Ec. (3.1), conocida como ley de potencia, donde  $n$  es el índice  $n$  de un superconductor, el cual indica que tan drástico es el cambio del estado superconductor al estado normal cuando la corriente supera a  $I_c$ . Si la Ec. (3.1) se representa en forma logarítmica adquiere la forma mostrada en la Ec. (3.2). En la Fig. 3.6(b) se observa que a mayores temperaturas, el incremento de voltaje es menos drástico, por lo que  $n$  disminuye con el aumento en la temperatura del material.

$$V_{sc} = E_c \times l (i/I_c)^n \tag{3.1}$$

$$n = \frac{\log(V_{sc}/V_c)}{\log(i/I_c)} \tag{3.2}$$

La Fig. 3.7 muestra las etapas principales de la curva característica del SAT tipo II en escala logarítmica, de acuerdo a la ley de potencia del superconductor, donde la variación de  $n$  en la pendiente de la curva se debe al movimiento de los vórtices en el superconductor. Las etapas de la curva se describen a continuación:

1. Flujo de arrastre: Con corrientes  $i$  bajas no se tiene un movimiento apreciable en los vórtices del superconductor y el voltaje a través del material es nulo. En esta etapa, el índice  $n$  del YBCO se encuentra entre 20 y 30 [15, 64].
2. Flujo continuo: Con corrientes superiores a  $I_c$  se tiene un movimiento en los vórtices y un voltaje en el superconductor, ya que  $F$  es mucho mayor que  $F_p$ . En esta etapa, el índice  $n$  del YBCO varía entre 2 y 4 [15, 64].
3. Normal: Con corrientes mucho mayores que  $I_c$  se pierde por completo el estado superconductor y el material se comporta como un conductor normal, presentando una resistencia lineal ( $n=1$ ).



**Fig. 3.7:** Curva característica del SAT tipo II, en escala logarítmica.

### 3.3. Descripción de las cintas SAT

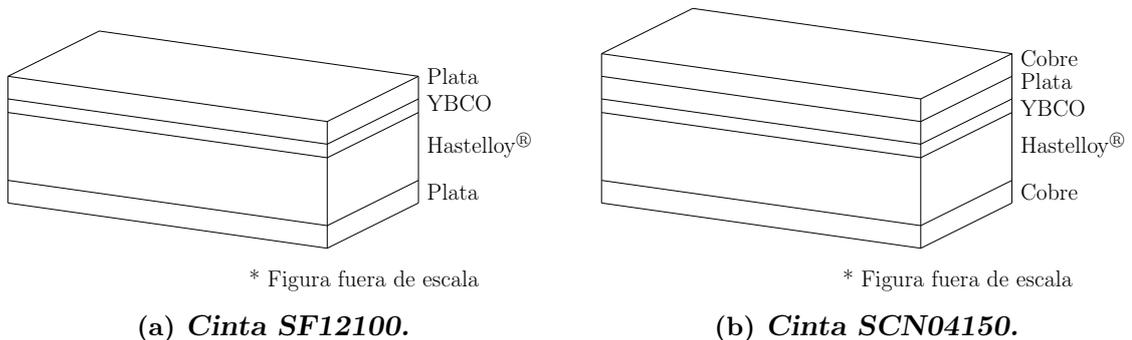
En esta sección se describen algunas de las cintas SAT comerciales usadas para la construcción del LCF, las cuales están fabricadas principalmente de compuestos de Bi-2223 e YBCO y son conocidas como cintas de primera y segunda generación, denotadas por G1 y G2, respectivamente. En este tipo de cintas, el superconductor está en contacto con materiales metálicos adicionales, como la plata y el cobre, los cuales ayudan a la cinta a resistir corrientes por encima de la corriente crítica del superconductor, además de proporcionar soporte mecánico y térmico a la cinta.

Las cintas G1 están fabricadas con filamentos de Bi-2223 inmersos en una matriz de plata, como se muestra en la sección transversal de la cinta presentada en la Fig. 3.8 [65]. Las cintas G2 están compuestas por capas de diferentes metales que cubren a una delgada capa de superconductor, como se muestra en la Fig. 3.9. En el presente trabajo se utilizan cintas G2 con y sin estabilizador de cobre, debido a que presentan mínimas pérdidas en CA con respecto a otras cintas SAT comerciales y a que tienen una mayor densidad de corriente, aunque representan una tecnología en desarrollo [10, 66].



**Fig. 3.8:** Detalle de la cinta de Bi-2223 [65].

La cinta SF12100 (SuperPower<sup>®</sup>), mostrada en la Fig. 3.9(a), es una cinta sin estabilizador de cobre, la cual tiene una superficie mayor que las demás, lo cual le permite tener buen contacto con el nitrógeno líquido circundante (LN<sub>2</sub>) [66]. Por otro lado, la cinta SCN04150 (SuNAM<sup>®</sup>), mostrada en la Fig. 3.9(b), cuenta con un estabilizador de cobre que le permite tolerar corrientes mayores que  $I_c$  [67].



**Fig. 3.9:** Capas que componen a las cintas SAT G2. a) Cinta SF12100. b) Cinta SCN04150 [66, 67].

## Modelo teórico del LCF-R

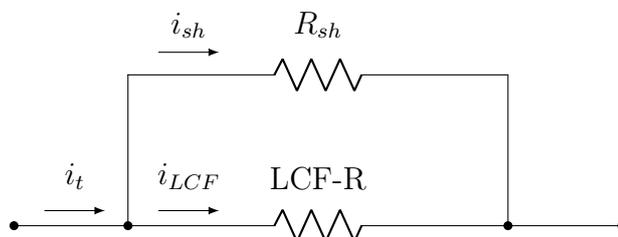
---

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo teórico del LCF-R a partir de un diseño genérico del dispositivo, en el cual se presentan las ecuaciones que describen el comportamiento térmico y eléctrico de las cintas que conforman al LCF-R a través de un modelo de parámetros concentrados.

### 4.1. Diseño genérico del LCF-R

El diseño del LCF-R considera un conjunto de módulos conectados en serie, fabricados con cintas superconductoras de segunda generación (YBCO), los cuales son enfriados con  $\text{LN}_2$ . El conjunto de módulos que conforman al LCF-R se conecta en paralelo con una resistencia de derivación externa  $R_{sh}$ , como lo muestra la Fig. 4.1, en la cual,  $i_t$  es la corriente total que circula por el conjunto,  $i_{sh}$  es la corriente a través de la resistencia de derivación e  $i_{LCF}$  es la corriente que circula a través del LCF-R.

La resistencia de derivación ofrece un camino extra a la corriente total, con el fin de acelerar el tiempo de recuperación del LCF-R [10]. En el diseño genérico, esta resistencia se localiza afuera del crióstato a temperatura ambiente, con el fin de evitar que el calentamiento producido por la resistencia durante una falla afecte al conjunto superconductor inmerso en  $\text{LN}_2$ . Con lo anterior, se reduce el consumo de  $\text{LN}_2$  y se acelera el tiempo de recuperación del LCF-R una vez que la falla ha sido liberada.



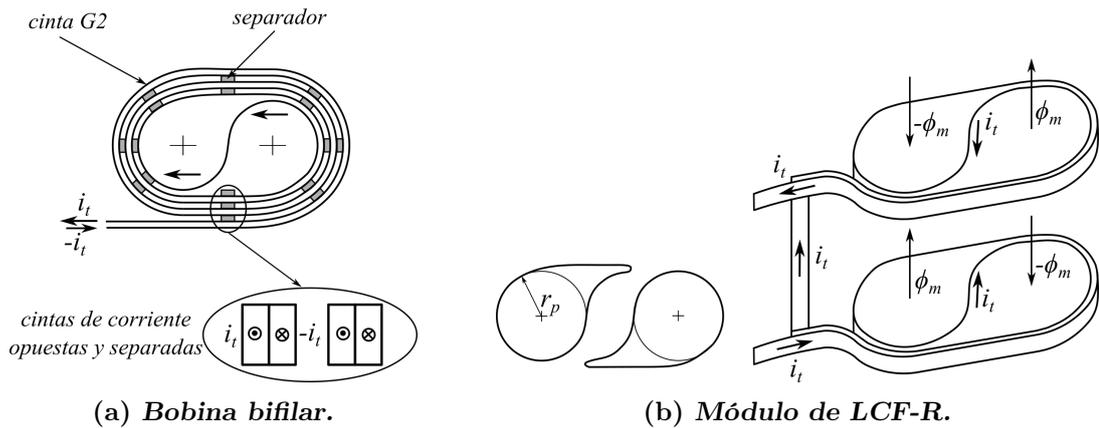
**Fig. 4.1:** Diagrama de conexiones entre el LCF-R y la resistencia de derivación externa.

La Fig. 4.2 muestra el diseño conceptual de un módulo del LCF-R, el cual fue inspirado en los diseños presentados por [23, 42]. Cada bobina esta construida con  $N_{tp}$  cintas superconductoras comerciales G2, aisladas y conectadas en paralelo, como se muestra en la Fig. 4.2(a), las cuales son enrolladas sobre sí mismas dentro y sobre los soportes de la bobina en forma de lemniscata, lo que conforma la bobina bifilar mostrada en la Fig. 4.2(a), con lo que se cancela la mayor parte de la componente inductiva generada por las cintas y se evita una unión con soldadura [68]. El radio mínimo de los bloques  $r_p$  debe ser mayor que el radio mínimo de curvatura de la cinta  $r_m$ , reportado por el fabricante.

A través de pequeños separadores entre las cintas se tienen canales extra de circulación del  $LN_2$  en las bobinas superconductoras, como lo muestra la Fig. 4.2(a), con el fin de mejorar el enfriamiento de las bobinas. Con lo anterior, se puede asumir que cada cinta está completamente bañada en  $LN_2$  [69].

El módulo consiste en dos bobinas bifilares no inductivas conectadas en serie, de tal manera que las componentes reactivas se cancelan. En la Fig. 4.2(b) se muestra el ensamble del par de bobinas que conforman un módulo del LCF-R, las cuales se apilan en diferente dirección, con el fin de reducir la componente de campo magnético remanente, debido a la configuración de lemniscata.

Las bobinas propuestas son construidas con cintas comerciales sin estabilizador de cobre SF12100 de SuperPower<sup>®</sup>, con las características mostradas en la Tabla 4.1. La cinta está compuesta de 6 capas incluyendo el aislamiento ( $7.5 \mu\text{m}$ , superior e inferior), plata (superior:  $4 \mu\text{m}$ , inferior:  $1 \mu\text{m}$ ), Hastelloy<sup>®</sup> ( $100 \mu\text{m}$ ) y la capa superconductora ( $1 \mu\text{m}$ ), como se mostró en la Fig. 3.9(a).



**Fig. 4.2:** Diseño genérico de un módulo del LCF-R. a) Bobina bifilar. b) Módulo del LCF-R, el cual consiste en dos bobinas bifilares conectadas en serie.

**Tabla 4.1:** Características de la cinta G2 sin estabilizador de cobre (SF12100) [70, 71].

Propiedad	Valor	Unidad
Corriente crítica, $I_{c0}$ ( $T_{\text{ref}}$ , SF*)	300	A
Índice $n$ , $n_0$ ( $T_{\text{ref}}$ , SF*) [71]	21	-
Temperatura crítica, $T_c$	92	K
Temperatura de referencia, $T_{\text{ref}}$	77	K
Radio mínimo de curvatura, $r_m$	25	mm
Ancho, $w$	12	mm

El tipo de cinta se definió con base en la corriente que fluye por cada cinta, de tal manera que el número de cintas conectadas en paralelo es minimizado, asegurando que la corriente pico sea al menos 20 % inferior que la corriente crítica CD de la cinta  $I_c$ , con lo que el LCF-R puede llevar corrientes CA en régimen nominal con mínimas pérdidas.

Después de seleccionar el tipo de cinta a emplearse en el diseño, la longitud total sin empalme de la cinta, el número de bobinas en serie y las características de la resistencia de derivación externa se definieron en este trabajo de manera heurística, con el fin de cumplir las especificaciones requeridas para una operación segura del LCF-R en régimen nominal y en condiciones de falla, asegurando la recuperación del estado superconductor después de la liberación de la falla.

## 4.2. Modelo termoeléctrico genérico

El modelo genérico, correspondiente al diseño genérico presentado en la sección 4.1, resuelve el acoplamiento termoeléctrico del problema analizado, tomando en cuenta la dependencia de la temperatura de las propiedades de los materiales que conforman las cintas con las que se construye el LCF-R, como la capacidad calorífica específica, la conductividad térmica y la resistividad eléctrica, las cuales se presentan en el Apéndice B.

Se utiliza un algoritmo explícito en la resolución numérica de las ecuaciones temporales que representan los procesos de transferencia de calor y eléctricos ocurridos en las cintas que conforman al LCF-R y se calcula la temperatura y la corriente en la iteración actual  $t$  a partir de la iteración anterior  $t - \Delta t$ , con las que se obtienen los parámetros eléctricos y las propiedades térmicas de los materiales.

---

\*SF: Campo magnético propio de la cinta (Self field).

La distribución de corriente entre las capas del superconductor, las capas de los materiales metálicos de las cintas y la resistencia de derivación se resuelve a través del algoritmo de Newton-Raphson en cada paso de tiempo [72]. El modelo se implementó en el software Matlab/Simulink<sup>®</sup>, usando la librería de Simscape [73, 74, 75]. En el modelo desarrollado, se tienen las siguientes consideraciones:

- Las cintas están aisladas, son idénticas, están conectadas en paralelo y son enfriadas con LN<sub>2</sub> a 77 K.
- La corriente instantánea se distribuye uniformemente a través de las cintas.
- El campo eléctrico instantáneo está uniformemente distribuido en la sección transversal de las cintas que conforman al LCF-R, por lo que las cintas y sus capas pueden modelarse como un conjunto de resistores conectados en paralelo.
- La corriente crítica de las cintas superconductoras decrece linealmente con un aumento en la temperatura.
- La temperatura está uniformemente distribuida a través del ancho y la longitud de las cintas superconductoras.
- La inductancia en el LCF-R es despreciable.
- El valor de la resistencia de derivación es constante.

### 4.2.1. Modelo eléctrico

En este trabajo se utiliza un modelo de parámetros concentrados para representar el comportamiento eléctrico y térmico de las cintas SAT que conforman al LCF-R, en el cual, los parámetros eléctricos dependen de la temperatura. La resistencia eléctrica de la capa superconductora de una cinta  $R_{sc0}$  se presenta en la Ec. (4.1), la cual se deriva de la ley clásica de potencia para los superconductores:

$$R_{sc0} = \frac{E_c l_{tp}}{I_c} \left( \frac{|i_{sc}|}{I_c} \right)^{n-1} \quad (4.1)$$

donde  $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$  es el campo eléctrico crítico,  $I_c$  es la corriente crítica de una cinta superconductora,  $n$  es el factor  $n$  del superconductor,  $i_{sc}$  es la corriente que fluye a través de la capa superconductora y  $l_{tp}$  es la longitud total de una sola cinta [76]. El factor  $n$  e  $I_c$  dependen de la temperatura de la capa superconductora  $T_{sc}$ , como se muestra en las Ecs. (4.2) y (4.3) respectivamente:

$$n(T_{sc}) = n_0 \left( \frac{T_{ref}}{T_{sc}} \right) \quad (4.2)$$

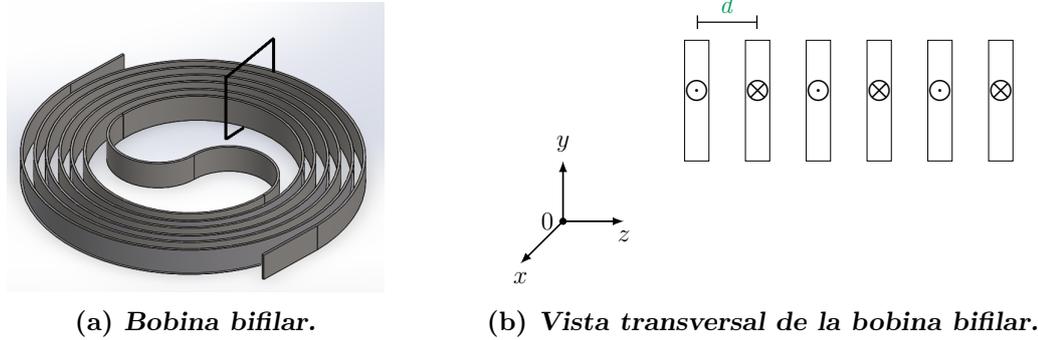
$$I_c(T_{sc}) = I_{c0} \left( \frac{T_c - T_{sc}}{T_c - T_{ref}} \right) \quad (4.3)$$

donde  $n_0$  es el factor  $n$  a la temperatura de referencia  $T_{ref} = 77$  K, el cual puede tomar valores entre 20 y 40, lo que depende de la fabricación de la cinta empleada [15, 64, 77].  $I_{c0}$  es la corriente crítica con campo propio de la cinta a  $T_{ref}$  y  $T_c$  es la temperatura crítica del superconductor [47, 60].

Con respecto a las pérdidas por corriente alterna en régimen nominal en las cintas superconductoras, mediante el uso de cintas con substrato no magnético como el Hastelloy<sup>®</sup> se tiene una reducción en las pérdidas ferromagnéticas y por corrientes parásitas en corriente alterna con frecuencias menores a 100 Hz, por lo que la mayor parte de las pérdidas en corriente alterna a bajas frecuencias se debe al efecto de histéresis, provocado por los campos magnéticos en el superconductor [78].

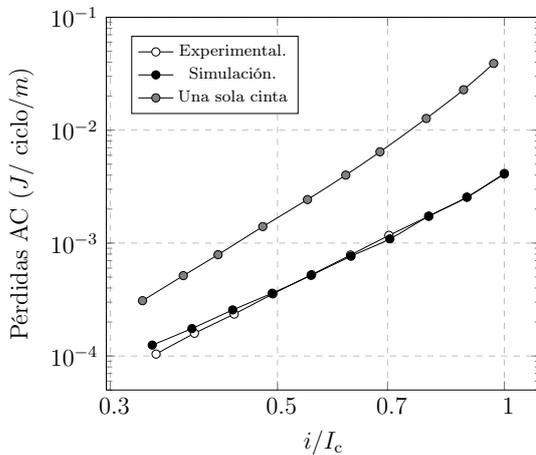
Con el fin de reducir los campos magnéticos generados por la corriente en una bobina superconductora, se tienen arreglos bifilares como el mostrado en la Fig. 4.3(a), que consiste en un arreglo de cintas paralelas por las cuales circulan corrientes de la misma magnitud y de sentido opuesto. En la Fig. 4.3(b) se muestra la sección transversal de la bobina bifilar, en la cual se observa el sentido de la corriente entre las secciones transversales de las vueltas de cinta que conforman a la bobina, donde el símbolo  $\odot$  indica un sentido de corriente saliente con respecto a la página, mientras que  $\otimes$  indica un sentido de corriente entrante. Con lo anterior, se tiene la cancelación de los campos magnéticos generados por la corriente que circula en la bobina y la reducción de las pérdidas por histéresis en el superconductor [41, 42]. Las vueltas de la cinta en la bobina bifilar son separadas por una distancia denotada con  $d$ , lo cual permite la circulación de LN<sub>2</sub> para el adecuado enfriamiento de la cinta superconductora en la bobina [38, 79].

En la Fig. 4.4(a) se muestran las pérdidas en corriente alterna en un ciclo eléctrico y por metro de cinta ( $J/(\text{ciclo} \times \text{m})$ ), con una frecuencia de 50 Hz, obtenidas a partir de las mediciones experimentales realizadas en una bobina bifilar fabricada con cinta superconductora SF12100, con una geometría similar a la mostrada en la Fig. 4.3(a), considerando diferentes corrientes pico, las cuales se muestran como fracciones de la corriente crítica de la cinta ( $I_c = 300$  A), con un rango del 30% hasta el 100% de  $I_c$ . En la misma figura, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas mediante el Método de Elemento Finito (MEF) para obtener las pérdidas en corriente alterna, los cuales son muy similares a los obtenidos en las mediciones [42]. Además, se muestran las pérdidas obtenidas en las simulaciones realizadas para una sola cinta, las cuales son aproximadamente diez veces mayores que las obtenidas con el arreglo bifilar con el 100% de  $I_c$ , lo que muestra la drástica reducción de pérdidas en corriente alterna en las bobinas bifilares.

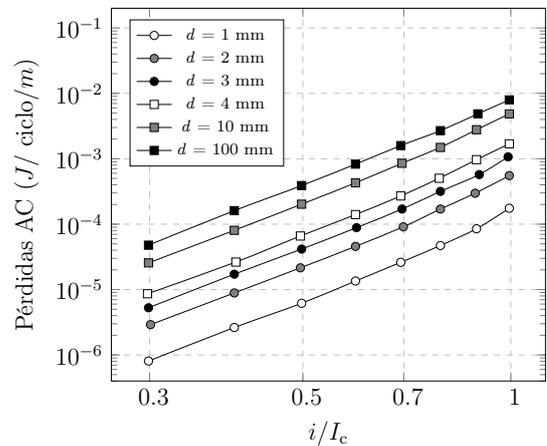


**Fig. 4.3:** a) Bobina bifilar plana. b) Corte transversal de la bobina bifilar, donde se indica la dirección de la corriente. El símbolo  $\odot$  indica corriente saliente con respecto a la página, mientras que  $\otimes$  indica una corriente entrante.  $d$  indica la separación entre cada cinta en el arreglo bifilar.

En la Fig. 4.4(b), se muestran los resultados de las simulaciones para obtener las pérdidas por corriente alterna en la bobina bifilar con diferentes separaciones entre las cintas que conforman la bobina, las cuales son denotadas con  $d$ . Se consideran diferentes corrientes pico, mostradas como fracciones de la corriente crítica de la cinta, con  $I_c = 300$  A. Se observa que mientras mayor sea la distancia de separación entre las cintas las pérdidas son mayores, aproximándose al caso de una sola cinta mostrado en la Fig. 4.4(a).



(a) Comparación entre valores experimentales y simulados [42].



(b) Simulaciones para diferentes valores de  $d$  [41].

**Fig. 4.4:** Pérdidas en corriente alterna para arreglos de bobinas bifilares: a) Comparación entre valores experimentales y simulados, con  $d = 3$  mm [42]. b) Considerando diferentes separaciones entre las cintas [41].

En la Tabla 4.2 se muestran las pérdidas en corriente alterna en una bobina bifilar con una separación entre vueltas de 3 mm, considerando corrientes del 10 %, 50 % y 100 % de la corriente crítica de la cinta, con  $I_c = 300$  A y con una frecuencia de 50 Hz, las cuales fueron obtenidas de la Fig. 4.4(b) [41]. Se tiene un ajuste de pérdidas en W/m para una frecuencia de 60 Hz. Los valores mostrados en la Tabla 4.2 muestran que aún para una corriente cercana al 100 % de  $I_c$  de la cinta empleada se tienen pérdidas en corriente alterna despreciables, debido al arreglo bifilar de la bobina y al uso de cintas con substrato no magnético (SF12100). Por lo tanto, en el presente trabajo, las pérdidas en corriente alterna en el superconductor en régimen nominal no fueron consideradas.

**Tabla 4.2:** Pérdidas en corriente alterna, con  $d = 3$  mm y considerando diferentes corrientes, a partir de los datos obtenidos de la Fig. 4.4(b).

	10 % $I_c$	50 % $I_c$	100 % $I_c$	Unidades
Pérdidas por cinta	<0.01	0.05	1	mJ/(ciclo*m)
Pérdidas por cinta con $f = 50$ Hz	<1	2.5	50	mW/m
Ajuste de pérdidas con $f = 60$ Hz	<1	3	60	mW/m

La resistencia  $R_j$ , debida a las uniones soldadas entre las cintas y las terminales existentes en el LCF-R, se adiciona a la resistencia de la capa superconductora ideal  $R_{sc0}$ , con el fin de obtener la resistencia total de la capa superconductora de la cinta  $R_{sc}$ , mostrada en la Ec. (4.4).  $R_j$  se representa con la Ec. (4.5), donde  $R_{sj}$  es la resistencia de una unión, aproximadamente igual a  $20 \times 10^{-9} \Omega$  [80],  $N_{tp}$  es el número de cintas paralelas conectadas en una bobina y  $N_c$  es el número de bobinas que contiene el LCF-R. La reducción de las pérdidas por disipación de calor causadas por la resistencia de las uniones y terminales permite conservar una temperatura de operación adecuada en régimen nominal del LCF-R, en conjunto con un diseño adecuado del sistema criogénico y del LCF-R.

$$R_{sc} = R_{sc0} + R_j \quad (4.4)$$

$$R_j = 2N_{tp} (N_c + 1) R_{sj} \quad (4.5)$$

Debido a que se asume que todas las cintas y bobinas son idénticas bajo las mismas condiciones de operación, solo se requiere obtener la distribución de corriente entre la capa superconductora, la matriz metálica de una cinta y la resistencia de derivación para conocer la distribución de corriente en cada capa de todas las cintas que conforman al LCF-R. La distribución de corriente se representa en la Ec. (4.6), donde  $i_t$  es la corriente total que circula por el LCF-R,  $i_{sc}$  e  $i_m$  son las corrientes de la capa superconductora y de la matriz metálica de una sola cinta respectivamente, mientras que  $i_{sh}$  es la corriente en la resistencia de derivación.

$$i_t = N_{tp} (i_{sc} + i_m) + i_{sh} \quad (4.6)$$

La resistencia equivalente del LCF-R  $R_{\text{LCF}}$  está dada por la Ec. (4.7), donde  $R_{\text{sh}}$  es el valor de la resistencia de derivación,  $R_{\text{sc}}$  es la resistencia de la capa superconductora y  $R_{\text{m}}$  es la resistencia equivalente de la matriz metálica de una cinta, conformada por las capas superior e inferior de plata y la capa de Hastelloy<sup>®</sup>, cuyas resistencias dependen de la temperatura [81, 82, 83].

$$R_{\text{LCF}} = \frac{1}{\frac{N_{\text{tp}}}{N_{\text{c}}} \left( \frac{1}{R_{\text{sc}}} + \frac{1}{R_{\text{m}}} \right) + \frac{1}{R_{\text{sh}}}} \quad (4.7)$$

La resistencia de la capa superconductora  $R_{\text{sc}}$  depende de la corriente  $i_{\text{sc}}$  y la temperatura  $T_{\text{sc}}$  en el superconductor, de acuerdo a las Ecs. (4.1), (4.2) y (4.3), anteriormente presentadas. Por lo tanto, de acuerdo a la ley de potencia, se tiene un voltaje  $V_{\text{sc}}$  a lo largo de la cinta, el cual es representado por la Ec. (4.8), donde  $V_{\text{c}}$  es el voltaje crítico de la cinta ( $V_{\text{c}} = E_{\text{c}} l_{\text{tp}}$ ). Por otro lado, la Ec. (4.9) representa el voltaje en la resistencia de derivación y las capas metálicas de todas las cintas.

$$V_{\text{sc}} = V_{\text{c}} \frac{i_{\text{sc}}^n}{I_{\text{c}}^n} \quad (4.8)$$

$$V_{\text{m}} = \frac{R_{\text{m}} R_{\text{sh}}}{R_{\text{m}} + N_{\text{tp}} R_{\text{sh}}} (i_{\text{t}} - N_{\text{tp}} i_{\text{sc}}) \quad (4.9)$$

Debido a que se considera que los voltajes  $V_{\text{sc}}$  y  $V_{\text{m}}$  son iguales, las Ecs. (4.8) y (4.9) pueden utilizarse para obtener la corriente en la capa superconductora de una cinta  $i_{\text{sc}}$  a través del algoritmo de Newton, el cual es un método numérico iterativo [72]. Se define la Ec. (4.10) a partir de las Ecs. (4.8) y (4.9), con el fin de obtener la corriente  $i_{\text{sc}}$ , con la cual, la resistencia en el superconductor  $R_{\text{sc}}$  puede ser calculada.

$$V_{\text{c}} \frac{i_{\text{sc}}^n}{I_{\text{c}}^n} - \frac{R_{\text{m}} R_{\text{sh}}}{R_{\text{m}} + N_{\text{tp}} R_{\text{sh}}} (i_{\text{t}} - N_{\text{tp}} i_{\text{sc}}) = 0 \quad (4.10)$$

La resistencia de la matriz metálica  $R_{\text{m}}$  es obtenida con la Ec. (4.11) a partir de las resistencias  $R_{\text{k}}$  de las distintas capas metálicas de una cinta, obtenidas con la Ec. (4.12) para cada capa  $k$  de la cinta ( $k$  puede corresponder a las capas superior, inferior de plata o la capa de Hastelloy<sup>®</sup>), donde  $A_{\text{k}}$  es el área de la sección transversal para cada capa y  $\rho_{\text{k}}$  es la resistividad de los materiales, dependiente de la temperatura de cada capa (ver el Apéndice B), la cual es obtenida de la solución de la ecuación de calor de la iteración anterior  $t - \Delta t$  (ver la sección 4.2.2).

$$R_{\text{m}} = \left( \sum_{k=1}^3 \frac{1}{R_{\text{k}}} \right)^{-1} \quad (4.11)$$

$$R_k = \frac{\rho_k l_{tp}}{A_k} \quad (4.12)$$

Una vez que las resistencias de todas las capas de las cintas son conocidas, la resistencia equivalente del LCF-R se obtiene con la Ec. (4.7). En resumen, se tiene el siguiente comportamiento de la resistencia equivalente del LCF-R:

- Régimen nominal:  $R_{LCF} = R_j$
- Distribución de corriente:  $R_j < R_{LCF} < R_{sh}$
- Régimen de falla:  $R_{LCF} \simeq R_{sh}$

Con  $R_{LCF}$ , la corriente en la resistencia de derivación  $i_{sh}$  puede obtenerse con un divisor común de corriente, como lo muestra la Ec. (4.13). Con las corrientes de la resistencia de derivación y de la capa superconductora de una cinta, la corriente en la matriz metálica  $i_m$  se obtiene con la Ec. (4.6). Finalmente, las potencias disipadas  $Q_k$  en cada capa  $k$  de la cinta son evaluadas con la Ec. (4.14), las cuales se incluyen en la ecuación de balance de calor en la próxima iteración para obtener las temperaturas en las diferentes capas de la cinta superconductora (ver la sección 4.2.2).

$$i_{sh} = \frac{R_{LCF}}{R_{sh}} i_t \quad (4.13)$$

$$Q_k = R_k i_k^2 \quad (4.14)$$

### 4.2.2. Modelo térmico

La Fig. 4.5 muestra una representación de las capas que conforman a la cinta superconductora. Se asume que las propiedades de la cinta son uniformes a lo largo de su longitud ( $Ox$ ) y que la temperatura es constante paralelamente a lo ancho de la cinta ( $Oy$ ), por lo que el modelo considera que la temperatura cambia de manera unidireccional a lo largo del espesor de la cinta ( $Oz$ ), considerando las temperaturas en la mitad de las capas en la dirección ( $Oz$ ) para conocer el comportamiento térmico de la cinta, en los puntos de 1 al 6 mostrados en la Fig. 4.5, considerando el aislamiento.

Las temperaturas de las capas se obtienen a partir de la ecuación de la conservación de la energía (o "potencia") en la cinta, de acuerdo a los esquemas mostrados en las Figs. 4.6(a) y 4.6(b). En el nodo  $i$ , la conservación de la potencia, en Watts, esta representada por la Ec. (4.15), donde  $\Phi_{i-1,i}$  y  $\Phi_{i,i+1}$  son los flujos de calor entre el nodo  $i$  y los nodos adyacentes  $i - 1$  e  $i + 1$ , mientras que  $\Phi_{i,i}$  es el calor interno generado en el nodo  $i$ .

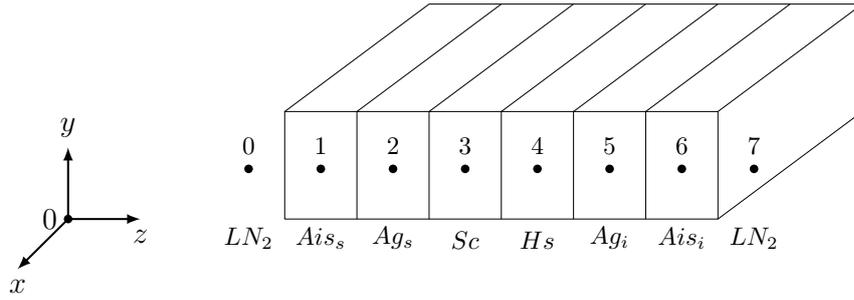
$$\Phi_{i-1,i} = \Phi_{i,i} + \Phi_{i,i+1} \quad (4.15)$$

La relación entre el flujo de calor  $\Phi$  y la diferencia de temperaturas entre la capa  $i$  y las capas adyacentes, denotada por  $\Delta T$ , está dada por las Ecs. (4.16) y (4.17), donde  $R_i^{th}$  y  $G_i^{th}$  son la resistencia y la conductancia térmicas de la capa  $i$  de la cinta, respectivamente, las cuales son representadas en la Ec. (4.18), donde  $k_i$  es la conductividad térmica del material con el que está conformada la capa, en W/(mK). La superficie de la cinta en el plano paralelo a (Oxy) está definida por la longitud  $l_{th}$  y el ancho  $w$  de la cinta, mientras que  $th_i$  es el espesor de cada capa  $i$  [84, 85].

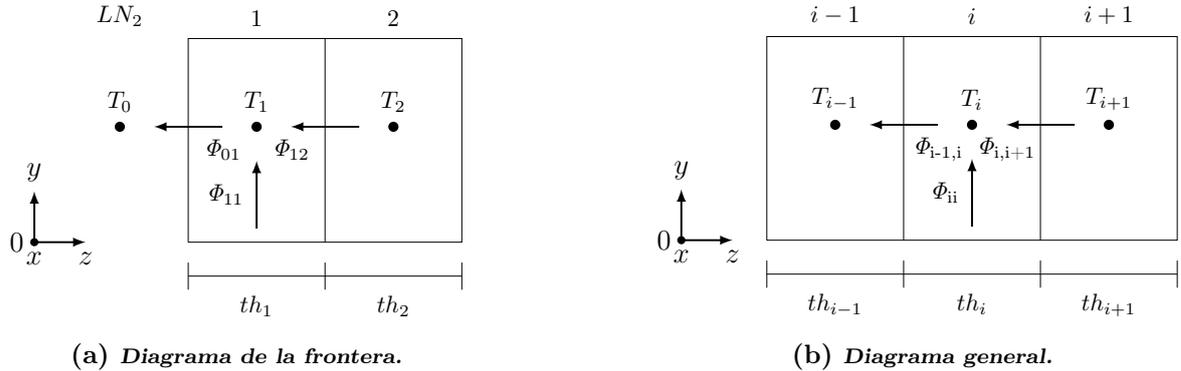
$$\Delta T = R_i^{th} \Phi \quad (4.16)$$

$$\Phi = G_i^{th} \Delta T \quad (4.17)$$

$$G_i^{th} = \frac{1}{R_i^{th}} = k_i \frac{wl_{th}}{th_i} \quad (4.18)$$



**Fig. 4.5:** Disposición de las capas que conforman a la cinta superconductora, donde: Aislamiento (*Ais*), Plata (*Ag*), Superconductor (*Sc*) y Hastelloy<sup>®</sup> (*Hs*). Los subíndices *s* e *i* son para distinguir las capas superior e inferior de la cinta, respectivamente.



**Fig. 4.6:** Diagramas que representan el intercambio de calor entre: a) La frontera de la última capa de la cinta y el LN<sub>2</sub>. b) Entre las capas adyacentes de la cinta.

Con lo anterior, la relación entre el flujo de calor  $\Phi$  y la diferencia de temperaturas entre las capas adyacentes a un nodo  $i$  ( $\Delta T$ ) puede representarse mediante circuitos eléctricos equivalentes a los sistemas térmicos, con el fin de resolver las ecuaciones de transferencia de calor entre cada capa de la cinta [85]. A través de los circuitos térmicos equivalentes, las temperaturas en la mitad de las capas pueden actualizarse a partir de valores previos calculados a través de un método numérico explícito. La Tabla 4.3 resume la equivalencia entre los elementos eléctricos y térmicos.

**Tabla 4.3:** Equivalencia entre elementos eléctricos y térmicos.

Propiedad térmica	Símbolo	Unidad	Propiedad eléctrica	Símbolo	Unidad
Temperatura	$T$	K	Voltaje	$V$	V
Flujo de calor	$\Phi$	W	Corriente	$I$	A
Resistencia térmica	$R^{th}$	K/W	Resistencia eléctrica	$R$	$\Omega$
Conductancia térmica	$G^{th}$	W/K	Conductancia eléctrica	$S$	$\Omega^{-1}$

Los flujos de calor entre el nodo  $i$  y los nodos adyacentes  $i - 1$  e  $i + 1$ ,  $\Phi_{i-1,i}$  y  $\Phi_{i,i+1}$ , son representados por las Ecs. (4.19) y (4.20) respectivamente, mientras que el calor generado en el nodo  $i$   $\Phi_{i,i}$  está representado por la Ec. (4.21).  $G_{i-1,i}$  ( $G_{i,i+1}$ ) es la conductancia térmica dependiente de la temperatura del material (en W/K) entre los nodos  $i - 1$  e  $i$  ( $i$  y  $i + 1$ ) con temperaturas  $T_{i-1}$  y  $T_i$  ( $T_i$  y  $T_{i+1}$ ), respectivamente.

Con respecto a la Ec. (4.21), el calor disipado en la capa  $i$  de la cinta  $Q_i^a$  está representado por la Ec. (4.14) en Watts, presentada anteriormente, calculado a partir de las resistencias obtenidas con las temperaturas de la iteración previa.  $\mathcal{V}_i$  es el volumen de la capa respectiva,  $C_i$  es la capacidad térmica de la capa  $i$ , igual a  $C_i = \gamma_i \varsigma_i t h_i w l_{th}$ , donde  $\varsigma_i$  es la capacidad calorífica de la cinta, en J/(kgK), mientras que  $\gamma_i$  es la densidad del material, en kg/m<sup>3</sup>. Los superíndices  $a$  y  $n$  indican las temperaturas del paso iterativo anterior y actual, respectivamente.  $\Delta t$  es el paso de tiempo del método numérico empleado, el cual fue definido como  $\Delta t = 0.05$  ms para las simulaciones realizadas en este trabajo [72].

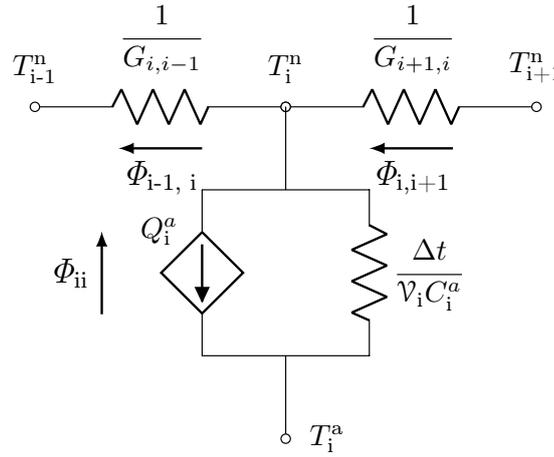
$$\Phi_{i-1,i} = G_{i-1,i} (T_{i-1} - T_i) \quad (4.19)$$

$$\Phi_{i,i+1} = G_{i,i+1} (T_i - T_{i+1}) \quad (4.20)$$

$$\Phi_{i,i} = Q_i^a + \frac{\mathcal{V}_i C_i^a}{\Delta t} (T_i^n - T_i^a) \quad (4.21)$$

En el Apéndice B del presente trabajo se tienen las funciones que representan la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la resistividad eléctrica como función de la temperatura de diversos materiales, obtenidas a partir del ajuste de datos experimentales.

La Fig. 4.7 muestra el circuito térmico equivalente de la transferencia de calor en una capa  $i$  de la cinta, en el cual se representa la temperatura actualizada en el nodo  $i$  en un tiempo  $t$ , denotada por  $T_i^n$ , a partir de la temperatura anterior en el tiempo  $t - \Delta t$ , denotada por  $T_i^a$ , y la temperatura en los nodos vecinos ( $i - 1, i + 1$ ) en el tiempo  $t$ . En el circuito se representa el flujo de calor entre las capas adyacentes al nodo  $i$  y el calor interno generado en el nodo a través de conductancias térmicas representadas en el circuito.



**Fig. 4.7:** Modelo térmico de una capa de la cinta.

En forma matricial, la ecuación de balance de potencia se representa con la Ec. (4.22), la cual se desarrolla a partir de la Ec. (4.15), donde  $\mathbf{T}^n = \{T_1^n, \dots, T_6^n\}$  es el vector de temperaturas actualizadas en el tiempo  $t$ ,  $\mathbf{C}^a$  es la matriz diagonal de capacidades caloríficas  $C_i^a$ , dependiente de las temperaturas calculadas en la iteración anterior,  $\mathbf{Q}^a = \{Q_1^a, \dots, Q_6^a\}$  es el vector del calor disipado en las capas que conforman a la cinta en la iteración anterior ( $Q_1^a = Q_6^a = 0$ ),  $\mathbf{G}_b^a = \{G_{01}^a, 0 \dots 0, G_{67}^a\}$  es la matriz de conductancias térmicas calculada en el tiempo  $t - \Delta t$ , obtenida con la Ec. (4.23).  $\mathbf{T}_{\text{ref}} = \{T_{\text{ref}}, 0 \dots 0, T_{\text{ref}}\}$  es el vector de las temperaturas en la frontera, con  $\mathbf{T}_{\text{ref}} = 77$  K.

$$\mathbf{T}^n \simeq (\mathbf{C}^a + \Delta t \mathbf{G}^a)^{-1} (\mathbf{C}^a \mathbf{T}^a + \Delta t [\mathbf{G}_b^a \mathbf{T}_{\text{ref}} + \mathbf{Q}^a]) \quad (4.22)$$

$$\mathbf{G}^a = \begin{bmatrix} -G_{02} & G_{12} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ G_{21} & -G_{13} & G_{23} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{i-1,i+1} & -G_{i-1,i+1} & G_{i-1,i+1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & G_{5,4} & -G_{4,6} & G_{5,6} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & G_{6,5} & -G_{57} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (4.23)$$

Los términos de la matriz de conductancias térmicas de la cinta  $G_{i,i+1}$  y  $G_{i+1,i}$  se obtienen con la Ec. (4.24), donde  $th_i$  y  $k_i$  son el espesor y la conductancia térmica de la capa  $i$  de la cinta, respectivamente, mientras que  $w$  es el ancho y  $l_{tp}$  es la longitud de la cinta empleada. El término  $G_{i,i}$ , perteneciente a la diagonal principal de la matriz de conductancias térmicas, está representado en la Ec. (4.25). Las Ecs. (4.26) y (4.27) representan las conductancias térmicas entre las capas externas de la cinta y el LN<sub>2</sub> circundante  $G_{01}$  y  $G_{67}$ , donde  $T_0 = T_7 = T_{ref}$ , mientras que  $q$  es el flujo de calor a través de las capas aislantes de la cinta 1 y 6 hacia el LN<sub>2</sub> en los nodos 0 y 7, en W/m<sup>2</sup> [86].

$$G_{i,i+1} = G_{i+1,i} = \frac{2wl_{tp}}{\frac{th_i}{k_i} + \frac{th_{i+1}}{k_{i+1}}} \quad (4.24)$$

$$G_{i-1,i+1} = G_{i-1,i} + G_{i,i+1} \quad (4.25)$$

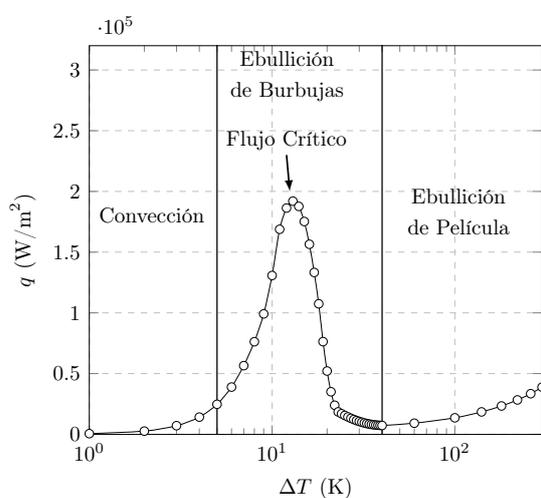
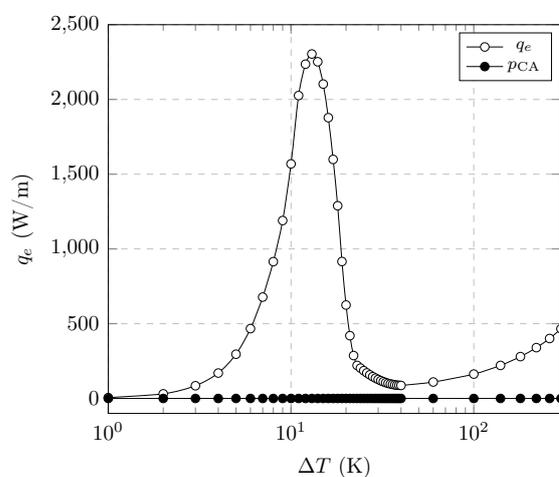
$$G_{01} = \frac{wl_{tp}q(T)}{T_{ref} - T_0} \quad (4.26)$$

$$G_{67} = \frac{wl_{tp}q(T)}{T_{ref} - T_6} \quad (4.27)$$

La evolución del flujo de calor  $q$  entre la superficie de la cinta a temperatura  $T$  y el nitrógeno líquido circundante a  $T_{ref} = 77$  K se muestra en la Fig. 4.8(a), la cual se conoce como curva de enfriamiento del LN<sub>2</sub> y fue obtenida en condiciones de estado estable en cobre desnudo [60]. Se espera un buen enfriamiento durante el régimen transitorio en el caso de estudio, a pesar de la delgada capa de aislamiento que cubre la cinta [87]. La curva de enfriamiento considera tres etapas [88]:

- Convección: El calor generado por la superficie es transferido a través del movimiento natural del nitrógeno líquido sobre la superficie, debido a un incremento en la temperatura del fluido.
- Ebullición de burbujas: El calor es transferido gracias a un cambio de fase en el fluido cercano a la superficie que genera calor, con la producción de vapor en forma de burbujas. En esta etapa, el coeficiente de convección alcanza el valor máximo llamado flujo crítico y la transferencia de calor depende en parte de la velocidad de producción de burbujas sobre la superficie.
- Ebullición de película: Después del flujo crítico, la producción de vapor es tan grande que las burbujas colapsan y forman una cubierta o película de vapor encima de la superficie que genera calor, actuando como aislante térmico, por lo que el calor es transferido al fluido a través de la conducción térmica en la película generada. En esta etapa, el coeficiente de convección disminuye.

En la Fig. 4.8(b) se muestra una comparación entre la potencia extraída por el LN<sub>2</sub> a un metro de cinta superconductora SF12100 a una temperatura  $T$  ( $T_{\text{ref}} = 77$  K), denotada por  $q_e$ , con las pérdidas en CA en un metro de cinta, las cuales se obtienen de la Tabla 4.2, considerando que por la cinta fluye el 100 % de la corriente crítica ( $I_c = 300$  A) y un ajuste de pérdidas a una frecuencia de 60 Hz [41]. La potencia extraída  $q_e$  se obtiene a partir de la curva de enfriamiento del LN<sub>2</sub> con una  $T_{\text{ref}} = 77$  K mostrada en la Fig. 4.8(a), considerando un ancho de cinta de  $w = 0.012$  m ( $q_e = q \times w$ ). Se observa que aún para una corriente cercana al 100 % de  $I_c$  las pérdidas en corriente alterna son mínimas con respecto al enfriamiento de la cinta, por lo que las pérdidas en corriente alterna en el superconductor en régimen nominal pueden despreciarse.

(a) *Flujo de calor del LN<sub>2</sub>.*(b) *Potencia extraída por el LN<sub>2</sub>.*

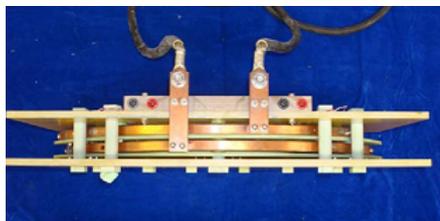
**Fig. 4.8:** a) Evolución del flujo de calor  $q$  entre la superficie del aislamiento de la cinta a temperatura  $T$  y el LN<sub>2</sub> circundante a  $T_{\text{ref}} = 77$  K [60]. b) Comparación entre la potencia extraída por el LN<sub>2</sub>  $q_e$  a  $T_{\text{ref}} = 77$  K con las pérdidas en CA  $p_{CA}$  en un metro de cinta superconductora SF12100.

## Validación del modelo genérico

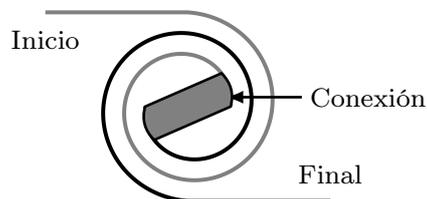
En este capítulo se presenta la validación del modelo genérico propuesto con los resultados teóricos y experimentales obtenidos de la literatura. Además, se presenta la validación del modelo con los resultados experimentales de las pruebas de cortocircuito aplicadas a un LCF-R experimental, realizado y llevado a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo CARSO, obteniéndose buenos resultados.

### 5.1. Validación del modelo genérico con resultados obtenidos de la literatura

Para validar el modelo propuesto se utilizaron los datos experimentales obtenidos de las pruebas de cortocircuito en CA aplicadas a un diseño particular de LCF-R, presentados en [22], con corrientes pico de 5 kA, 20 kA y 30 kA, junto con los resultados teóricos obtenidos con el modelo citado en la literatura. En la Fig. 5.1(a) se tiene el módulo del LCF-R de prueba, construido con una bobina bifilar fabricada de cintas G2 SF12100, descritas previamente en la sección 4.1, con la geometría mostrada en la Fig. 5.1(b). Las terminales de la bobina se conectan en paralelo con una resistencia de derivación localizada dentro del crióstato [22, 45].



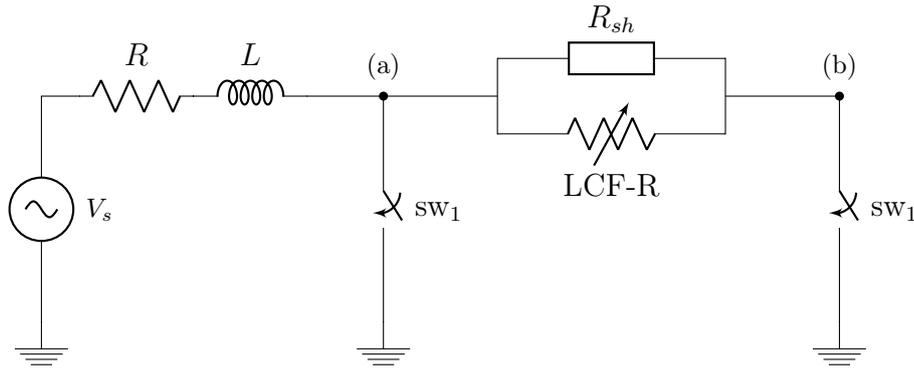
(a) *Módulo del LCF-R [45].*



(b) *Bobina bifilar [22].*

**Fig. 5.1:** a) Componente del LCF-R analizado. b) Bobina bifilar de cintas G2 utilizada en el módulo del LCF-R analizado [22, 45].

En la Fig. 5.2 se muestra el circuito de prueba equivalente para obtener las corrientes de cortocircuito para cada uno de los casos de estudio, donde  $V_s$  representa el voltaje de la fuente de prueba,  $sw_1$  representa el interruptor para generar las corrientes de cortocircuito,  $R$  es la resistencia y  $L$  es la inductancia equivalentes del circuito de prueba [22, 89, 90]. El paréntesis (a) indica la obtención de la corriente de cortocircuito sin el LCF-R conectado, mientras que el paréntesis (b) indica la prueba realizada con el LCF-R conectado.



**Fig. 5.2:** Circuito de prueba del LCF-R para las pruebas realizadas en [22].

En la Tabla 5.1 se presentan los parámetros del circuito de prueba para obtener las corrientes de cortocircuito para cada uno de los casos, en los cuales se empleó un voltaje  $V_s$  igual a 200 V RMS [22]. La Tabla 5.2 resume los parámetros de diseño relevantes del LCF-R para realizar las simulaciones con el modelo genérico y con el modelo presentado en [22]. A diferencia con el modelo de la literatura, en el modelo genérico se consideró una resistencia de derivación localizada en el exterior del crióstato, con el fin de reducir el consumo del nitrógeno líquido al ocurrir un cortocircuito [48]. En el modelo genérico se utilizó la curva de enfriamiento mostrada en la Fig. 4.8(a).

**Tabla 5.1:** Parámetros del circuito de prueba para obtener las corrientes de cortocircuito presentadas en [22].

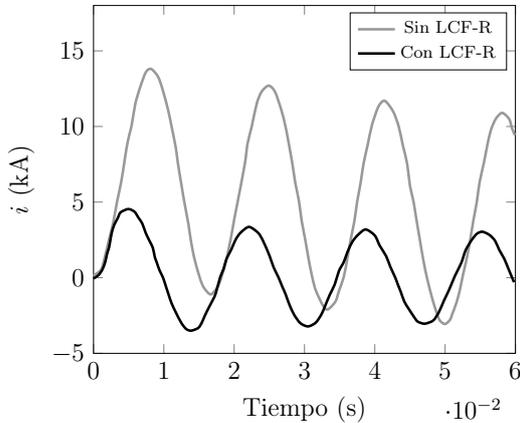
Corriente de falla	Parámetros del Sistema	
	Resistencia $R$	Inductancia $L$
(kA)	(m $\Omega$ )	(mH)
5	1.1	0.105
20	0.61	0.0253
30	0.52	0.0165

**Tabla 5.2:** Parámetros utilizados en la validación del modelo genérico con los datos experimentales y el modelo citado en [22].

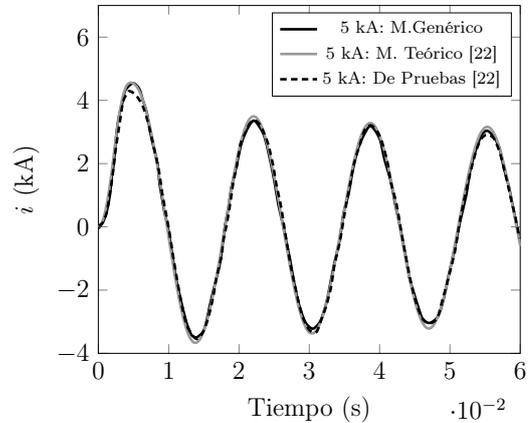
Parámetro	Valor		Unidad
	Modelo Genérico	Literatura	
Valor de la resistencia de derivación	0.12	0.11*	$\Omega$
Número de cintas en paralelo	4	4	-
Longitud de la cinta	8.6	8.6	m

\* Calculada a partir de la resistividad eléctrica del acero inoxidable a 77 K, considerando cintas con longitud de 6 m y sección transversal de  $28.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  [22].

En las Figs. 5.3, 5.4 y 5.5 se muestra la comparación entre los resultados del modelo genérico, los datos experimentales y los resultados del modelo presentado en la literatura para las pruebas con corrientes de cortocircuito de 5 kA, 20 kA y 30 kA, respectivamente, teniendo en cuenta los parámetros mostrados en las Tablas 5.1 y 5.2. Las corrientes de cortocircuito se eligieron con base en las especificaciones de cortocircuito requeridas para una planta de generación de carbón [42].



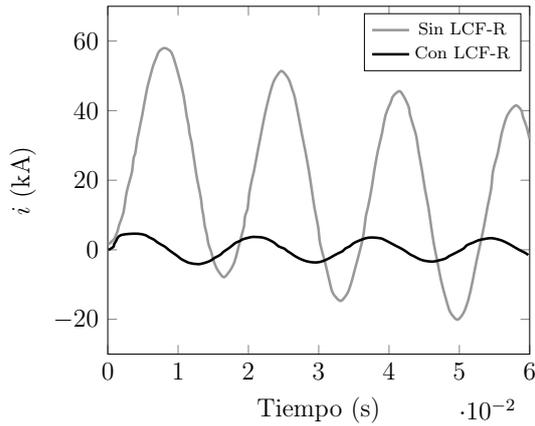
(a) *Corrientes de prueba.*



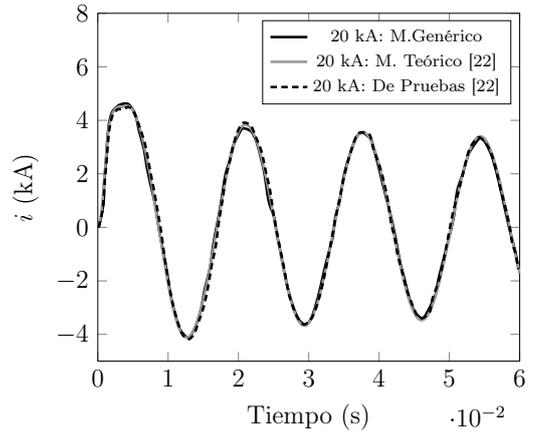
(b) *Corrientes en el LCF-R.*

**Fig. 5.3:** Validación del modelo genérico contra los datos experimentales y el modelo citado en la literatura para una corriente de falla pico de 5 kA [22]: a) Corrientes de falla con y sin LCF-R. b) Comparación entre las corrientes limitadas experimental y teórica (modelo genérico y de literatura).

A pesar de la generalidad del modelo propuesto y de las diferencias con respecto al modelo presentado en la literatura, se tienen resultados con una buena aproximación, con un error máximo de la corriente pico del 2% en todos los casos de estudio, ajustando el valor de la resistencia de derivación dentro de un 9% del valor calculado en [22].

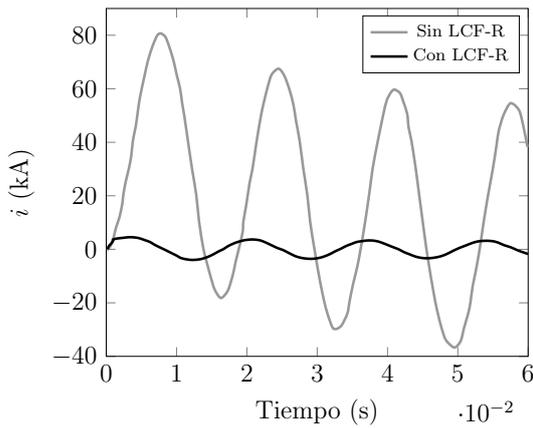


(a) *Corrientes de prueba.*

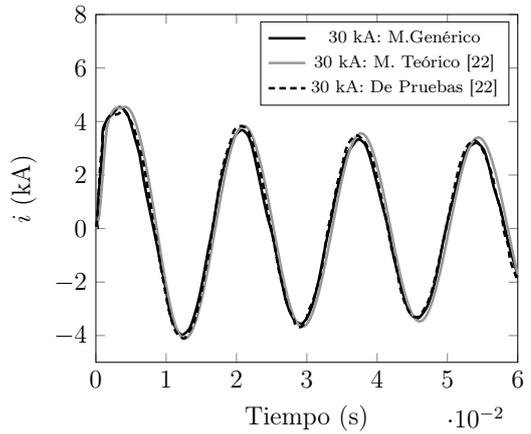


(b) *Corrientes en el LCF-R.*

**Fig. 5.4:** Validación del modelo genérico con una corriente de falla pico de 20 kA: a) Corrientes de falla con y sin LCF-R. b) Comparación entre las corrientes limitadas experimental y teórica (modelo genérico y [22]).



(a) *Corrientes de prueba.*



(b) *Corrientes en el LCF-R.*

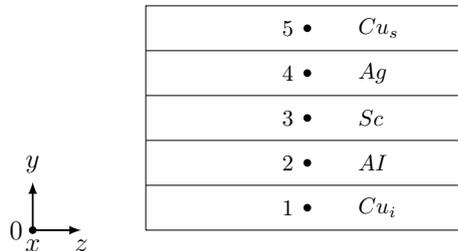
**Fig. 5.5:** Validación del modelo genérico con una corriente de falla pico de 30 kA: a) Corrientes de falla con y sin LCF-R. b) Comparación entre las corrientes limitadas experimental y teórica (modelo genérico y [22]).

## 5.2. Validación del modelo genérico con resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados experimentales de las pruebas de cortocircuito en corriente alterna aplicadas a un modelo físico del LCF-R, realizado y llevado a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo CARSO, el cual consiste en una bobina bifilar de geometría axial fabricada con cintas de YBCO con estabilizador de cobre. Los resultados experimentales fueron comparados con los resultados conseguidos con el modelo genérico, obteniéndose buenos resultados.

### 5.2.1. Caracterización de las cintas superconductoras

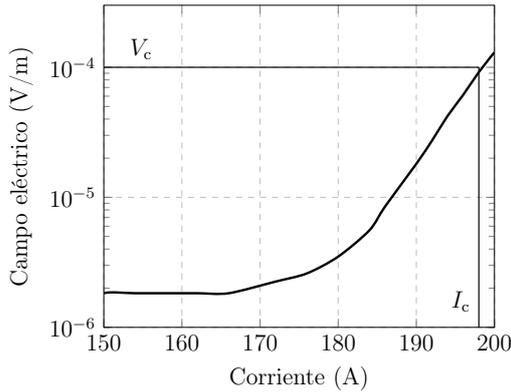
Para la fabricación del modelo físico del LCF-R se emplearon cintas superconductoras de alta temperatura G2 SCN04150, de la marca SuNAM, con estabilizador de cobre y sección transversal de  $4.1 \times 0.15$  mm, temperatura crítica  $T_c$  de 91 K (corriente de 0 A), radio mínimo de curvatura  $r_m$  de 25 mm y factor  $n_0$  de 21 ( $T_{ref} = 77$  K) [67, 71, 77]. La Fig. 5.6 muestra las capas que conforman a la cinta, las cuales están compuestas por los siguientes materiales y espesores: plata  $Ag$  de  $0.60 \mu\text{m}$ , YBCO  $Sc$  de  $1.3 \mu\text{m}$ , acero inoxidable  $AI$  de  $100 \mu\text{m}$  y dos capas superior e inferior de cobre  $Cu$  de  $20 \mu\text{m}$  cada una [67, 91, 92].



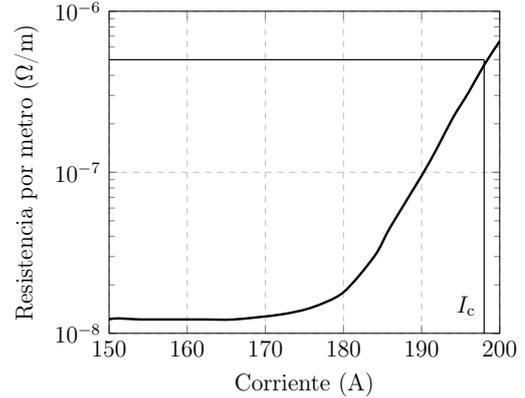
**Fig. 5.6:** Detalle de las diferentes capas de la cinta G2: cobre superior  $Cu_s$ , plata  $Ag$ , superconductor  $Sc$ , acero inoxidable  $AI$  y cobre inferior  $Cu_i$ .

Se realizó la caracterización de muestras de 12 cm de longitud de la cinta superconductora SCN04150, con un voltaje crítico  $V_c$  de  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  [76], de la cual se obtuvieron las curvas de voltaje-corriente ( $V - I$ ) y resistencia eléctrica-corriente ( $R - I$ ) por metro de cinta superconductora mostradas en la Fig. 5.7. Con base en las curvas de caracterización obtenidas, se encontró que la cinta superconductora se degrada con corrientes superiores cercanas a la corriente crítica (10% por encima de  $I_c$ ), por lo que se conectó una cinta de cobre con sección transversal de  $4 \times 0.26$  mm en paralelo con la muestra de la cinta superconductora con el fin de ampliar el rango de corriente por encima de  $I_c$  [93].

En la Fig. 5.8 se muestran las curvas de caracterización obtenidas con muestras de las cintas SCN04150-01 y SCN04150-02, con cinta adicional de cobre. De los resultados, se obtuvo una corriente crítica para la muestra de la cinta SCN04150-01  $I_{c0}$  ( $T_{ref} = 77$  K, SF\*) igual a 199 A, mientras que para la muestra de la cinta SCN04150-02 se obtuvo una corriente crítica  $I_{c0}$  ( $T_{ref} = 77$  K, SF\*) igual a 180 A.

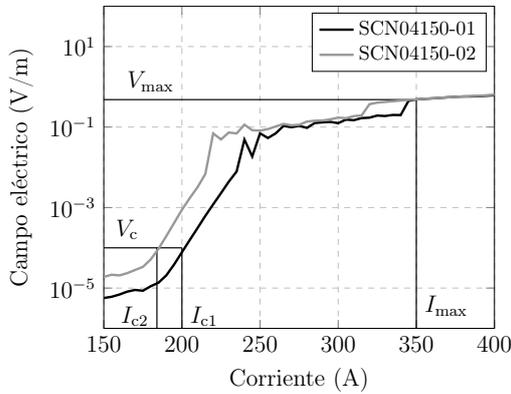


(a) **Campo eléctrico.**

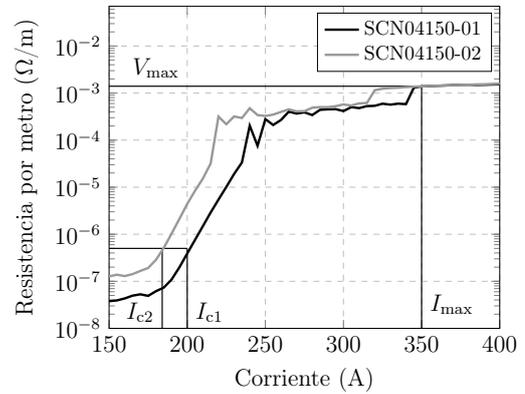


(b) **Resistencia por metro.**

**Fig. 5.7:** Caracterización de la muestra de cinta G2 SCN04150-01: a) Campo eléctrico vs corriente. b) Resistencia por metro vs corriente.



(a) **Campo eléctrico.**



(b) **Resistencia por metro.**

**Fig. 5.8:** Caracterización de las muestras de cinta G2 SCN04150-01 y SCN04150-02 con cinta adicional de cobre: a) Campo eléctrico vs corriente. b) Resistencia por metro vs corriente.

\*Temperatura de referencia  $T_{ref} = 77$  K. SF Campo magnético propio SF (Self field).

Las curvas de caracterización mostradas en la Fig. 5.8 presentan los estados normal y superconductor de la cinta, los cuales son muy similares a los estados presentados en la Fig. 3.7 de la sección 3.2, con una transición suave entre el estado superconductor y el estado normal debida a las propiedades de la cinta superconductora [64]. La muestra soportó corrientes mayores al doble de la corriente crítica de la cinta  $I_c$ , debido a que durante la transición al estado normal del superconductor al superarse  $I_c$ , gran parte de la corriente fluye por el estabilizador adicional y el estabilizador propio de la cinta.

A partir de los resultados obtenidos de la caracterización de las muestras de las cintas superconductoras empleadas, se definieron los valores máximos de operación de la cinta con estabilizador adicional de cobre mostrados en la Tabla 5.3, los cuales son útiles para definir los límites de operación del modelo del LCF-R. Dentro de los valores máximos definidos, la corriente máxima  $I_{\max}$  es superior al 150% del valor de la corriente  $I_c$ , lo que permite la transición al estado normal del superconductor sin que se dañe la cinta superconductora, ya que el estabilizador adicional de cobre permite ampliar el rango de operación de corriente por encima de  $I_c$ .

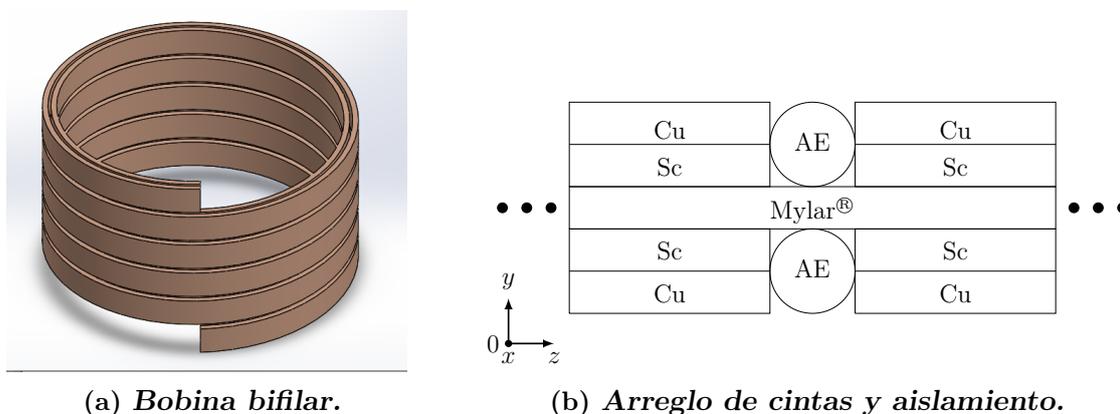
Con la corriente  $I_{\max}$  se calcula el voltaje máximo por metro de cinta  $E_{\max}$ , obtenido a partir del voltaje máximo obtenido en la cinta analizada, además de la resistencia máxima por metro  $R_{\max}$ , debida principalmente al estabilizador adicional de cobre y al estabilizador propio de la cinta.

**Tabla 5.3:** Valores máximos de operación obtenidos con la caracterización en CD de las muestras de cintas G2 con estabilizador adicional de cobre.

Parámetro	Valor	Unidad
Corriente máxima, $I_{\max}$	350	A
Voltaje máximo por metro, $E_{\max}$	0.48	V/m
Resistencia máxima por metro, $R_{\max}$	1.4	m $\Omega$ /m

### 5.2.2. Construcción del LCF-R

Para la fabricación del modelo físico del LCF-R se empleó una bobina bifilar de geometría axial, que consiste en dos bobinas concéntricas enrolladas en el mismo sentido y conectadas en serie en un extremo, las cuales forman capas interior y exterior, como se muestra en la Fig. 5.9(a), con el fin de que los campos magnéticos se compensen y reducir la inductancia de la bobina al mínimo posible. La bobina se fabricó sobre un carrete de Nylamid<sup>®</sup>, que es un material plástico resistente a las temperaturas criogénicas, perforado con el fin de mejorar el intercambio de calor entre el nitrógeno líquido y la bobina.



**Fig. 5.9:** a) Bobina bifilar. b) Arreglo de cintas y aislamiento en la bobina bifilar, donde: cobre Cu, superconductor Sc y alambre esmaltado AE.

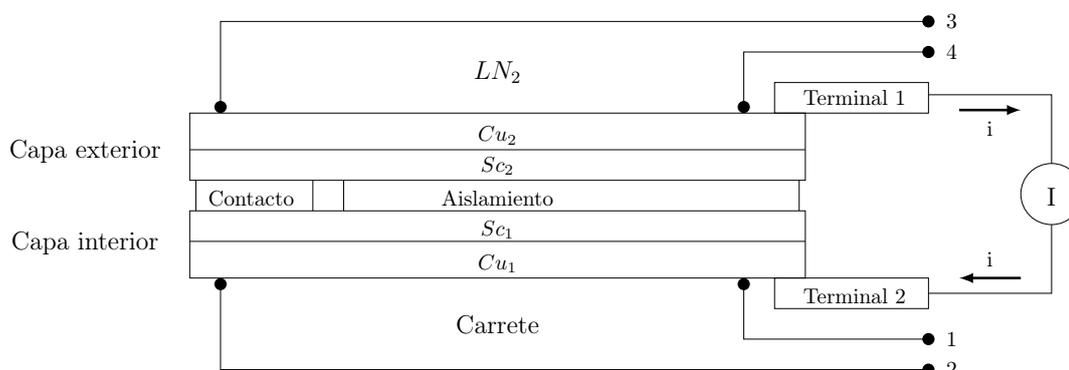
La bobina se fabricó con cinta superconductora G2 SCN04150 sin aislamiento, con una longitud total de 70 m. En la capa interior de la bobina bifilar se empleó la cinta SCN04150-01 ( $I_{c0}$  ( $T_{\text{ref}} = 77$  K, SF\*) = 199 A), mientras que en la capa exterior de la bobina se empleó la cinta SCN04150-02 ( $I_{c0}$  ( $T_{\text{ref}} = 77$  K, SF\*) = 180 A). Las capas que conforman a la bobina bifilar fueron separadas y aisladas con Mylar<sup>®</sup>, que es un material dieléctrico que soporta temperaturas cercanas a los 77 K [94].

En la Fig. 5.9(b) se muestra el arreglo de las cintas superconductoras, las cintas de cobre y el aislamiento. Tal como se describió en la sección 5.2.1, la cinta superconductora requiere de un estabilizador adicional para soportar corrientes mayores que  $I_c$ , por lo que se conectó en paralelo sobre la cinta superconductora desnuda una cinta de cobre con sección transversal de  $4 \times 0.26$  mm. Se utilizó alambre esmaltado para separar las cintas sin aislamiento, el cual está cubierto de barniz aislante y además funciona como sensor de voltaje en las terminales de modelo de LCF-R para realizar las pruebas correspondientes.

### 5.2.3. Mediciones en corriente directa

Se utilizó el método de cuatro puntos para realizar la caracterización del modelo del LCF-R en corriente directa [58]. Las terminales de la fuente de corriente directa se conectaron en serie con el modelo del LCF-R y los sensores de voltaje se colocaron en las terminales del modelo como se presenta la Fig. 5.10, donde se indica la caracterización de las capas interior y exterior que conforman a la bobina bifilar del LCF-R.

\*Temperatura de referencia  $T_{\text{ref}} = 77$  K. SF Campo magnético propio SF (Self field).



**Fig. 5.10:** Diagrama eléctrico de la conexión de los sensores de voltaje del modelo del LCF-R (Cortesía CIDEC).

Con el propósito de obtener las características de voltaje en las capas interior y exterior del LCF-R, se realizaron las siguientes conexiones:

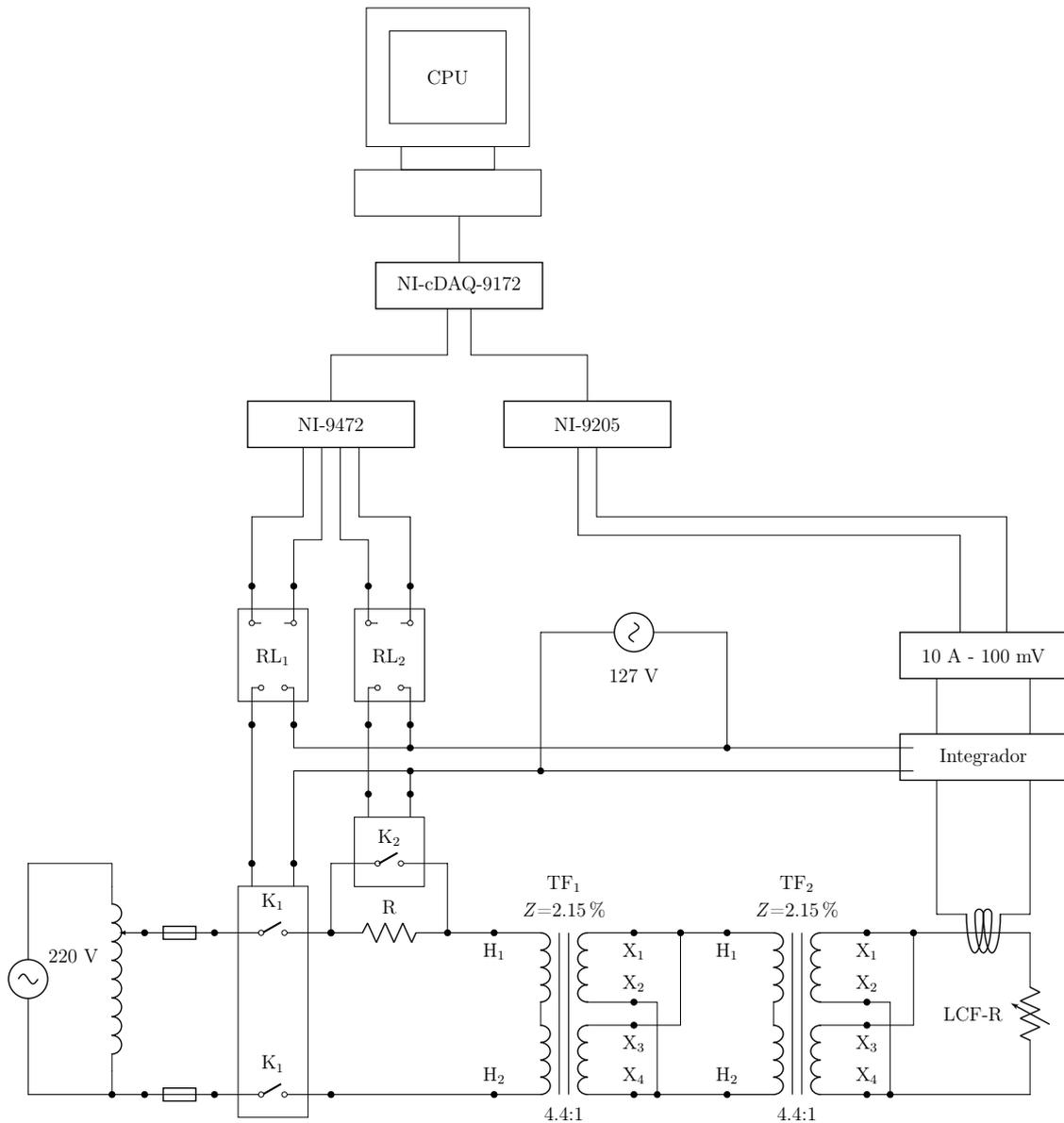
1. Sensores 1-2, Voltaje  $U_{12}$  de la capa interior.
2. Sensores 3-4, Voltaje  $U_{34}$  de la capa exterior.
3. Sensores 1-4, Voltaje  $U_{14}$  de la capa interior + Contacto + capa exterior.

#### 5.2.4. Mediciones en corriente alterna

La Fig. 5.11 muestra el circuito empleado para realizar las pruebas de corto circuito del LCF-R en corriente alterna. El circuito está conformado por los siguientes elementos:

1. Fuente de corriente alterna ajustable y regulada, alimentada con 220 V. El voltaje de salida se ajusta a través de un autotransformador.
2. Resistor  $R$  de  $10 \Omega$ , el cual es una carga resistiva con la que se obtiene la corriente nominal del circuito.
3. Contactor magnético  $K_1$ , cuya función es interrumpir la alimentación de la fuente y es accionado a través del relevador  $RL_1$ .
4. Contactor magnético  $K_2$ , cuya función es cortocircuitar el resistor  $R$  y así proporcionar la corriente de cortocircuito del sistema. Es accionado a través del relevador  $RL_2$ .
5. Relevadores electrónicos de estado sólido  $RL_1$  y  $RL_2$ , cuya función es controlar las aperturas y cierres de los contactores magnéticos  $K_1$  y  $K_2$  respectivamente.

6. Transformadores  $TF_1$  y  $TF_2$  conectados en cascada, cuya función es proporcionar la impedancia de cortocircuito del sistema y los niveles de corriente y voltaje requeridos por el modelo del LCF-R. Los transformadores son del tipo sumergido en aceite y tienen voltajes de entrada y de salida de 440 V y 100 V respectivamente, potencia nominal de 37.5 kVA, impedancia de 2.15 % y eficiencia de 98 %, según la placa de datos de los transformadores [95, 96].



**Fig. 5.11:** Diagrama eléctrico del circuito de pruebas para el LCF-R, donde  $Z$  es la impedancia en % de cada transformador (Cortesía CIDEC).

7. Bobina Rogowsky, la cual registra la corriente que circula a través del LCF-R en estado normal y en condiciones de falla [97].
8. Integrador, cuyo fin es convertir la señal obtenida con la bobina Rogowsky a una señal de corriente.
9. Resistencia de derivación de 10 A - 100 mV, la cual suministra una señal de voltaje proporcional a la corriente que circula a través de sus terminales, con el fin de tener señales adecuadas para la tarjeta de adquisición de datos NI-9205.
10. Módulo de salida digital NI-9472 de National Instruments<sup>®</sup>, cuyo objetivo es controlar los relevadores RL<sub>1</sub> y RL<sub>2</sub> con las señales enviadas desde el CPU.
11. Módulo de adquisición de datos NI-9205 de National Instruments<sup>®</sup>.
12. Chasis de módulos diversos NI-cDAQ-9172 de National Instruments<sup>®</sup>, conectado vía USB a la PC, el cual comunica la PC con los módulos de control digital y de adquisición de datos.

### 5.2.5. Resultados de las pruebas con corriente directa

Con base en los datos de caracterización de la bobina bifilar del LCF-R, se encontraron los valores de corriente crítica presentados en la Tabla 5.4. La diferencia entre los valores presentados para las capas interior y exterior se debe a que los dos lotes de cinta SCN04150 tienen diferentes corrientes críticas, como lo mostraron los resultados obtenidos con las muestras presentados en las Fig. 5.8.

**Tabla 5.4:** Resultados principales de la caracterización del LCF-R con corriente directa.

Bobina	Interna	Externa	Total	Unidades
Conexiones	1-2	3-4	1-4	-
$I_c$	180	169.85	171.68	A
longitud	35	35	70	m

Las corrientes críticas presentada por los proveedores de la cinta son las siguientes [67]:

- Cinta SCN04150-01:  $I_{c0}$  mínima\* = 187 A.  $I_{c0}$  máxima\* = 212 A.  $I_{c0}$  promedio\* = 199 A.
- Cinta SCN04150-02:  $I_{c0}$  mínima\* = 161 A.  $I_{c0}$  máxima\* = 192 A.  $I_{c0}$  promedio\* = 180 A.

---

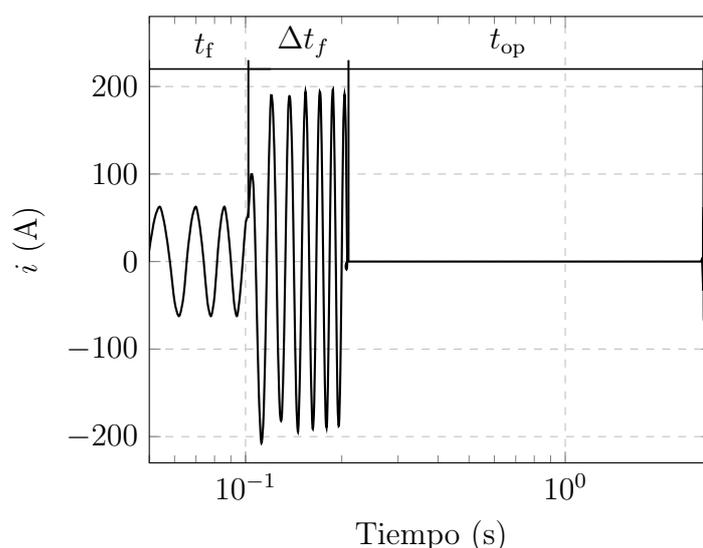
\*Temperatura de referencia  $T_{ref} = 77$  K. SF Campo magnético propio SF (Self field).

Con respecto a los valores de  $I_c$  presentados en la Tabla 5.4 y a los valores dados por el fabricante en las hojas de especificaciones, se tiene que la corriente crítica de la bobina es superior al menor valor de  $I_c$  presentado, correspondiente a la capa externa de la bobina bifilar, lo cual se debe a la soldadura que une a las dos capas que conforman a la bobina, la cual tiene un voltaje en condiciones normales de operación por debajo de  $I_c$ .

### 5.2.6. Corriente alterna

En esta sección se presentan los resultados de medición de corriente de cortocircuito con y sin LCF-R conectado al sistema de corriente alterna a 60 Hz, presentado en la Fig. 5.11. En la Fig. 5.12 se muestra el esquema de apertura y cierre de los interruptores  $K_1$  y  $K_2$  para obtener la corriente de falla con el LCF-R conectado en el circuito de prueba, los cuales son accionados por un circuito de disparo controlado desde la computadora. La secuencia de operaciones de los interruptores para la realización de la prueba de corriente de falla es la siguiente:

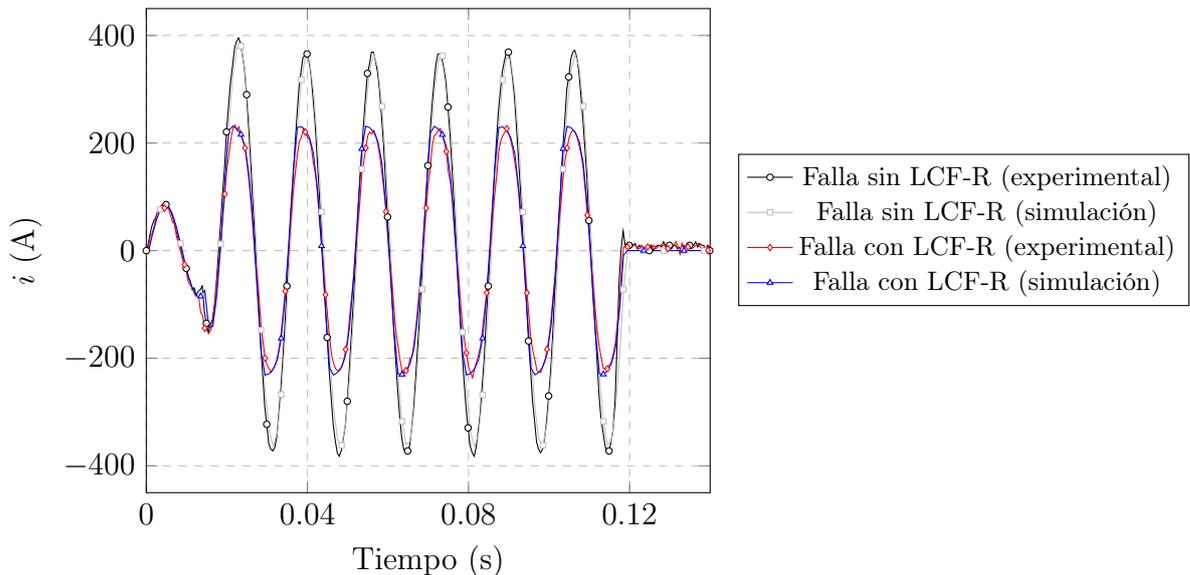
1.  $K_1$  cerrado,  $K_2$  abierto: Se tiene la corriente nominal en el sistema hasta el momento de la falla en el tiempo  $t_f$ .
2.  $K_1$  cerrado,  $K_2$  cerrado: Se tiene la corriente de falla, con un tiempo de duración  $\Delta t_f$ .
3.  $K_1$  abierto,  $K_2$  abierto: Se desconecta la alimentación principal del circuito, con un tiempo  $t_{op}$ .



**Fig. 5.12:** Esquema de apertura y cierre de los interruptores del circuito de prueba.

Es importante el modelado del comportamiento térmico del LCF-R, con el fin de verificar la evolución de la corriente durante la falla y en el proceso de recuperación del LCF-R, además de poder determinar si la corriente puede regresar a su valor nominal después de la falla y cuanto tiempo se requiere. Para realizar las pruebas de corto circuito se tiene una corriente nominal  $I_n = 62 A_{RMS}$  ( $87.7 A_{pico}$ ) y un voltaje en las terminales de la fuente ajustable  $V_{0n} = 36 V_{RMS}$ . La falla se aplicó en un tiempo  $t_f$  igual a 0.012 s, lo que corresponde a tres cuartos de un ciclo eléctrico aproximadamente, con un ciclo de 0.016 s. El instante en el que ocurre la falla dentro del ciclo eléctrico determina la magnitud y la duración de la corriente transitoria, junto con la relación R/L de la resistencia e inductancia equivalentes del circuito de pruebas.

En la Fig. 5.13 se muestran las corrientes de falla obtenidas con el circuito experimental y con el circuito de prueba en Matlab-Simulink<sup>®</sup> con el módulo Simscape, utilizando los parámetros definidos en el circuito de pruebas, incluyendo el tiempo en el que ocurre la falla. Se observa que tanto la falla experimental como la falla simulada coinciden, con lo que se valida el circuito de prueba simulado. Como se muestra en la Fig. 5.13, la corriente transitoria durante la falla tiene una duración de un ciclo eléctrico aproximadamente, debido a la resistencia total en el circuito de prueba, la cual es la suma de las resistencias de los elementos que lo conforman (terminales, cables y transformadores principalmente), por lo que la relación R/L de la resistencia e inductancia equivalentes del circuito de prueba es cercana a la unidad, con lo que se tienen corrientes transitorias de falla de corta duración [95, 98].



**Fig. 5.13:** Comparación entre las corrientes de cortocircuito con y sin LCF-R, obtenidas del experimento realizado y del modelo genérico.

Los transformadores utilizados en las pruebas en corriente alterna tienen valores bajos de eficiencia e impedancia de cortocircuito ( $\eta = 98\%$  y  $Z = 2.15\%$ ), por lo que su resistencia es considerable, a diferencia de los transformadores de mayor potencia ( $CNT > 500$  kVA,  $CNT =$  capacidad nominal del transformador, en kVA), los cuales tienen eficiencias e impedancias altas, por lo que son predominantemente inductivos y se presentan corrientes transitorias de mayor duración durante una falla [95, 98]. Debido a la resistencia extra proporcionada por el LCF-R ante el cortocircuito, se tiene la limitación de la corriente de falla experimental mostrada en la Fig. 5.13, además de la reducción de la duración de la corriente transitoria al inicio de la falla.

Se realizaron simulaciones del comportamiento de la corriente de cortocircuito con el modelo genérico del LCF-R conectado al sistema de prueba, usando los parámetros del LCF-R construido, obteniéndose la corriente limitada mostrada en la Fig. 5.13. Se observa que los resultados experimentales de la corriente limitada por el LCF-R y los resultados obtenidos con el modelo genérico son coincidentes. La Tabla 5.5 resume los resultados experimentales obtenidos de las pruebas de cortocircuito con y sin LCF-R, donde se observa que el LCF-R redujo a un 57.5% la corriente de falla máxima alcanzada durante el primer ciclo eléctrico y redujo a un 59% la corriente de falla máxima alcanzada al final de la falla.

Con la comparación con los resultados obtenidos de la literatura, los resultados experimentales y los resultados del modelo genérico, se comprueba la validez del modelo desarrollado, con lo que se pueden realizarse simulaciones de sistemas eléctricos de potencia con el modelo genérico propuesto, con el fin de predecir el comportamiento del LCF-R cuando interactúa en un sistema eléctrico de potencia ante una falla.

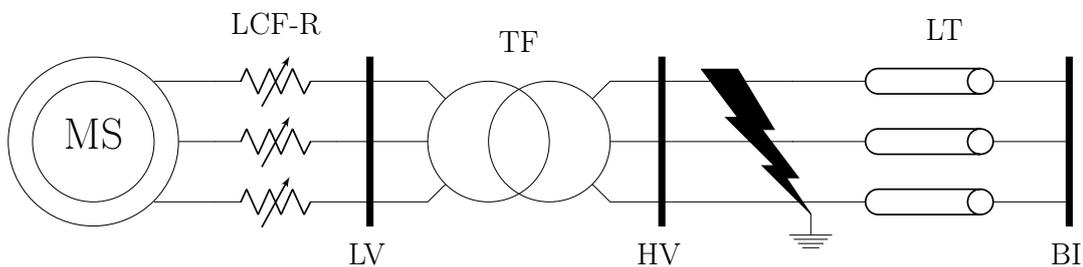
**Tabla 5.5:** Resultados principales de las pruebas de falla realizadas con el LCF-R.

	Sin LCF-R	Con LCF-R	Unidades
Corriente de falla pico $I_{fp}$ máxima	400	230	A
Corriente de falla pico $I_{fp}$ final	372.5	220	A

En este capítulo se presenta el análisis del impacto del LCF-R en la estabilidad de las plantas de generación de potencia eléctrica ante una falla trifásica. A través del modelo genérico validado en el capítulo 5, se analiza el efecto del LCF-R en la estabilidad de un generador síncrono conectado en la red eléctrica ante una falla.

### 6.1. Caso de estudio: Modelo del sistema eléctrico de potencia

La Fig. 6.1 muestra el sistema trifásico bajo estudio, que consiste en un generador síncrono de 1 GVA, el cual se asume que pertenece a una central hidráulica de generación, conectado a una red eléctrica de corriente alterna (CA) de 60 Hz a través de un LCF-R, un transformador elevador conectado en  $\Delta/Y_g$  y una línea de transmisión de 700 km. El generador está equipado con una turbina hidráulica, un gobernador, un regulador de voltaje tipo IEEE 1 para máquinas síncronas, un sistema de excitación y un estabilizador de potencia genérico (PSS) [99]. La red eléctrica es modelada como un bus infinito [98, 100]. La Tabla 6.1 resume los parámetros principales del sistema eléctrico analizado.



**Fig. 6.1:** Sistema trifásico de prueba considerando un LCF-R.

En estado estable, el generador aporta 950 MW a la red, con un factor de potencia de 0.95. La línea de transmisión transporta 903 MW, debido a las pérdidas de potencia activa en el transformador y en la línea de transmisión, lo cual es cercano al límite de cargabilidad de la línea por impedancia (SIL = 977 MW, SIL = Surge impedance loading) [98, 101].

**Tabla 6.1:** Parámetros del sistema eléctrico analizado ( $f = 60$  Hz, con impedancias base de  $0.1904 \Omega$  y  $250 \Omega$  para los lados de baja y alta tensión del transformador, LV y HV respectivamente) [99].

Propiedad	Valor	Unidad
<b>Generador (MS)</b>		
Potencia nominal, $S_G$	1	GVA
Voltaje nominal RMS (línea a línea), $V_G$	13.8	kV
Constante de inercia, $H$	3.7	s
Número de pares de polos, $p$	32	-
Resistencia del estator	$2.9 \cdot 10^{-3}$	pu
Reactancias, $X_d, X'_d, X''_d$	1.31, 0.30, 0.25	pu
Reactancias, $X_q, X''_q, X_l$	0.47, 0.24, 0.18	pu
Constantes de tiempo, $T'_d, T''_d, T''_{qo}$	1.01, 0.05, 0.10	s
<b>Transformador (TF)</b>		
Potencia nominal, $S_{TF}$	1	GVA
Voltaje RMS nominal (LV/HV)	13.8/500	kV
Conexión	$\Delta/Yg$	-
Impedancia de los devanados en baja tensión	0.002	pu
Impedancia de los devanados en alta tensión	$0.002+j0.12$	pu
Impedancia de magnetización	$500+j500$	pu
<b>Línea de transmisión (LT)</b>		
Longitud	700	km
Resistencia positiva de secuencia cero, $R_0$	0.05, 0.605	p.u.
Reactancia inductiva positiva de secuencia cero, $X_{L,0}$	0.923, 3.399	p.u.
Reactancia capacitiva positiva de secuencia cero, $X_{C,0}$	1.139, 1.826	p.u.
<b>Bus infinito (BI)</b>		
Voltaje nominal línea a línea, $V_{BI}$	500	kV

---

## 6.2. Resultados y discusiones

En esta sección se analiza el impacto de dos diseños de LCF-R durante la falla trifásica en el sistema analizado, los cuales se refieren como LCF-R1 y LCF-R2 y difieren solamente en la elección del valor de la resistencia de derivación, como se muestra en la Tabla 6.2. El diseño básico del LCF-R se describe en la sección 4.1 y el modelo correspondiente se muestra en la sección 4.2. Para todos los resultados se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden, con un esquema de paso de tiempo adaptativo, un mínimo paso de tiempo de 0.5 ms y un máximo paso de tiempo de 16.7 ms ( $1/f$ ) [72].

**Tabla 6.2:** Especificaciones para el LCF-R1 y el LCF-R2. Los parámetros de la cinta superconductora utilizada se dan en la Tabla 4.1.

Propiedad	Valor	Unidad
Temperatura de operación, $T_{op} = T_{ref}$	77	K
Número de cintas en paralelo por bobina, $N_{tp}$	225	-
Número de bobinas conectadas en serie, $N_c$	5	-
Longitud total de la cinta, $l_{tp}$	607.5	m
Resistencia de derivación, $R_{sh}^*$	0.5409 / 0.452	p.u.
Resistencia de la unión, $R_j^*$	$2.84 \times 10^{-4}$	p.u.

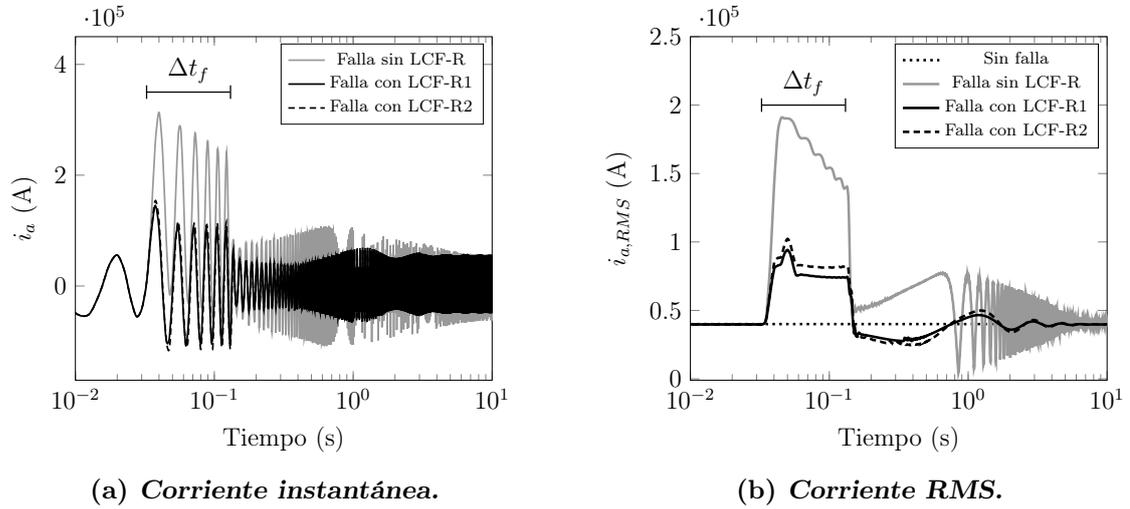
\* LCF-R1 / LCF-R2 ( $R_{sh} = 0.103 / 0.086 \Omega$ ,  $R_j = 54 \times 10^{-6} \Omega$ )

### 6.2.1. Limitación de la corriente de falla

Una falla trifásica a tierra ocurre entre el transformador y la línea de transmisión en un tiempo de  $t = 0.0322$  s, lo que corresponde al momento en que la corriente de la fase “a”  $i_a$  cruza por cero. La resistencia de la falla es de  $1 \text{ m}\Omega$ , con una duración de 0.1 s, lo que corresponde a 6 ciclos eléctricos con la frecuencia de 60 Hz, siendo un tiempo de duración de falla típico para el estudio de transitorios electromecánicos, ya que es un tiempo de respuesta representativo de los sistemas de protección instalados en la red.

La Fig. 6.2(a) muestra las corrientes de falla pico para la fase “a” del sistema con y sin el LCF-R conectado en las terminales del generador síncrono, considerando los casos optimizado y no optimizado con el LCF-R, mientras que la Fig. 6.2(b) muestra las respectivas corrientes RMS. Se observa que el LCF-R proporciona a la red una protección pasiva al limitar la magnitud de la corriente de falla, además de mejorar la estabilidad del generador sin la necesidad de sistemas de control adicionales. Las corrientes máximas

de falla RMS se muestran en la Tabla 6.3.



**Fig. 6.2:** Corrientes para la fase “a”, con y sin LCF-R, para los casos optimizado y no optimizado con el LCF-R: a) Corriente instantánea. b) Corriente RMS.

**Tabla 6.3:** Valores máximos de corriente de falla RMS, voltaje de falla RMS en las terminales del LCF-R y temperatura en el LCF-R, además del tiempo de recuperación por fase para el sistema estudiado.

Fase	“a”	“b”	“c”
$I_{RMS,max}$ (kA)*	190 / 94 / 102	147 / 95 / 102	130 / 91 / 102
$V_{RMS,max}$ (kV)**	6.3 / 6.0	7.2 / 6.6	6.4 / 5.0
$T_{max}$ (K)**	255 / 241	260 / 266	255 / 101
$t_r$ (ms)**	213 / 135	216 / 167	213 / 5

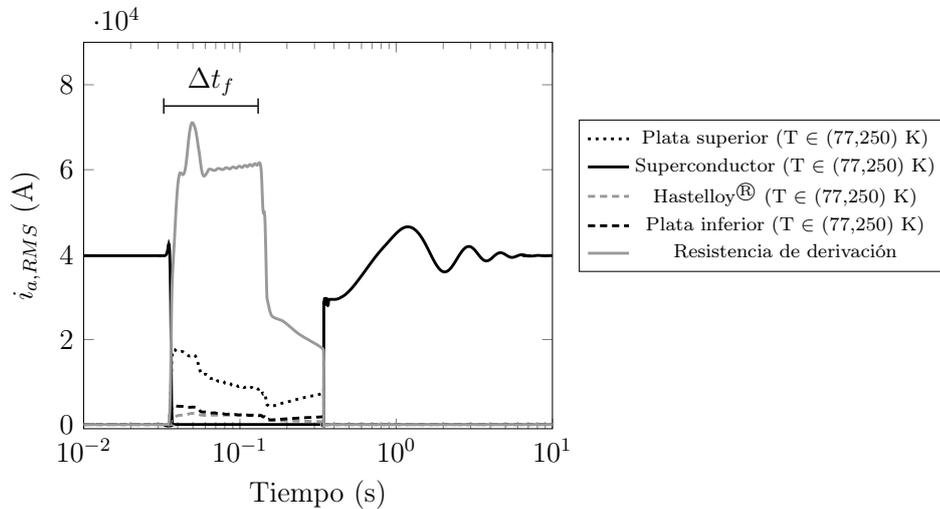
\* sin LCF-R / con LCF-R1 / con LCF-R2

\*\* con LCF-R1 / con LCF-R2

Con el LCF-R1 en la fase “a” del sistema se tiene una limitación superior al 49% de la corriente de falla prospectiva (corriente de falla obtenida sin el LCF-R conectado), mientras que para las fases “b” y “c”, la limitación de corriente de falla es menor, debido a que se tienen corrientes de falla prospectivas menores que en la fase “a”.

Con el LCF-R2, las corrientes limitadas fueron ligeramente mayores que las obtenidas con el LCF-R1, debido a que el valor de la resistencia de derivación es menor con el LCF-R2, la cual determina principalmente la magnitud de la corriente limitada. El valor de la resistencia de derivación del orden de  $0.1 \Omega$  es muy inferior a la resistencia equivalente de la capa de YBCO en estado normal ( $\sim 10^6$  a 100 K), además de ser inferior a la resistencia equivalente del conjunto capas metálicas de la cinta ( $\sim 0.13$  a 100 K).

La Fig. 6.3 muestra la distribución de corriente entre las diferentes capas de materiales que conforman a la cinta superconductora y la resistencia de derivación. Se incluye el rango de temperatura de las capas de la cinta superconductora, el cual es similar para todas las capas, debido a que la cinta es muy delgada [22]. Durante la falla, la mayor parte de la corriente total fluye a través de la resistencia de derivación, debido a su valor bajo, mientras que la demás corriente se distribuye en las capas metálicas de la cinta superconductora. La respuesta del LCF-R ante la falla es rápida, en un rango de pocos milisegundos, como lo muestra el rápido aumento en la corriente de la resistencia de derivación. Sin embargo, la recuperación es lenta (cientos de milisegundos), con una lenta redistribución de la corriente de la resistencia de derivación a las capas metálicas de la cinta, hasta que la temperatura de la capa superconductora cae por debajo de la temperatura crítica de la cinta, cuando la corriente se distribuye rápidamente en la capa superconductora.



**Fig. 6.3:** Distribución de la corriente total RMS en la fase “a” del LCF-R, a través de las diferentes capas de materiales que conforman a la cinta superconductora ( $N_{tp}I_k$ , donde  $k$  se refiere a las distintas capas de la cinta) y la resistencia de derivación.

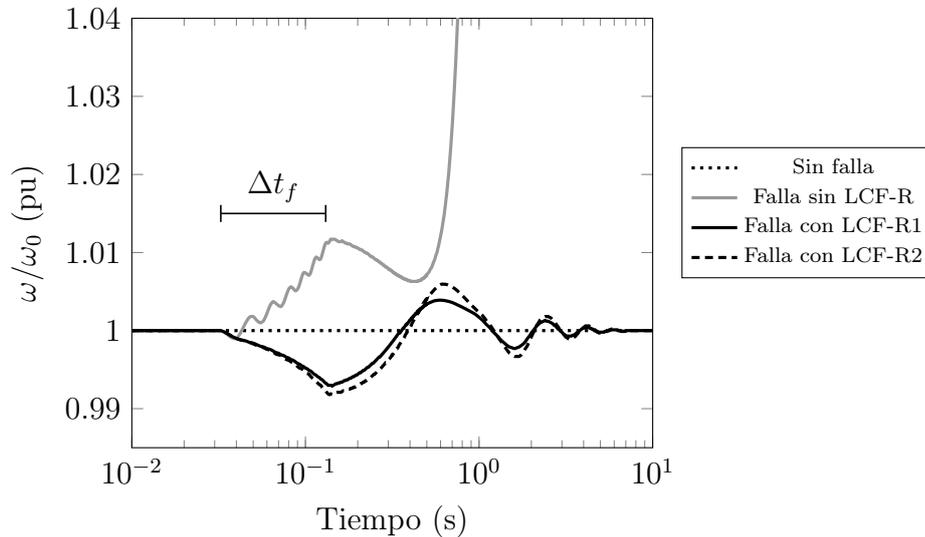
### 6.2.2. Evolución de la estabilidad transitoria del generador

La estabilidad transitoria del generador es analizada a través de la evolución de la velocidad del rotor, la cual varía como consecuencia del desbalance en la potencia activa, de acuerdo a la ecuación de oscilación de una máquina rotatoria [50, 100, 102, 103]:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H\omega_0} (P_m - P_e) \quad (6.1)$$

donde  $\Delta\omega$  es la diferencia entre la velocidad angular del rotor  $\omega$  y la velocidad síncrona del sistema  $\omega_0$ ,  $H$  es la constante de inercia,  $P_m$  es la potencia mecánica y  $P_e$  es la potencia eléctrica entregada por el generador. No se considera el amortiguamiento en el presente caso de estudio, lo que conlleva al peor caso en términos de recuperación de estabilidad después de una falla.

La Fig. 6.4 muestra la evolución de la velocidad del rotor  $\omega$  en p.u., con y sin LCF-R conectado en serie con las terminales del generador, después de una falla en el sistema analizado. Durante la falla, la velocidad del rotor se incrementa sin el LCF-R conectado, ya que la potencia mecánica es casi constante y el generador no puede transferir potencia eléctrica a la red ( $P_e \simeq 0$  en la Ec. (6.1), ya que  $V_{HV} \simeq 0$ ). Una vez que la falla es liberada, el rotor se desacelera, debido a que la máquina síncrona transfiere potencia activa al bus infinito, lo cual está limitado por el SIL de la línea de transmisión, por lo que el rotor no puede regresar a la velocidad síncrona y pierde sincronía con el sistema.



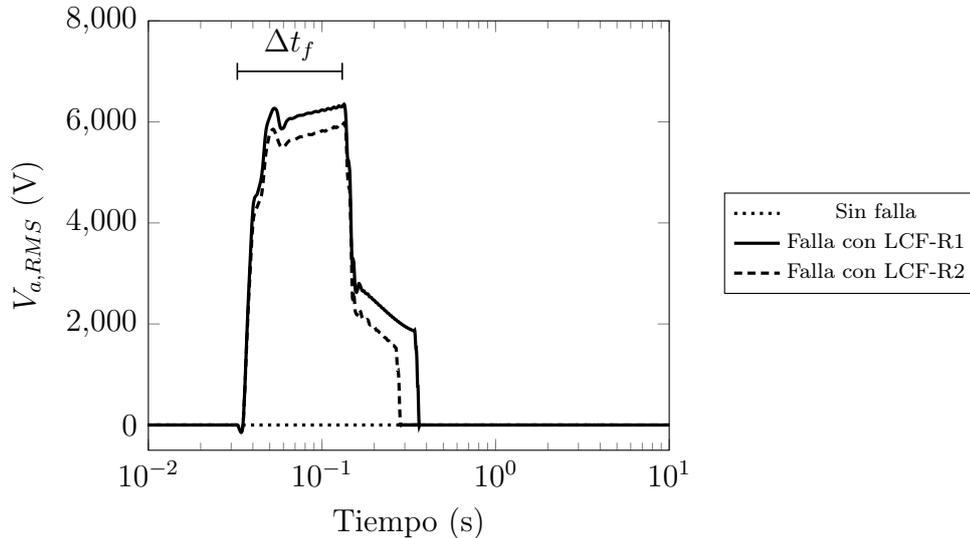
**Fig. 6.4:** Velocidad del rotor  $\omega$  en pu, con y sin LCF-R.

Cuando el LCF-R está conectado al sistema eléctrico, el rotor se desacelera durante la falla, debido a que el LCF-R consume potencia activa del generador y provee al sistema de una carga faltante durante la falla, ya que provee una resistencia mayor que la proporcionada por el sistema. Debido a que la potencia mecánica no varía, la diferencia entre la potencias mecánica y eléctrica disminuye, de acuerdo con la Ec. (6.1). Dependiendo del diseño del LCF-R, la impedancia extra aportada al sistema puede ser mayor o menor que la impedancia del sistema durante la falla, con lo que la velocidad del rotor puede aumentar o disminuir.

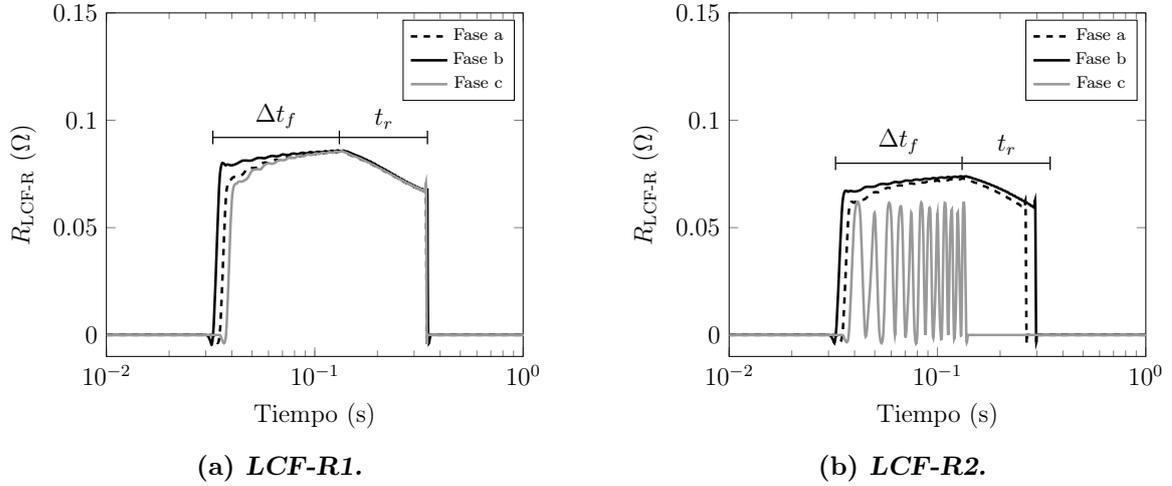
Cuando la falla es liberada, la resistencia remanente del LCF-R permanece en el sistema hasta que el LCF-R recupera su estado superconductor, lo que permite una mayor atenuación en las oscilaciones y ayuda a la recuperación de la velocidad síncrona en el rotor. Por lo tanto, un LCF-R bien diseñado conectado en serie con el generador síncrono permite estabilizar el sistema cuando se presenta una falla trifásica [12, 104].

### 6.2.3. Respuesta eléctrica del LCF-R

La Fig. 6.5 muestra el voltaje RMS en las terminales del LCF-R de la fase “a” del sistema para los casos balanceado y desbalanceado. La evolución de la resistencia en las tres fases del LCF-R se muestra en las Figs. 6.6(a) y 6.6(b) para los dos casos. El tiempo de recuperación  $t_r$  se mide del tiempo de liberación de la falla hasta el tiempo de la completa recuperación del LCF-R ( $R_{LCF} = 0$ ).



**Fig. 6.5:** Voltaje RMS a través de las terminales del LCF-R.



**Fig. 6.6:** Resistencia por fase del LCF-R como función del tiempo: a) Para el LCF-R1. b) Para el LCF-R2.

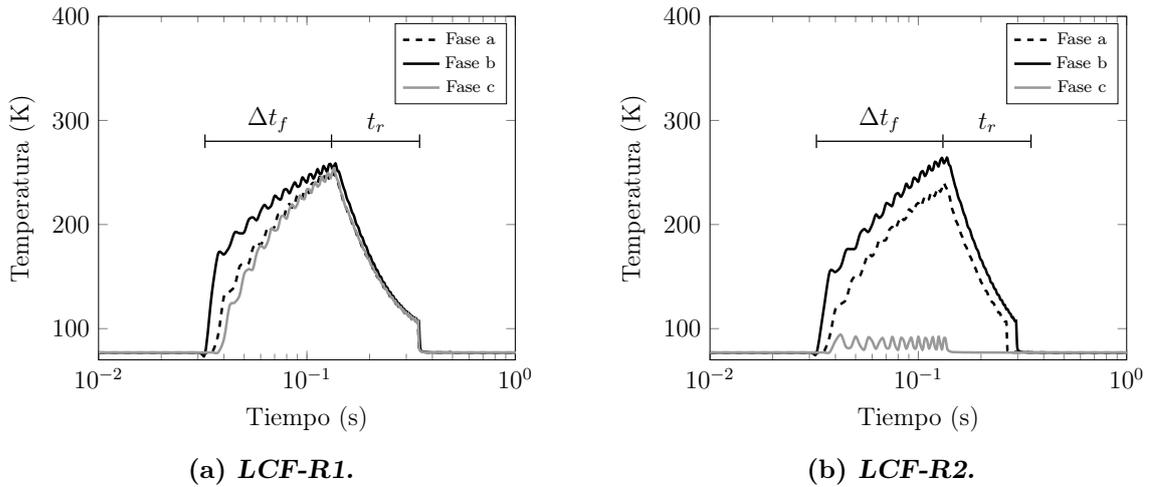
Los voltajes RMS máximos alcanzados por LCF-R se encuentran en la Tabla 6.3. Durante la falla, el voltaje en las terminales del LCF-R es del rango del voltaje RMS nominal de línea a tierra del generador. Los requerimientos de aislamiento en el lado de bajo voltaje del transformador son cubiertos sin dificultad por el aislamiento de la cinta del LCF-R [105].

Se encuentra que en la fase “b” las terminales del LCF-R1 alcanzan un voltaje de 7.2 kV RMS, en contraparte con los 5.0 kV RMS alcanzados en las terminales del LCF-R2 de la fase “c”, lo cual puede observarse en la evolución de las resistencias de las fases del LCF-R mostrada en las Figs. 6.6(a) y 6.6(b). Lo anterior se debe a que la resistencia equivalente del LCF-R2 es menor que la resistencia del LCF-R1, debido al valor de la resistencia de derivación en cada caso, mostrado en la Tabla 6.2, por lo que el voltaje obtenido en los LCF-R2 de todas las fases es menor que el voltaje obtenido con los LCF-R1. Debido a que la corriente de la fase “b” es la primera en superar la corriente crítica, el LCF-R de la fase “b” es el primero en reaccionar ante la falla, por lo que tiene un voltaje en sus terminales antes que los otros LCF-R, alcanzando un valor máximo para los casos LCF-R1 y LCF-R2.

Para el LCF-R1 todas las fases reaccionan ante la falla, mientras que para el LCF-R2 la fase “c” no es activada, debido a su bajo nivel de corriente con respecto al diseño del LCF-R, por lo que su resistencia se mantiene inferior a la resistencia de derivación cuando ocurre la falla. La falta de balance en la respuesta dada en las tres fases del LCF-R2 puede explicarse a través de su comportamiento térmico durante la falla.

### 6.2.4. Respuesta térmica del LCF-R

Las Fig. 6.7(a) y 6.7(b) muestran la evolución de la temperatura en la capa superconductora de una de las cintas por fase para el LCF-R1 y el LCF-R2. El tiempo de recuperación  $t_r$  se mide del tiempo de liberación de la falla hasta el tiempo de la completa recuperación del LCF-R. Las temperaturas máximas alcanzadas y los tiempos de recuperación se resumen en la Tabla 6.3.



**Fig. 6.7:** Temperatura en una capa superconductora por fase: a) En el LCF-R1. b) En el LCF-R2.

Con una falla iniciada en  $i_a = 0$  A,  $i_b$  es la máxima corriente de falla alcanzada por las tres fases, por lo que en la fase “b” se alcanza el máximo incremento en la resistencia del superconductor, la mayor disipación de calor y el mayor aumento de temperatura en la capa superconductora de la cinta. En el presente caso de estudio, la máxima temperatura alcanzada es de 266 K, lo cual representa un valor aceptable para mantener la integridad física de los componentes del LCF-R.

Para el LCF-R1, la evolución de la temperatura en las tres fases es similar. Por otro lado, para el LCF-R2 la temperatura de la capa superconductora en la fase “c” oscila alrededor de la temperatura crítica de la cinta, lo que corresponde a un equilibrio entre enfriamiento y disipación de potencia en la cinta. Lo anterior conlleva a un comportamiento oscilante de la resistencia en la fase “c” del LCF-R2, como se muestra en la Fig. 6.6(b). Finalmente, los tiempos de recuperación en cada fase del LCF-R1 son similares, mientras que los tiempos de recuperación en el LCF-R2 son diferentes. Independientemente de cada diseño del LCF-R, la fase “b” es la última en alcanzar una completa recuperación.

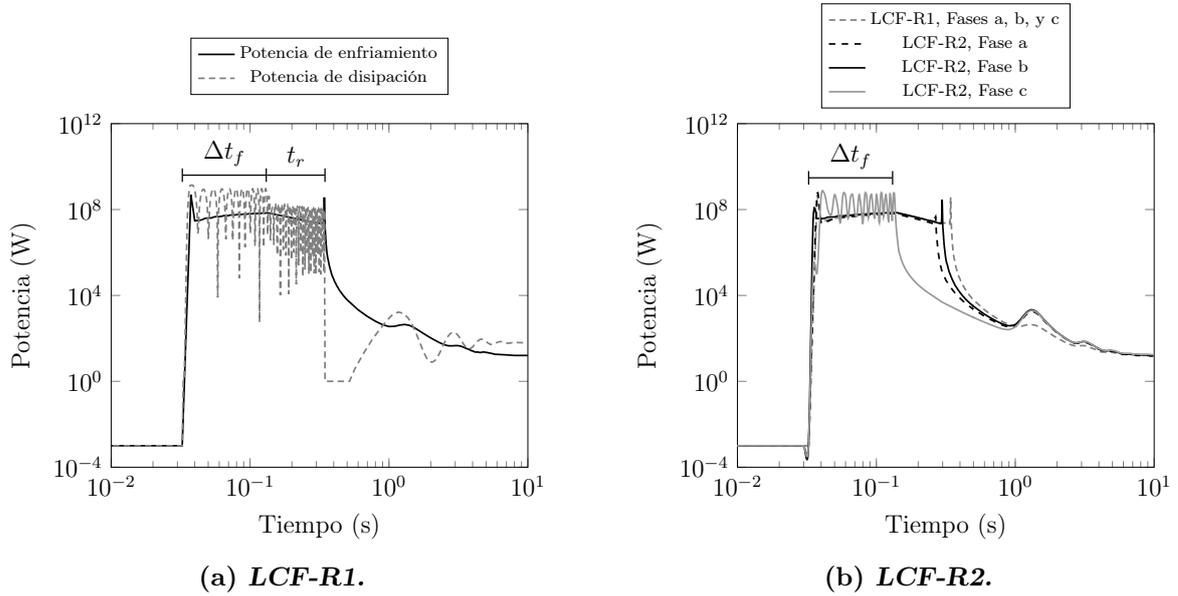
La Fig. 6.8(a) muestra las potencias de enfriamiento y de disipación para una cinta perteneciente a la fase “a” del LCF-R1. Antes de la falla, el LN<sub>2</sub> tiene la suficiente entalpía para absorber la disipación de calor en el LCF-R, debida a las resistencias de las uniones, por lo que la temperatura en estado estable del LCF-R se mantiene cerca de 77 K. Durante la falla, la potencia de disipación supera al enfriamiento hasta que se libera la falla.

Mientras se tiene la recuperación del LCF-R en el tiempo  $t_r$ , hay una pequeña caída en la potencia de disipación y un decremento paulatino en la temperatura de la capa superconductora. Posteriormente, la recuperación se acelera en la transición entre la ebullición completa y la generación de burbujas en el LN<sub>2</sub> en la superficie de la cinta (Fig. 4.8(a)), con un máximo de potencia de enfriamiento en el tiempo  $t_r$ , en el cual la temperatura de la capa superconductora baja a 77 K.

La Fig. 6.8(b) muestra la respuesta del enfriamiento en las diferentes fases del LCF-R1 y el LCF-R2. La potencia máxima de enfriamiento se alcanza en el máximo flujo de calor del LN<sub>2</sub>. Mientras que todas las fases del LCF-R1 responden igual a la falla en términos de enfriamiento, se observan diferentes comportamientos en el enfriamiento de las fases del LCF-R2. En particular, el enfriamiento en la fase “c” oscila entre la formación de burbujas y la libre convección y entonces, se enfría inmediatamente después de que la falla es liberada. Las demás fases muestran un comportamiento similar al mostrado por el LCF-R1 en términos de enfriamiento, el cual ocurre en el régimen de ebullición de película hasta que el tiempo de recuperación es alcanzado, en el cual ocurre la transición entre la ebullición de película a la ebullición de burbujas en el LN<sub>2</sub>.

El diseño óptimo del LCF-R se alcanza con el uso mínimo de cintas para alcanzar la corriente de falla deseada y la recuperación del estado superconductor después de que la falla es liberada. Sin embargo, el diseño óptimo no conlleva a una respuesta balanceada para las tres fases durante una falla trifásica, como se mostró en el presente estudio. Aunque es posible optimizar el diseño para alcanzar una respuesta balanceada en las tres fases durante una falla trifásica, no es un requisito necesario para obtener una limitación de falla aceptable o incrementar la estabilidad en los generadores.

Por lo tanto, las diferencias entre un diseño balanceado con uno no balanceado en la limitación de corriente, la estabilidad del sistema y la temperatura alcanzada en el LCF-R, no representan una restricción extra en el diseño del LCF-R, al menos para este caso de estudio. Por el contrario, el desbalance en la respuesta de las fases del LCF-R ante una falla trifásica puede ayudar a una recuperación más rápida, a pesar de que se tenga una menor limitación de corriente, lo que conllevaría a un menor gasto de LN<sub>2</sub> durante una falla y un sistema criogénico más económico.



**Fig. 6.8:** a) Potencias de disipación y de enfriamiento para una cinta de la fase “a” del LCF-R1. b) Comparación entre las potencias de enfriamiento para una cinta de la fase “a” del LCF-R1 y el LCF-R2. Se utilizó la curva de enfriamiento presentada en la Fig. 4.8(a).

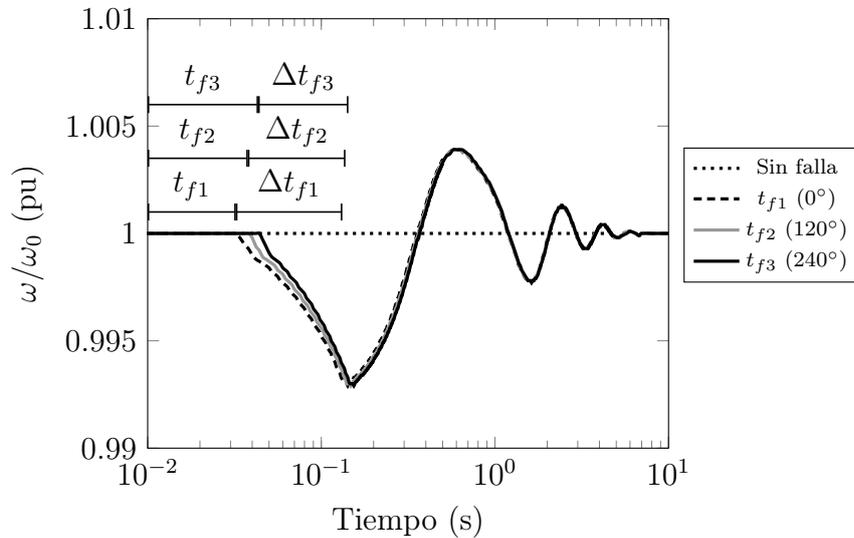
En el presente caso, el sistema recupera su régimen nominal. Sin embargo, para fallas con duración mayor a 6 ciclos debe existir una apertura en el circuito, ya que se tendría un comportamiento térmico más comprometedor en el superconductor. A pesar de que se requiere la acción de los interruptores, el costo de los mismos se reduciría, debido a que la corriente limitada por el LCF-R reduce el rango de corriente de acción de los interruptores, lo que los haría más baratos. Lo anterior es importante, debido a que se tendría mayor duración en los interruptores y se recuperaría la inversión hecha con los LCF-R instalados.

### 6.3. Impacto del tiempo de falla en la respuesta del LCF-R trifásico

En esta sección se analiza el impacto del tiempo de inicio de falla en la respuesta de los tres LCF-R conectados en el sistema trifásico presentado en la sección 6.1. Para este estudio, se emplearon las especificaciones del diseño balanceado del LCF-R1 dadas en la Tabla 6.2, con un índice  $n$  constante  $n_0 = 21$  y usando la curva de enfriamiento mostrada en la Fig. 4.8(a). Se consideraron tres casos de estudio con diferentes tiempos de inicio de falla,  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  y  $t_{f3}$ , los cuales difieren entre si en múltiplos de la tercera parte de un ciclo eléctrico  $c = 1/60$  s ( $c = 0.0167$  s), lo que equivale a diferencias angulares de  $120^\circ$  eléctricos entre cada caso de estudio.

El tiempo de falla  $t_{f1}$  es igual a 0.0322 s, el cual es utilizado en la sección 6.1 ( $0^\circ$ ), mientras que el tiempo de falla  $t_{f2}$  es igual a un tercio de ciclo eléctrico por encima de  $t_{f1}$ , es decir  $t_{f2} = t_{f1} + c/3$ , lo que corresponde a  $t_{f2} = 0.03778$  s ( $120^\circ$ ). Por último, el tiempo de falla  $t_{f3}$  es igual a dos tercios de ciclo eléctrico por encima de  $t_{f1}$ , es decir  $t_{f3} = t_{f1} + 2/3 \times c$ , lo que corresponde a  $t_{f3} = 0.0433$  s ( $240^\circ$ ). El tiempo de duración de la falla  $\Delta t_f$  es de 0.1 s para cada uno de los casos ( $\Delta t_{f1} = \Delta t_{f2} = \Delta t_{f3} = 0.1$  s).

En la Fig. 6.9 se muestra la velocidad del rotor normalizada  $\omega/\omega_0$  a través del tiempo para los diferentes casos de estudio. A pesar de que los tiempos de inicio de la falla son distintos, la velocidad del rotor en cada caso muestra un comportamiento similar al presentado en la Fig. 6.4, con una rápida recuperación de la velocidad del rotor a la velocidad síncrona  $\omega_0$ , debido a la acción de los LCF-R conectados en cada una de las fases del sistema eléctrico. Durante la falla, la velocidad del rotor se mantiene por debajo de  $\omega_0$ , por la potencia eléctrica consumida por los LCF-R. Posteriormente, la falla es liberada y el rotor empieza a oscilar, debido a la carga extra en el sistema por los LCF-R que no han recuperado su estado superconductor. Las oscilaciones disminuyen con el tiempo hasta que los LCF-R recuperan su estado superconductor y la velocidad angular del rotor regresa al valor síncrono.



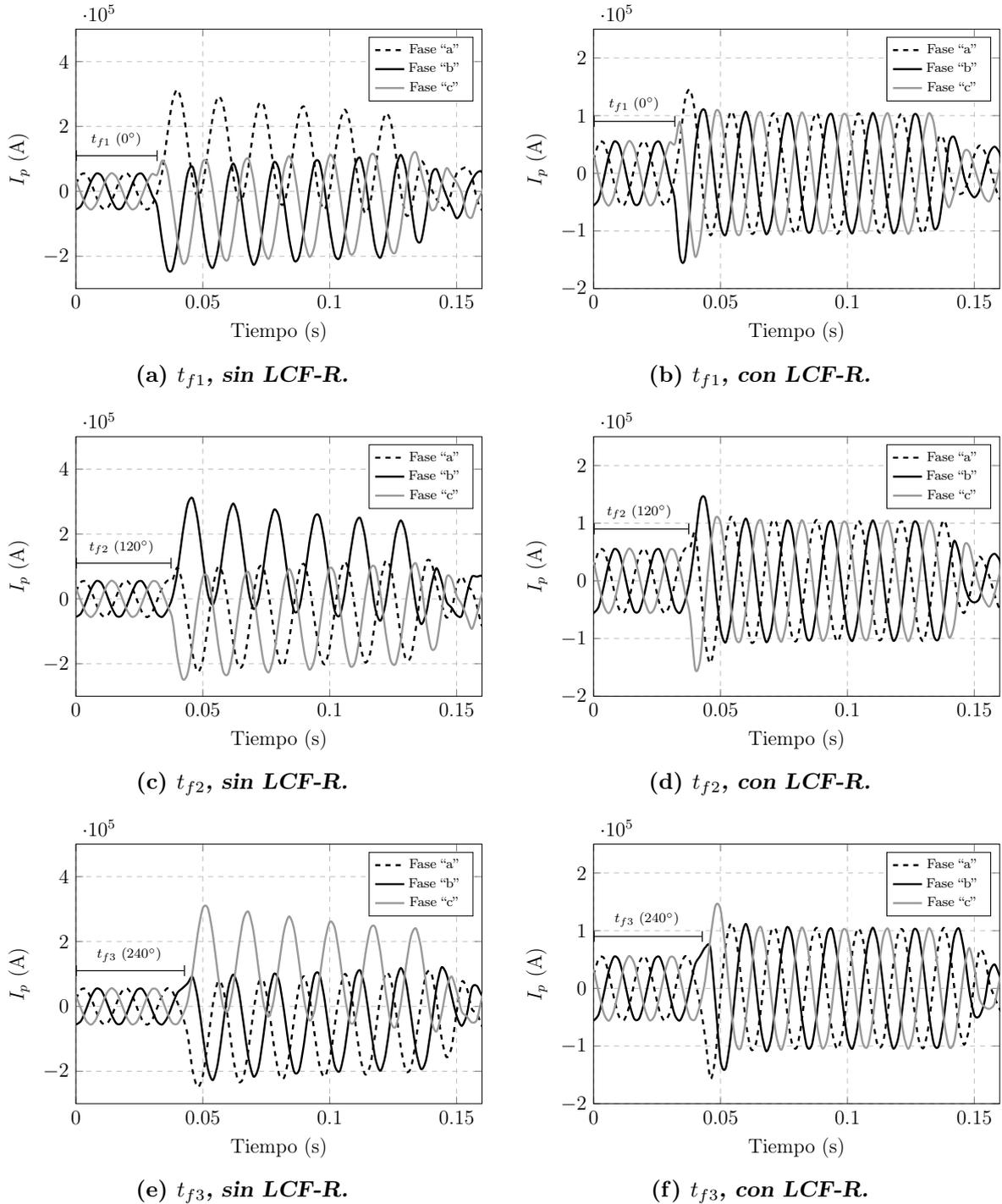
**Fig. 6.9:** Velocidad del rotor  $\omega$  en pu para el sistema eléctrico con el LCF-R conectado, considerando diferentes tiempos de falla  $t_f$ .

En las Figs. 6.10(a), 6.10(c) y 6.10(e) se tienen las corrientes de falla en cada una de las fases del sistema estudiado sin LCF-R conectado, para los tiempos de falla  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  y  $t_{f3}$ , donde se observan corrientes transitorias elevadas con una magnitud que decrece más allá de los seis ciclos eléctricos, debido a la reactancia en la red eléctrica. Se tiene una permutación en el comportamiento de las corrientes de falla de cada una de las fases para los tiempos de falla considerados, los cuales están separados un tercio de ciclo eléctrico, lo que corresponde a  $120^\circ$  eléctricos en la corriente nominal, que es la separación angular entre las fases del sistema eléctrico trifásico, con una secuencia de fases de “a”, “b” y “c”.

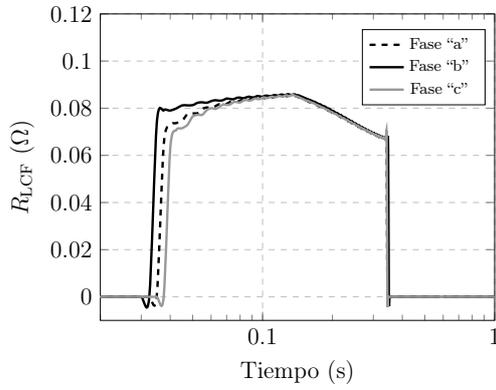
Las Figs. 6.10(b), 6.10(d) y 6.10(f) muestran las corrientes de falla obtenidas con el LCF-R conectado al sistema eléctrico analizado. El comportamiento de las corrientes de las fases para los tiempos de falla especificados muestra la misma permutación observada en las corrientes de falla sin LCF-R, con corrientes transitorias de menor magnitud y duración, debido a la carga resistiva en el sistema introducida por el LCF-R al momento de la falla. Después de aproximadamente un ciclo de operación, las corrientes de falla limitadas alcanzan un valor pico similar en cada una de las fases para los casos de estudio analizados, por lo que el LCF-R ayuda a uniformizar el comportamiento de las corrientes de falla y reducir la magnitud y duración de las corrientes transitorias, sin importar en que parte del ciclo eléctrico en la corriente nominal ocurra la falla.

En las Figs. 6.11(a), 6.11(c) y 6.11(e) se tienen las resistencias de los LCF-R en las fases del sistema estudiado, considerando los tiempos de falla  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  y  $t_{f3}$ , mientras que las Figs. 6.11(b), 6.11(d) y 6.11(f) muestran las temperaturas de las capas superconductoras de una de las cintas de los LCF-R para cada una de las fases. Se tiene un rápido incremento en la resistencia al momento de la falla hasta llegar a un valor de saturación que corresponde a la resistencia de derivación. Cuando la falla es liberada, la resistencia decrece gradualmente, debido a la reducción en la temperatura de la cinta superconductora, la cual desciende abruptamente cuando ocurre la transición de la ebullición de película a la ebullición nucleada en el  $\text{LN}_2$  (ver Fig. 4.8(a)). Con lo anterior, las cintas regresan a su estado superconductor, como se observa en las resistencias de los LCF-R.

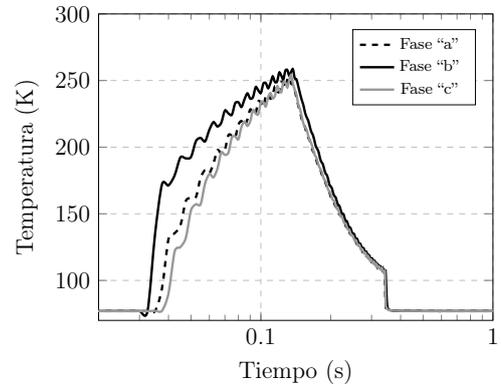
Las temperaturas de las capas superconductoras de los LCF-R en cada una de las fases se mantienen por debajo de los 270 K, lo cual representa un valor aceptable para mantener la integridad física de los componentes de los LCF-R. Se tiene una evolución simétrica con el tiempo en la resistencia y la temperatura de las cintas de los LCF-R en cada una de las fases para los tiempos de falla analizados, con la permutación en el comportamiento de las resistencias y temperaturas observada con las corrientes de falla con y sin LCF-R conectado en el sistema de estudio.



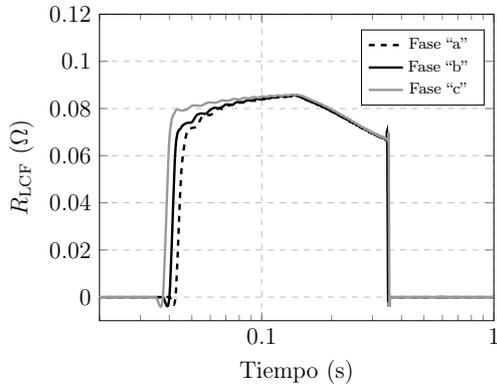
**Fig. 6.10:** Corrientes obtenidas con diferentes tiempos de falla en cada una de las fases del sistema estudiado: a) Para  $t_{f1}$ , sin LCF-R. b) Para  $t_{f1}$ , con LCF-R. c) Para  $t_{f2}$ , sin LCF-R. d) Para  $t_{f2}$ , con LCF-R. e) Para  $t_{f3}$ , sin LCF-R. f) Para  $t_{f3}$ , con LCF-R.



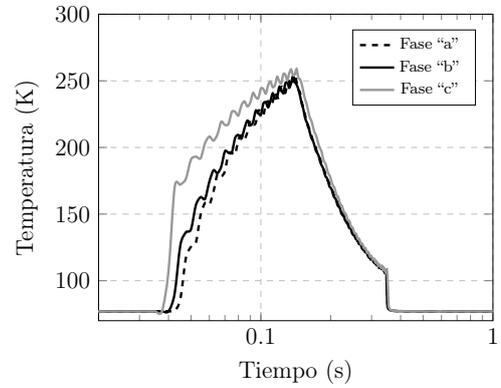
(a) Resistencia del LCF-R con  $t_{f1}$ .



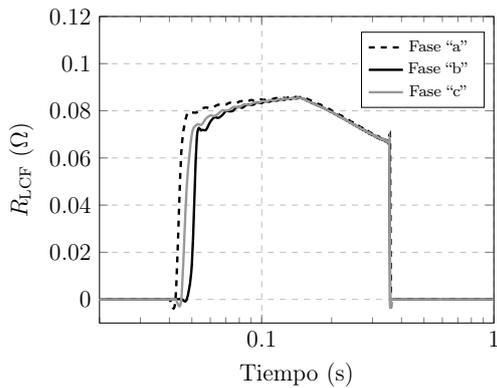
(b) Temperatura con  $t_{f1}$ .



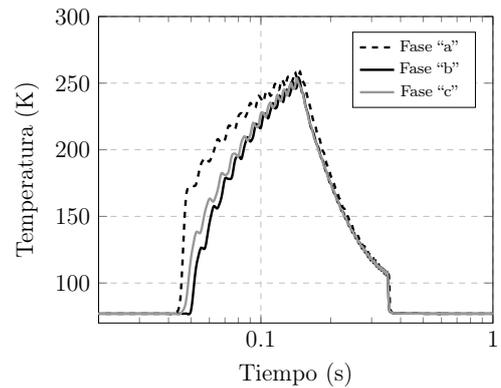
(c) Resistencia del LCF-R con  $t_{f2}$ .



(d) Temperatura con  $t_{f2}$ .



(e) Resistencia del LCF-R con  $t_{f3}$ .



(f) Temperatura con  $t_{f3}$ .

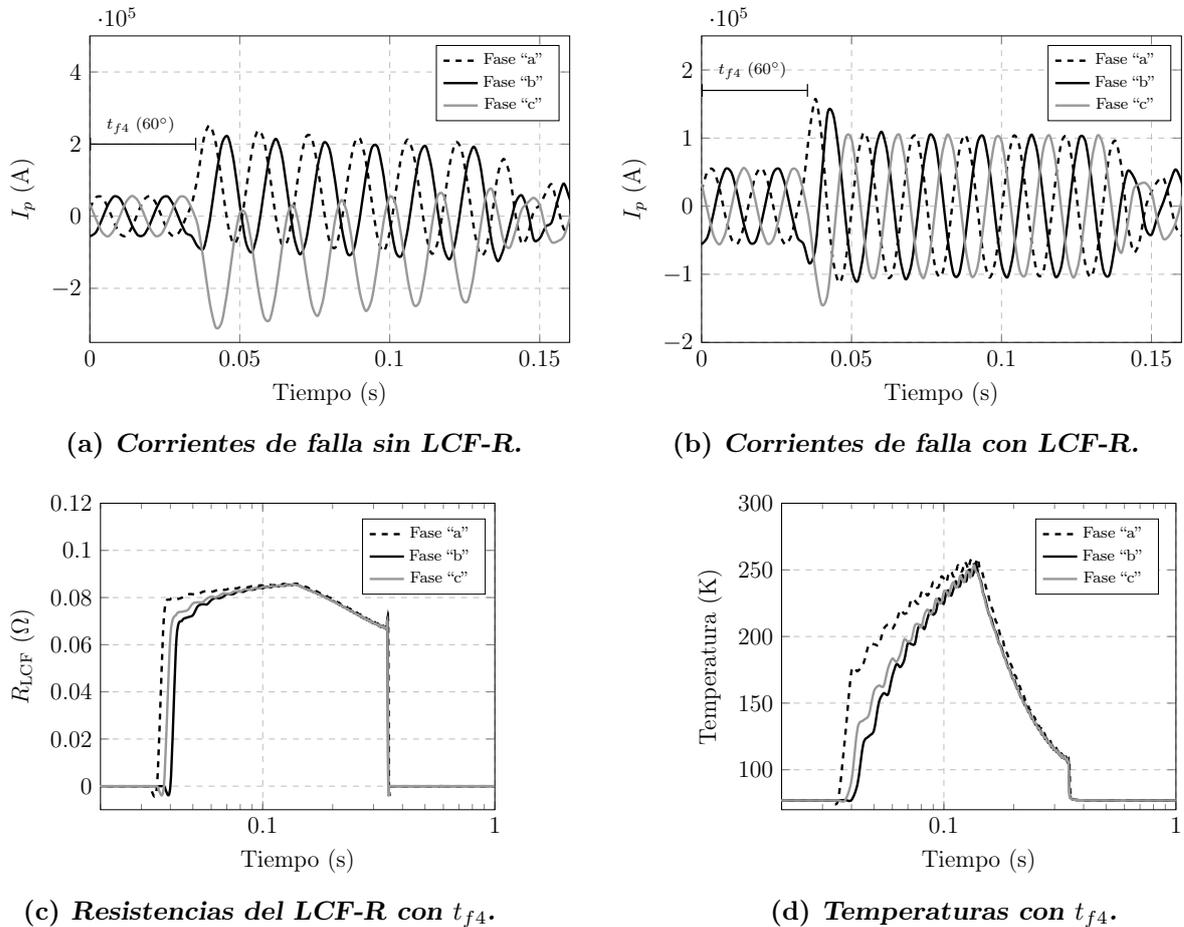
**Fig. 6.11:** a), c) y e) Resistencias como función del tiempo de los LCF-R de cada una de las fases, considerando los tiempos de falla  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  y  $t_{f3}$ . b), d) y f) Temperaturas como función del tiempo de las capas superconductoras de una de las cintas de los LCF-R de cada una de las fases, considerando los tiempos de falla  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  y  $t_{f3}$ .

Se incluye un caso de estudio con un tiempo de falla  $t_{f4} = 0.0355$  s, el cual corresponde a  $60^\circ$  después del inicio de un ciclo eléctrico en la corriente nominal, con el fin de realizar una comparación de los comportamientos eléctrico y térmico de los tres LCF-R conectados en el sistema eléctrico con un tiempo de falla entre los tiempos  $t_{f1}$ ,  $t_{f2}$  y  $t_{f3}$ , los cuales corresponden a ángulos eléctricos de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $240^\circ$ , con lo que se tiene el análisis de tiempos de falla dentro de un ciclo eléctrico completo de un sistema eléctrico trifásico, con una secuencia de fases de “a”, “b” y “c”. El tiempo de duración de la falla  $\Delta t_f$  es de 0.1 s.

En la Fig. 6.12(a) se muestran las corrientes de falla en cada una de las fases del sistema eléctrico estudiado sin LCF-R conectado para el tiempo de falla  $t_{f4}$ , donde la magnitud de la corriente pico máxima se tiene en la fase “c”, la cual se encuentra dentro de los  $300 \text{ kA}_p$  límites mostrados en las corrientes de falla para los demás casos de estudio (ver Fig. 6.10). En la Fig. 6.12(b) se muestran las corrientes de falla obtenidas en cada una de las fases del sistema con LCF-R conectado al sistema eléctrico, con una corriente pico máxima de  $150 \text{ kA}_p$  en la fase “a” al inicio de la falla. Las corrientes transitorias tienen menor magnitud y duración, debido a la carga resistiva en el sistema introducida por el LCF-R al momento de la falla, las cuales alcanzan una magnitud de  $100 \text{ kA}_p$  en cada una de las fases después de un ciclo eléctrico de operación, lo cual es similar a las corrientes de falla limitadas mostradas en la Fig. 6.10.

En la Fig. 6.12(c) se muestran las resistencias en cada una de las fases del LCF-R con el tiempo de falla  $t_{f4}$ , las cuales tienen un rápido incremento al momento de la falla hasta alcanzar un valor próximo a la resistencia de derivación. La Fig. 6.12(d) muestra las temperaturas de las capas superconductoras de una de las cintas de los LCF-R en cada una de las fases, las cuales se mantienen por debajo de los 270 K, con lo cual se mantiene la integridad física de los componentes de los LCF-R. Cuando la falla es liberada, la resistencia decrece gradualmente, debido a la reducción en la temperatura de la cinta superconductora, la cual desciende abruptamente en la transición de la ebullición de película a la ebullición nucleada en el  $\text{LN}_2$ , con lo que las cintas regresan a su estado superconductor.

Para el tiempo de falla  $t_{f4}$ , las resistencias y las temperaturas de las cintas en cada una de las fases tienen un comportamiento similar al mostrado en las Figs. 6.11(e) y 6.11(f) respectivamente, que corresponden al tiempo de falla  $t_{f3}$  con un ángulo eléctrico  $240^\circ$  en la corriente nominal, ya que en ambos casos, la corriente de falla en la fase “a” es la primera en superar la corriente crítica del LCF-R, seguida de las fases “c” y “b”, como se muestra en las Figs. 6.10(e) y 6.12(a) para los tiempos de falla respectivos.



**Fig. 6.12:** a) Corrientes de falla en cada una de las fases del sistema estudiado con  $t_{f4}$ . b) Corrientes de falla limitadas. c) Resistencia como función del tiempo de los LCF-R de cada una de las fases. d) Temperatura como función del tiempo de las capas superconductoras de una de las cintas de los LCF-R de cada una de las fases.

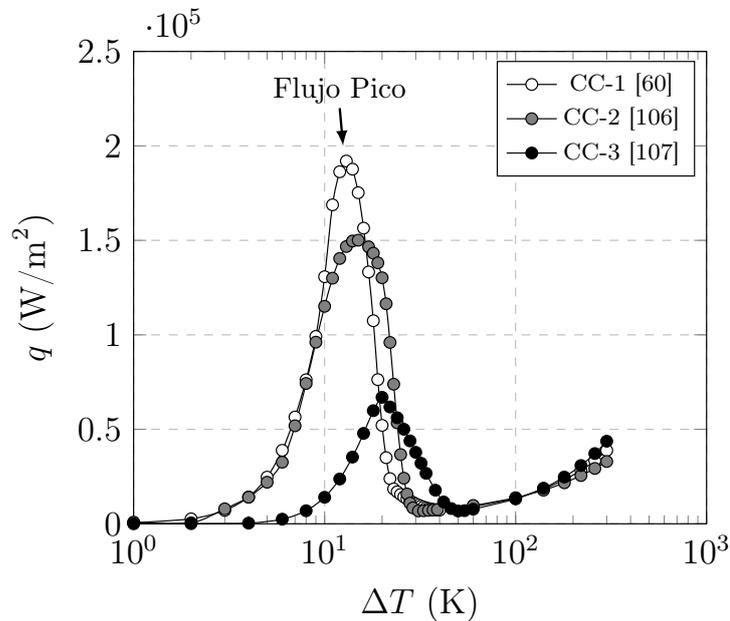
Por lo tanto, los LCF-R conectados en cada fase del sistema eléctrico estudiado se comportan de manera adecuada, con una respuesta balanceada dentro de los límites de operación del dispositivo, similar a lo presentado en la sección 6.2, con una limitación de corriente de falla aceptable y logrando la estabilidad de la velocidad síncrona del sistema ante cualquier tiempo de falla dentro de un ciclo eléctrico de operación. El LCF-R ayuda a uniformizar el comportamiento de las corrientes para diferentes tiempos de falla y reducir la magnitud y duración de las corrientes transitorias, sin importar en que parte del ciclo eléctrico en la corriente nominal ocurra la falla.

## 6.4. Estudio paramétrico

En esta sección se realiza un estudio paramétrico para comprender los comportamientos eléctrico y térmico del LCF-R bajo diferentes condiciones de enfriamiento y considerando diferentes índices  $n$  del material superconductor. El sistema eléctrico analizado es el presentado en la sección 6.1, el cual tiene conectados en serie tres LCF-R idénticos, uno por fase, con las especificaciones del diseño balanceado del LCF-R1 dadas en la Tabla 6.2. El tiempo de falla  $t_f$  es igual a 0.0322 s, mientras que el tiempo de duración de la falla  $\Delta t_f$  es igual a 0.1 s.

### 6.4.1. Impacto de las curvas de enfriamiento

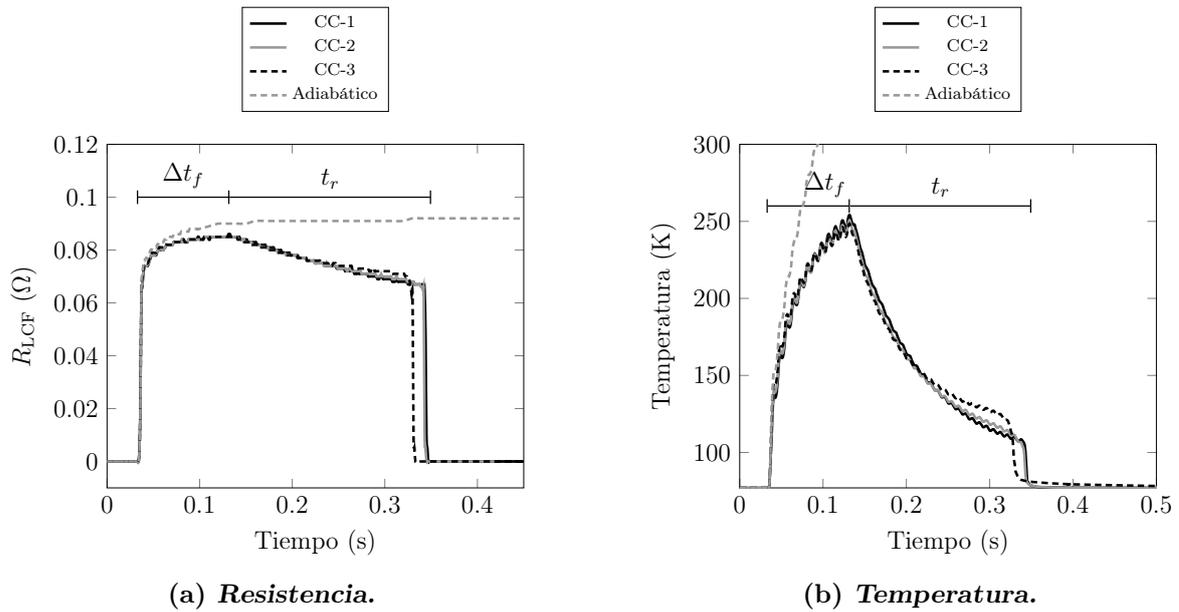
En esta sección se realiza un estudio paramétrico para comprender los comportamientos eléctrico y térmico del LCF-R bajo diferentes condiciones de enfriamiento, considerando el régimen adiabático y tres diferentes curvas de enfriamiento del nitrógeno líquido a 77 K, mostradas en la Fig. 6.13, donde  $q$  es el flujo de calor entre la superficie de una cinta y el  $\text{LN}_2$ , en  $\text{W}/\text{m}^2$ , mientras que  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre la superficie de la cinta y el  $\text{LN}_2$ , en K. Las curvas fueron obtenidas en condiciones de estado estable, aunque, se espera un mejor enfriamiento durante el estado transitorio [87]. La diferencia entre las curvas presentadas se debe a las características particulares de la superficie de la cinta.



**Fig. 6.13:** Evolución del flujo de calor entre la superficie de la cinta a una temperatura  $T$  y el nitrógeno líquido circundante a  $T_{\text{ref}} = 77$  K [60, 106, 107].

Las Figs. 6.14(a) y 6.14(b) muestran la evolución en el tiempo de la resistencia y de la temperatura de la capa superconductora de una cinta del LCF-Ra para las diferentes curvas de enfriamiento, el cual no puede recuperarse en el caso adiabático y alcanza una resistencia de saturación similar al valor de la resistencia de derivación. Mientras las cintas se encuentren completamente bañadas en  $\text{LN}_2$ , el LCF-R puede recuperarse con fallas con duración del orden de 6 ciclos eléctricos, debido al enfriamiento proporcionado por el  $\text{LN}_2$ , mientras que la temperatura se conserve por debajo de 300 K (máxima transferencia de calor disponible para las curvas CC-1, CC-2 y CC-3).

El enfriamiento afecta ligeramente la evolución de la resistencia del LCF-R al inicio de la falla, siendo mayor su impacto durante la distribución de corriente en la cinta superconductora, la cual ocurre cuando la corriente es cercana a la corriente crítica del superconductor. Una vez que la falla es liberada, la disipación de calor de las cintas disminuye, ya que la corriente regresa a su valor nominal y el enfriamiento empieza a dominar sobre la disipación de calor. Con las curvas CC-1 y CC-2, mostradas en la Fig. 6.13, se tiene la misma evolución de la temperatura y de la resistencia del LCF-Ra, con un mismo tiempo de recuperación, mientras que con la curva CC-3 se tiene un comportamiento similar al caso adiabático al inicio de la falla.

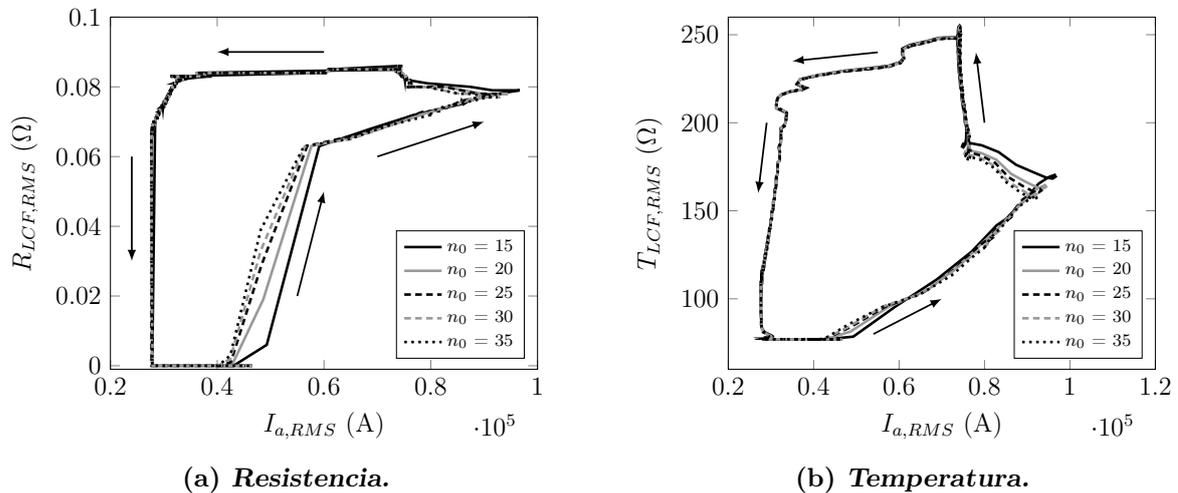


**Fig. 6.14:** a) Resistencia del LCF-Ra como función del tiempo para las distintas curvas de enfriamiento y el caso adiabático. El tiempo de recuperación  $t_r$  se mide a partir del tiempo de liberación de la falla hasta el tiempo de la completa recuperación del LCF-R. b) Temperatura de la capa superconductora de una de las cintas del LCF-Ra para cada uno de los casos de estudio.

Para las curvas CC-1 y CC-2, la transición entre la ebullición de película y la ebullición nucleada del nitrógeno líquido ocurre con una diferencia de temperatura de 30 K, mientras que para la curva CC-3, la transición ocurre con una diferencia de temperatura mayor, aproximadamente de 50 K, por lo que la recuperación del estado superconductor ocurre más rápido con la curva CC-3 que con las demás curvas una vez que la falla ha sido liberada. Por lo tanto, la curva CC-3 ofrece el mejor esquema de enfriamiento, a pesar de que el flujo de calor pico es menor que el obtenido con las curvas CC-1 y CC-2, como se muestra en la Fig. 6.13.

### 6.4.2. Impacto del índice $n$ del superconductor

Se realizaron estudios paramétricos para determinar el impacto del índice  $n$  a 77 K en la magnitud de la corriente de falla. Se eligieron diferentes índices  $n$  a 77 K con el fin de analizar la variabilidad en la transición en la característica del superconductor alrededor de la corriente crítica para una curva de enfriamiento en específico (CC-1). Para poder observar el impacto de los parámetros en la corriente de falla limitada y la temperatura alcanzada por las cintas superconductoras, la resistencia RMS del LCF-Ra  $R_{LCF,RMS}$  y la temperatura RMS de la capa superconductora de una de las cintas del LCF-Ra  $T_{LCF,RMS}$  se graficaron con respecto a la corriente RMS de la fase “a”  $I_{a,RMS}$ , como se muestra en la Fig. 6.15(a) y la Fig. 6.15(b), respectivamente. Las flechas indican la evolución con el tiempo de la resistencia y la temperatura del LCF-R durante la falla y cuando esta es liberada.



**Fig. 6.15:** Estudios paramétricos realizados con diferentes valores del índice  $n$ . a) Resistencia RMS del LCF-Ra como función de la corriente RMS  $I_{a,RMS}$ . b) Temperatura RMS del LCF-Ra como función de la corriente RMS  $I_{a,RMS}$ . Las flechas indican la evolución de la resistencia y de la temperatura de la capa superconductora con el tiempo durante y después de la falla.

En la Fig. 6.15(a) se observa el impacto del índice  $n$  durante la transición de la corriente del LCF-R por encima de la corriente crítica, ya que el aumento brusco en la resistencia del LCF-R es más notorio mientras mayor sea el índice  $n$ , como se esperaba con el uso de la ley de potencia para obtener la resistencia de las capas superconductoras alrededor de  $I_c$ . Con el aumento en la resistencia del LCF-R se tiene un aumento en las temperaturas de las capas superconductoras de las cintas, como lo muestra la Fig. 6.15(b), por lo que se tiene un incremento en la temperatura del superconductor mientras mayor sea el índice  $n$  en esta etapa, que corresponde al régimen de flujo de arrastre en el superconductor. La resistencia del LCF-R es determinada en su totalidad por las propiedades del superconductor (índice  $n$  e  $I_c$ ).

Una vez que la corriente comienza a distribuirse en la matriz metálica de la cinta, lo que corresponde al estado de flujo continuo en el superconductor, la resistencia del superconductor es del orden de la resistencia de la matriz metálica de la cinta y de la resistencia de derivación, por lo que la participación de las capas superconductoras de las cintas en el proceso de limitación de corriente disminuye, el cual ahora es determinado en su mayoría por la resistencia de derivación. Por consiguiente, con el incremento del índice  $n$  se disminuye la magnitud de la corriente de falla y se tiene una mejor limitación de corriente, debido a que la transición del estado superconductor al estado normal de la cinta ocurre más rápido y la resistencia del LCF-R alcanza su valor de saturación en menos tiempo, el cual corresponde a la resistencia de derivación.

Después de haber alcanzado la corriente máxima la corriente RMS disminuye, ya que se tiene un aumento en la resistencia del LCF-R con el respectivo aumento en la temperatura de las capas superconductoras de las cintas. En esta etapa, la temperatura tiene un mayor incremento mientras menor sea el índice  $n$ , como se observa en la Fig. 6.15(b), debido a que la transición al estado normal del superconductor es más lenta con un índice  $n$  menor, por lo que la distribución de corriente en la resistencia de derivación es más tardada. La resistencia equivalente del LCF-R es similar a la resistencia de derivación, debido al incremento en la resistencia de las cintas.

Las capas superconductoras alcanzan una temperatura máxima de 250 K, tiempo en el cual se libera la falla, a partir del cual la resistencia y la temperatura en el LCF-R disminuyen hasta regresar al estado superconductor, lo cual constituye la etapa de recuperación del LCF-R, donde el impacto del índice  $n$  en las curvas características del LCF-R es mínimo, por lo que el impacto del índice  $n$  es mayor durante la falla, reduciendo la corriente de cortocircuito.

---

## Capítulo 7

# Conclusiones

---

Se desarrolló un modelo genérico del LCF-R constituido por cintas comerciales de segunda generación (YBCO), el cual describe los comportamientos térmico y eléctrico de los elementos que conforman al LCF-R a través de una analogía electrotérmica, considerando condiciones ideales de operación. El modelo puede ser usado para analizar el impacto del LCF-R en redes eléctricas y sistemas eléctricos de potencia de corriente alterna monofásicos y trifásicos, bajo diferentes condiciones de operación.

El diseño básico del LCF-R está basado en una bobina bifilar plana no inductiva conectada en paralelo a una resistencia de derivación metálica a temperatura ambiente. La bobina está construida con cintas superconductoras comerciales de YBCO con y sin estabilizador de cobre, conectadas en paralelo. Se considera que las cintas no tienen uniones, con el fin de evitar soldaduras innecesarias, sin quitarle generalidad al modelo. La longitud de las cintas, el número de cintas conectadas en paralelo y el valor de la resistencia de derivación se consideran como parámetros de diseño del LCF-R.

El modelo genérico fue desarrollado en la plataforma de simulación Matlab-Simulink<sup>®</sup>, con el módulo Simscape y fue validado con simulaciones y resultados experimentales de un diseño particular de un LCF-R obtenido en la literatura, mostrando buenas similitudes entre los resultados obtenidos con el modelo genérico, el modelo consultado y los resultados experimentales.

Se compararon los resultados de las pruebas de cortocircuito en corriente alterna aplicadas a un modelo experimental de LCF-R con los resultados obtenidos con el modelo genérico. El modelo del LCF-R consistía en una bobina bifilar de geometría axial fabricada con cintas superconductoras de YBCO con estabilizador cobre y sin aislamiento, a las cuales se les conectó en paralelo un estabilizador adicional de cobre, con el fin de tener un mayor rango de corriente para el LCF-R, ya que las pruebas en CD realizadas previamente a una muestra de la cinta superconductora empleada mostraron que no resiste corrientes mayores al 110 % de su corriente crítica. Se obtuvieron buenas similitudes entre los resultados obtenidos con el modelo genérico y los resultados experimentales.

---

Con las verificaciones realizadas se confirmó la validez de la aplicación del modelo genérico del LCF-R en el análisis de sistemas eléctricos de potencia. Por lo tanto, se obtuvo un modelo genérico validado para estudios en redes eléctricas poco malladas.

Se utilizó el modelo genérico para llevar a cabo el análisis de la estabilidad transitoria en un sistema eléctrico de corriente alterna trifásico, compuesto de un generador síncrono conectado a un bus infinito a través de un transformador elevador de tensión y una línea de transmisión larga ( $>100$  km), el cual fue sujeto a una falla trifásica transitoria en sus terminales. El modelo del LCF-R fue conectado en serie en cada una de las terminales del generador síncrono.

Se mostró que a través de la selección adecuada de los parámetros de diseño del LCF-R, además de obtener la limitación deseada de corriente de cortocircuito, es posible mejorar la estabilidad transitoria ante una falla y alcanzar la recuperación del LCF-R en el régimen nominal de un sistema eléctrico trifásico de corriente alterna y de gran potencia, cercana a 1 GVA, sin requerir la acción adicional de interruptores de potencia o dispositivos de control de fallas adicionales.

Además, se mostró que es posible obtener una respuesta homogénea en las tres fases del LCF-R ante una falla trifásica, lo cual puede referirse como un diseño optimizado. Se mostraron los resultados de un diseño no optimizado del LCF-R trifásico, en el que se tiene una respuesta desbalanceada en las tres fases que conforman al LCF-R trifásico, lo cual es una situación no deseable, debido a que se tiene la poca participación de alguno de los LCF-R al momento de ocurrir una falla.

En el presente proyecto de doctorado se verificaron las siguientes hipótesis:

- Mientras que la temperatura y la intensidad de campo magnético se mantengan por debajo de los valores críticos del superconductor, el LCF-R presenta una resistencia despreciable con corrientes inferiores a la corriente crítica del superconductor, por lo que no presenta pérdidas y caídas de voltaje bajo condiciones normales de operación.
- El LCF-R presenta un gran aumento en su resistencia en una fracción de ciclo de potencia a 60 Hz cuando la corriente que circula a través de sus terminales supera a la corriente crítica, con lo que se limita la corriente de falla de manera automática.
- Acoplar el modelo teórico del LCF-R con modelos de la red eléctrica permite definir un diseño óptimo del LCF-R y entender como este sistema se comporta en conjunto con otros sistemas de potencia.

---

Apéndice A  
Apéndice A

---

En este apéndice se presenta la publicación que fue resultado de este trabajo de investigación:

J. J. Pérez-Chávez, F. Trillaud, L. M. Castro, L. Quéval, A. Polasek and R. de Andrade Jr. *Generic Model of Three-Phase (RE)BCO Resistive Superconducting Fault Current Limiters for Transient Analysis of Power Systems*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 29(6): 1–9, 2019.

---

## Apéndice B

# Apéndice B

---

En este apéndice se presentan las propiedades térmicas de las diferentes capas que conforman las cintas de YBCO empleadas en este trabajo. En la Fig. B.1 se presenta la resistividad eléctrica como función de la temperatura de los materiales que conforman las capas de las cintas de YBCO, mientras que en la Fig. B.2 se tiene la capacidad calorífica específica como función de la temperatura de los materiales, incluyendo el aislamiento (Kapton<sup>®</sup>). La conductividad térmica de los materiales se presenta en la Fig. B.3 [23, 108, 109].

**Tabla B.1:** Densidades de los materiales de las cinta de YBCO.

Capa	Símbolo	Densidad, $\gamma$ kg/m <sup>3</sup>
YBCO	YB	6300
Cobre	Cu	8960
Plata	Ag	10490
Hastelloy <sup>®</sup>	Hs	8900

### B.1. Resistividad eléctrica vs temperatura

- Plata [106]:

$$\rho_{Ag} = -2.082 \times 10^{-9} + 6.17 \times 10^{-11} T \quad (\text{B.1})$$

- Cobre [106]:

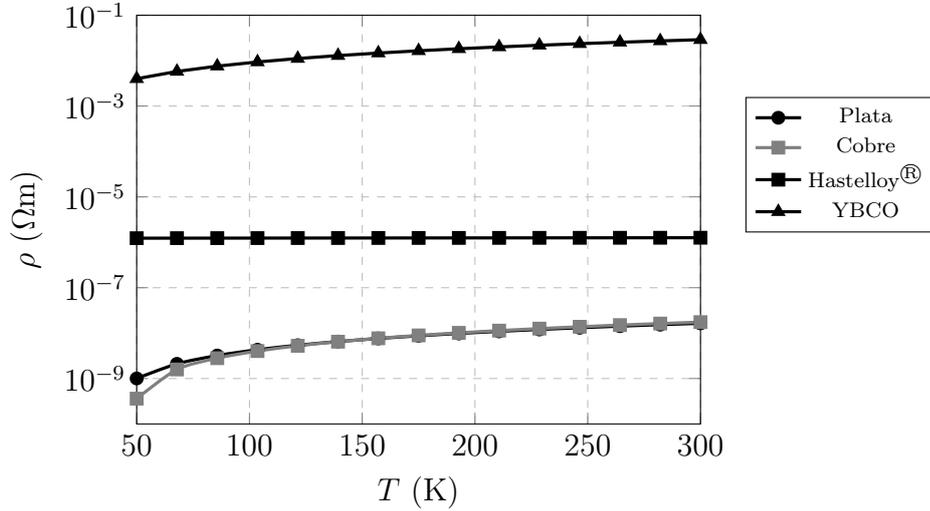
$$\rho_{Cu} = -3.06 \times 10^{-9} + 6.841 \times 10^{-11} T \quad (\text{B.2})$$

- Hastelloy<sup>®</sup> [82]:

$$\rho_{Hs} = 1.22615 \times 10^{-6} + 1.16923 \times 10^{-10} T \quad (\text{B.3})$$

- YBCO [106]:

$$\rho_{YBCO} = -1 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-4} T \quad (\text{B.4})$$



**Fig. B.1:** Resistividad eléctrica  $\rho$  vs temperatura  $T$  de los materiales que conforman las capas de la cinta de YBCO.

## B.2. Capacidad calorífica específica vs temperatura

- Plata [110]:

$$c_{Ag} = 1000 \frac{\left( \left( 1944 \left( \frac{T}{220} \right)^3 \right)^{-0.85} + 24.95^{-0.85} \right)^{-1/0.85}}{107.868} \quad (\text{B.5})$$

- Cobre [106]:

$$c_{Cu} = 390.9 - 539.4 e^{-0.014 T} \quad (\text{B.6})$$

- Hastelloy® [106]:

$$c_{Hs} = 1000(0.19 + 2(0.194(1 - e^{-T/310}))) \quad (\text{B.7})$$

- YBCO [22]:

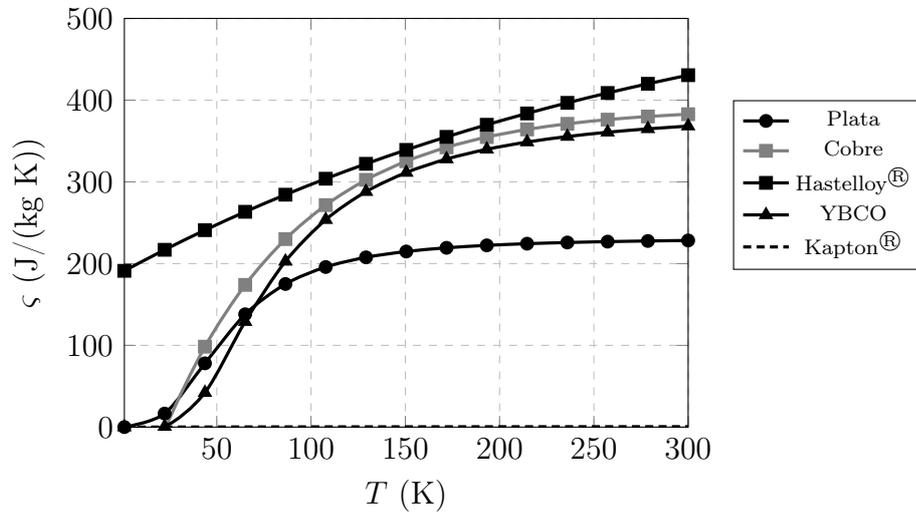
$$c_{YBCO} = 390 \left( \frac{250}{T} \right)^2 \left( \frac{e^{250/T}}{e^{250/T} - 1} \right)^2 \quad (\text{B.8})$$

- Kapton<sup>®</sup> [111]:

$$\varsigma_{kp} = 10^X / 1420 \quad (\text{B.9})$$

Donde:

$$X = -1.3684 + 0.65892 \log_{10}(T) + 2.8719 \log_{10}(T)^2 + 0.42651 \log_{10}(T)^3 - 3.0088 \log_{10}(T)^4 + 1.9558 \log_{10}(T)^5 - 0.51998 \log_{10}(T)^6 + 0.051574 \log_{10}(T)^7$$



**Fig. B.2:** Capacidad calorífica específica  $\varsigma$  como función de la temperatura  $T$  de los materiales de la cinta de YBCO.

### B.3. Conductividad térmica vs temperatura

- Plata [106]:

$$k_{Ag} = 420.9 + 501.8 \times 0.956^T \quad (\text{B.10})$$

- Cobre [106]:

$$k_{Cu} = 420.7 + 2076 \times 0.965^T \quad (\text{B.11})$$

- Hastelloy<sup>®</sup> [112]:

$$k_{Hs} = 5.726708 + 1.349819 \times 10^{-2} T + 3.565928 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{B.12})$$

- YBCO [106]:

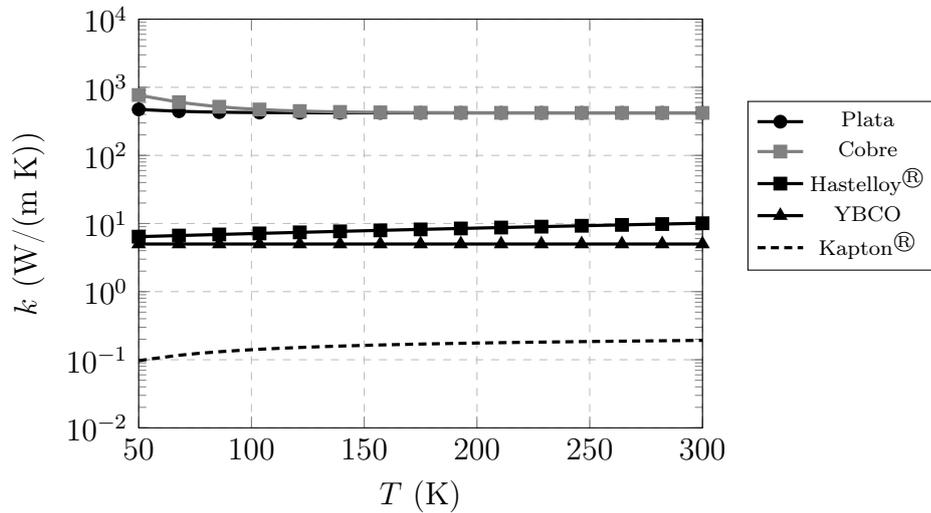
$$k_{YBCO} = 5 \quad (\text{B.13})$$

- Kapton<sup>®</sup> [113]:

$$k_{kp} = 10^X \quad (\text{B.14})$$

Donde:

$$\begin{aligned} X = & 5.73101 - 39.5199 \log_{10}(T) + 79.9313 \log_{10}(T)^2 - 83.8572 \log_{10}(T)^3 \\ & + 50.9157 \log_{10}(T)^4 - 17.9835 \log_{10}(T)^5 + 3.42413 \log_{10}(T)^6 \\ & - 0.27133 \log_{10}(T)^7 \end{aligned}$$



**Fig. B.3:** Conductividad térmica  $k$  como función de la temperatura  $T$  de los materiales de las capas de la cinta de YBCO.

## Bibliografía

---

- [1] G. Didier, J. Lévêque and A. Rezzoug. A novel approach to determine the optimal location of SFCL in electric power grid to improve power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2):978–984, 2013. 1, 6
- [2] L. Ye and A. M. Campbell. Case study of HTS resistive superconducting fault current limiter in electrical distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 77(5):534–539, 2006. 1, 6
- [3] L. Ye, M. Majoros, T. Coombs and A. M. Campbell. System studies of the superconducting fault current limiter in electrical distribution grids. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2):2339–2342, 2007. 1, 6
- [4] I. Losa and O. Bertoldi. *Regulation of continuity of supply in the electricity sector and cost of energy not supplied*. International Energy Workshop, pages 1–10, Venice, Italy, 2009. 1
- [5] L. Kovalsky, X. Yuan, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock and F. Breuer. Applications of superconducting fault current limiters in electric power transmission systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2):2130–2133, 2005. 1
- [6] S. Yadav, G. K. Choudhary and R. Kumar-Mandal. Review of fault current limiters. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 3(4):1595–1603, 2014. 1
- [7] A. Morandi. State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system. *Physica C*, 484:242–247, 2013. 2, 4
- [8] W. Park, B. C. Sung and J. W. Park. The effect of SFCL on electric power grid with wind-turbine generation system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 20(3):1177–1181, 2010. 2
- [9] M. Noe and M. Steurer. High-temperature superconductor fault current limiters: Concepts, applications and development status. *Superconductor Science and Technology*, 20:R15–R29, 2007. XII, 2, 3, 4, 13, 14

- 
- [10] S. S. Kalsi. *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*. John Wiley and Sons, Inc., 2011. 2, 4, 7, 8, 13, 20, 25, 26
- [11] H. S. Ruiz, X. Zhang and T. A. Coombs. Resistive-type superconducting fault current limiters: concepts, materials and numerical modeling. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3), 2015. 2, 4, 15
- [12] S. Alaraifi, M. S. El Moursi and H. Zeineldin. *Transient analysis on different types of super conducting fault current limiters*. IEEE Grenoble Conference, pages 1–6, Grenoble, France, 2013. 2, 60
- [13] S. Elschner, F. Breuer, M. Noe, T. Rettelbach, H. Walter and J. Bock. Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13(2):1980–1983, 2003. 2, 4
- [14] A. M. Wolsky. HTS from precommercial to commercial. Research report series, International Energy Agency, 2013. VIII, 2, 3, 13, 14, 20
- [15] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, R. Dias, C. F. T. Matt and R. de Andrade Jr. Thermal-electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters. *Cryogenics*, 62:97–109, 2014. 3, 5, 17, 18, 24, 30
- [16] M. Noe. *Status of development of superconducting fault current limiters (ScFCL) and superconducting cables*. European Summer School on Superconductivity, pages 1–82, Turku, Finland, 2011. 3, 13
- [17] J. Gerhold. Properties of cryogenic insulants. *Cryogenics*, 38(11):1063–1081, 1998. 4, 13
- [18] B. W. Lee, J. Sim, K. B. Park and I. S. Oh. Practical application issues of superconducting fault current limiters for electric power systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18(2):620–623, 2008. 4
- [19] M. Stemmler, F. Merschel and M. Noe. *Ampacity project-Update on world's first superconducting cable and fault current limiter installation in a German city center*. 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015), pages 1–5, Lyon, France, 2015. 4, 14
- [20] Y. Li, Y. Wang, J. Miao, C. Shi, P. Ju, P. Huang, J. Xue and T. Hasegawa. Investigation on critical current properties of quasi-isotropic strand made from coated conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3):1–5, 2015. 4, 5
- [21] Q. Miao, J. M. Zhu, M. Cheng, Z. Zhang, Z. Y. Li, Y. Wang, J. Sheng, Z. Jin and Z. Hong. Fabrication and characteristic tests of a novel low-resistance joint structure
-

- 
- for YBCO coated-conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3):1–5, 2015. 4, 5
- [22] W. T. Batista de Sousa. *Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters*. PhD Thesis. Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015. IX, IX, IX, IX, IX, XII, XII, 5, 15, 17, 18, 40, 41, 42, 43, 58, 79
- [23] W. T. B. de Sousa, T. M. Lessa-Assis, A. Polasek, A. M. Monteiro and R. de Andrade Jr. Simulation of a superconducting fault current limiter: A case study in the Brazilian power system with possible recovery under load. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(2):1–8, 2016. 5, 17, 18, 27, 78
- [24] A. Ishiyama, M. Yanai, T. Morisaki, H. Ueda, Y. Shiohara, T. Izumi, Y. Iijima and T. Saitoh. Normal transition and propagation characteristics of YBCO tape. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2):1659–1662, 2005. 5
- [25] V. Romanovskii, K. Watanabe and S. Awaji. *Current instability of high temperature superconducting tapes in the AC modes*. 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), page 4 (022028), Genova, Italy, 2014. 5
- [26] D. Colangelo and B. Dutoit. Analysis of the influence of the normal zone propagation velocity on the design of resistive fault current limiters. *Superconductor Science and Technology*, 27(12):8 (124005), 2014. 5
- [27] C. H. Bonnard, F. Sirois, C. Lacroix and G. Didier. Multi-scale model of resistive-type superconducting fault current limiters based on 2G HTS coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 30(1):1–23, 2016. 5, 15
- [28] A. R. Fereidouni, B. Vahidi, T. H. Mehr and M. G. Doiran. Enhancement of power system transient stability and power quality using a novel solid-state fault current limiter. *474 Journal of Electrical Engineering and Technology*, 6(4):474–483, 2011. 5
- [29] S. Seo, S. J. Kim, Y. H. Moon and B. Lee. A hybrid superconducting fault current limiter for enhancing transient stability in Korean power systems. *Physica C*, 494:331–334, 2013. 5
- [30] F. Zheng, C. Deng, L. Chen, S. Li, Y. Liu and Y. Liao. Transient performance improvement of microgrid by a resistive superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3):1–5, 2015. 6
- [31] L. Ye, L. Lin and K. P. Juengst. Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 12(1):900–903, 2002. 7
-

- 
- [32] A. Hobl, S. Elschner, J. Bock, S. Kramer, C. Janke and J. Schramm. *Superconducting fault current limiters. A new tool for the grid of the future*. CIRED Workshop, pages 1–4, Lisbon, 2012. 12
- [33] T. Janowski, B. Kondratowicz-Kucewicz, G. Wojtasiewicz, S. Kozak, J. Kozak, M. Majka and L. Jaroszynski. *Superconducting devices for power engineering*. Proceedings of the XVII National Conference on Superconductivity, pages 537–544, Karpacz, 2015. VIII, 12, 13
- [34] M. Chen, W. Paul, M. Lakner, L. Donzel, M. Hoidis, P. Unternaehrer, R. Weder and M. Mendik. 6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor. *Physica C*, 372-376(3):1657–1663, 2002. 13
- [35] R. Dommerque, S. Krämer, A. Hobl, R. Böhm, M. Bludau, J. Bock, D. Klaus, H. Piereder, A. Wilson, T. Krüger, G. Pfeiffer, K. Pfeiffer and S. Elschner. First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and installation. *Superconductor Science and Technology*, 23(3):1–6, 2010. VIII, 13, 14
- [36] J. Bock, F. Breuer, H. Walter, S. Elschner, M. Kleimaier, R. Kreutz and M. Noe. CURL 10: Development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-BSCCO 2212. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2):1955–1960, 2005. 13
- [37] M. Noe, J. Bock, A. Hobl and J. Schramm. *Superconducting fault current limiters. Latest developments at Nexans Superconductors*. Tenth EPRI Superconductivity Conference, pages 1–47, Tallahassee, Fl, 2011. VIII, 13, 14
- [38] EPRI. Superconducting power equipment: Technology watch 2012. Research report series, Technology Watch, 2012. 13, 14, 30
- [39] L. Martini. *Roadmap of superconductivity*. Superconductivity in Energy Technology Applications 2010, pages 1–75, Tampere, Finland, 2010. XII, 13, 14
- [40] M. Stemmler, K. Allweins, F. Merschel, T. Kugel, F. Herzog, T. Kutz and J. M. Saugrain. *Three years operation experience of the AmpaCity system installation in Essen, Germany*. 13th European Conference on Applied Superconductivity (EU-CAS 2017), pages 1–6, Geneva, Switzerland, 2017. 14
- [41] S. Elschner, A. Kudymow, S. Fink, *et al.* ENSYSTROB - Resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3):1209–1212, 2011. VIII, IX, 14, 30, 31, 32, 39
-

- 
- [42] S. Elschner, A. Kudymow, J. Brand, S. Fink, *et al.* ENSYSTROB-Design, manufacturing and test of a 3-phase resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. *Physica C*, 482(3):98–104, 2012. VIII, IX, 14, 27, 30, 31, 42
- [43] X. Zhang, H. S. Ruiz, Z. Zhong and T. A. Coombs. *Implementation of resistive type superconducting fault current limiters in electrical grids: performance analysis and measuring of optimal locations*. International Conference on Superconductivity, pages 1–18, 2015. 15, 16, 17
- [44] A. Etxegarai, A. Iturregi, M. Larruskain, I. Zamora and P. Eguia. *Modeling and parameterization of resistive superconducting fault current limiters*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'17), pages 1–6, Malaga, Spain, 2017. 16
- [45] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, T. M. L. Assis, R. de Andrade Jr. and M. Noe. Simulations of resistive and air coil SFCLs in a power grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3):1–5, 2015. IX, 16, 17, 18, 19, 20, 40
- [46] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, F. A. Silva, R. Dias, A. R. Jurelo and R. de Andrade Jr. Simulations and tests of MCP-BSCCO-2212 superconducting fault current limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(2):1–6, 2012. 16
- [47] J. Duron, B. Dutoit, F. Grilli, M. Decroux, L. Antognazza and O. Fischer. Computer modeling of YBCO fault current limiter strips lines in over-critical regime with temperature dependent parameters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2):1839–1842, 2007. 16, 17, 23, 30
- [48] J. J. Pérez-Chávez, F. Trillaud, L. M. Castro, L. Quéval, A. Polasek and R. de Andrade Jr. Generic model of three-phase (RE)BCO resistive superconducting fault current limiters for transient analysis of power systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(6):1–9, 2019. 17, 20, 41
- [49] W. T. B. de Sousa, F. Dicler and F. Goulart. Simulations of the recovery process of an air-coil SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(1):5600106, 2016. 18
- [50] B. C. Sung, D. K. Park, J. W. Park and T. K. Ko. Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: modeling, simulation and experimental verification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(7):2412–2419, 2009. 18, 59
- [51] S. Alaraifi, M. S. El Moursi and H. Zeineldin. Optimal allocation of HTS-FCL for power system security and stability enhancement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4):4701–4711, 2013. 18
-

- [52] A. W. B. Taylor. *Superconductivity*. Taylor and Francis, Ltd., 1970. 19
- [53] R. G. Sharma. *Superconductivity, Basics and Applications to Magnets*. Springer, 2015. VIII, 19, 20
- [54] J. G. Bednorz and K. A. Müller. Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Z. Phys. B - Condensed Matter*, 64:189–193, 1986. 20
- [55] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, *et al.* Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 58(9):908–910, 1987. 20
- [56] M. C. Hervieu, M. Borel, *et al.* Superconductivity in the Bi-Sr-Cu-O system. *Z. Physik, B.*, 68(4):421–423, 1987. 20
- [57] A. Singh. Meissner effect (1933) re-explained by Gill’s electronic theory of magnetism (1964). *American Research Journal of Physics*, 4(1):1–14, 2018. 20
- [58] J. E. Jankowski. *Convective Heat Transfer Model for Determining Quench Recovery of High Temperature Superconducting YBCO in Liquid Nitrogen*. MSc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, MIT, 2004. 23, 47
- [59] E. Egorova, H. Bahirat, B. A. Mork, W. F. Perger and M. Holcomb. *EMTP-ATP Modeling of a resistive superconducting fault current limiter*. International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), pages 105–115, Vancouver, Canada, 2013. 23
- [60] A. D. Berger. Stability of superconducting cables with twisted stacked YBCO coated conductors. Research report series, Plasma Science and Fusion Center, Massachusetts Institute of Technology, MIT, 2012. IX, XI, 23, 30, 38, 39, 71
- [61] X. Ying and W. Jian. Direct evidence of high temperature superconductivity in one-unit-cell FeSe films on SrTiO<sub>3</sub> substrate by transport and magnetization measurements. *Chinese Phys. B*, 24(11):1–8, 2015. 23
- [62] J. Langston, M. Steurer, S. Woodruff, T. Baldwin and J. Tang. A generic real-time computer simulation model for superconducting fault current limiters and its application in system protection studies. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2):2090–2093, 2005. 23
- [63] W. Paul, *et al.* Superconducting fault current limiter: applications, technical and economical benefits, simulations and test results. Research report series, CIGRE, 2000. 23

- [64] P. Barusco, L. F. Ribeiro, F. G. Martins, A. Polasek, R. de Andrade Jr. and C. L. Cesar. *Determination of the  $n$ -value of 2G HTS tapes using a thermally stabilized fast pulsed system*. 13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2017), Geneva, Switzerland, 2017. 24, 30, 46
- [65] Sumitomo Electric Industries. Wire especificacion. <http://global-sei.com/super/htse/index.html>. VIII, 25
- [66] Furukawa, Superpower, inc. Wire especificacion. <http://www.superpower-inc.com/content/wire-specification>. VIII, 25
- [67] SuNAM. SuNAM 2G HTS Wire Specifications. VIII, 25, 44, 50
- [68] M. C. Ahn, J. Young-Jang, T. K. Ko and H. Lee. Novel design of the structure of a non-inductive superconducting coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3):1250–1253, 2011. 27
- [69] EPRI. Superconducting fault current limiters. Research report series, Technology Watch, 2009. 27
- [70] Z. C. Zou, X. Y. Chen, C. S. Li, X. Y. Xiao and Y. Zhang. Conceptual design and evaluation of a resistive-type SFCL for efficient fault ride through in a DFIG. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(1):1–9, 2016. XII, 28
- [71] K. Berger, J. L ev eque, D. Netter, B. Douine and A. Rezzoug. Influence of temperature and/or field dependences of the E-J power law on trapped magnetic field in bulk YBaCuO. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2):3028–3031, 2007. XII, 28, 44
- [72] S. Chapra. *Applied Numerical Methods with Matlab for Engineers and Scientists*. Mc Graw Hill, 2012. 29, 33, 36, 56
- [73] MathWorks. Matlab/Simulink<sup>®</sup>. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com>. 29
- [74] N. A. Kumar and K. Ramesh. Improve transient stability using SVC and PSS. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/improve-transient-stability-using-svc-and-pss.html>. 29
- [75] N. A. Kumar and K. Ramesh. Transient stability improvement using SVC and PSS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(7):1305–1311, 2016. 29

- 
- [76] D. H. Kim, J. Cho, K. Shim, S. J. Lee and S. J. Choi. Uncertainty evaluation for DC critical current determined by using power-law fit to current–voltage curve applicable to superconducting wires and power cables. *J. Supercond. Nov. Magn.*, 24:969–974, 2011. 29, 44
- [77] M. Chudy, Z. Zhong, M. Eisterer and T. Coombs. n-Values of commercial YBCO tapes before and after irradiation by fast neutrons. *Superconductor Science and Technology*, 28:1–10, 2015. 30, 44
- [78] B. Shen, J. Li, J. Geng, L. Fu, X. Zhang, C. Li, H. Zhang, Q. Dong, J. Ma and T. A. Coombs. Investigation and comparison of AC losses on stabilizer-free and copper stabilizer HTS tapes. *Physica C*, 541:40–44, 2017. 30
- [79] M. Noe. *Superconducting fault current limiters. Short course of power applications*. 13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2017), pages 1–34, Geneva, Switzerland, 2017. 30
- [80] C. M. Rey, R. C. Duckworth and Y. Zhang. Splice resistance measurements on 2G YBCO coated conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3):2317–2320, 2009. 32
- [81] National Institute of Standards and Technology. Properties of solid materials from cryogenic- to room-temperatures. [Online]. Available: <https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/materialproperties.htm>. 33
- [82] J. Lu, E. S. Choi and H. D. Zhou. Physical properties of Hastelloy C-276 at cryogenic temperatures. *Journal of Applied Physics*, (103):064908, 2008. 33, 78
- [83] D. R. Smith and F. R. Fickett. Low-temperature properties of silver. *Journal of Applied Physics*, 100(2):119–171, 1995. 33
- [84] M. N. Ozisik. *Heat Conduction*. John Wiley and Sons, 1993. 35
- [85] A. F. Robertson and D. Gross. An electrical-analog method for transient heat-flow analysis. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 61(2):105–115, 1958. 35, 36
- [86] Y. A. Cengel and M. A. Boles. *Thermodynamics, an Engineering Approach*. Mc Graw Hill, 2006. 38
- [87] F. Roy. *Modeling and Characterization of Coated Conductors Applied to the Design of Superconducting Fault Current Limiters*. PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010. 38, 71
- [88] B. Baudouy. *Heat transfer and cooling techniques at low temperature*. CAS-CERN Accelerator School: Superconductivity for Accelerators - Proceedings, pages 1–18, 2015. 38
-

- [89] W. T. B. de Sousa, R. Dias, F. A. Silva, A. Polasek and R. de Andrade Jr. Comparison between the fault current limiting performance of Bi-2212 bifilar components and 2G YBCO coils. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3):1–4, 2013. 41
- [90] W. T. B. de Sousa, A. Polasek, R. Dias, C. F. T. Matt, F. A. Silva and R. de Andrade Jr. *Investigation of 2G coil ScFCL. Modeling and testing*. 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2013), pages 1–5, Genova, Italy, 2013. 41
- [91] Z. Shengnan. *Magnetization of High Temperature Superconducting Trapped-Field Magnets*. KIT Scientific Publishing. KIT, Karlsruhe, 2017. 44
- [92] N. Allen, L. Chiesa and M. Takayasu. *Structural modeling of HTS tapes and cables*. CHATS on Applied Superconductivity, pages 1–38, Bologna, Italy, 2015. 44
- [93] J. Kozak, M. Majka, S. Kozak and J. Janowski. Design and test of coreless inductive superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(3):1–4, 2012. 44
- [94] R. Mowers. *Properties of nonmetallic materials at cryogenic temperatures*. Proceedings of the 1968 summer study on superconducting devices and accelerators, pages 326–367, 1968. 47
- [95] P. Avelino-Pérez. *Transformadores de Distribución, Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas*. Editorial Reverté, 2008. 49, 52, 53
- [96] J. J. Pérez-Chávez. *Aplicación del Método de Elemento Finito y Diseño de Experimentos al Análisis de las Pérdidas en Transformadores*. MSc. Thesis, UNAM, 2013. 49
- [97] D. Seuret-Jiménez y S. Oseguera. Diseño y construcción de bobinas de Rogowski modificadas de bajo costo y alto desempeño. *Nova scientia*, 6(12):1–15, 2014. 50
- [98] J. J. Grainger. *Power System Analysis*. Mc Graw-Hill, 1994. 52, 53, 54, 55
- [99] D. Jovicic and G. N. Pillai. Analytical modeling of TCSC dynamics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2):1097–1104, 2005. XII, 54, 55
- [100] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hil, 1994. 54, 59
- [101] R. Castellanos. Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(2):271–286, 2014. 55
- [102] D. P. Kothari and I. J. Nagrath. *Modern Power System Analysis*. Mc Graw Hill, 2009. 59

- [103] S. Paudyal, G. R. Krishna and M. Sachdev. Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2):600–609, 2010. 59
- [104] M. M. Aly and E. A. Mohamed. *Enhancement of power system transient stability using superconducting fault current limiters with YBCO and Bi-2212*. Proceedings of the 15th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON Z12), pages 1–6, Egypt, 2012. 60
- [105] DuPont, inc. Dupont Kapton General Specifications. [Online]. Available: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-general-specs.pdf>. 61
- [106] O. Mäder. *Simulationen und Experimente zum Stabilitätsverhalten von HTSL-Bandleitern*. PhD Thesis, Karlsruher Institut für Technologie Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2012. XI, 71, 78, 79, 80, 81
- [107] T. Jin, J. Hong, H. Zheng, K. Tang and Z. Gan. Measurement of boiling heat transfer coefficient in liquid nitrogen bath by inverse heat conduction method. *Journal of Zhejiang University Science A*, 10(5):691–696, 2009. XI, 71
- [108] Y. Wang. *Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering*. John Wiley and Sons, 2013. 78
- [109] N. Simon, E. Drexler and R. Reed. Properties of cooper and cooper alloys at cryogenic temperatures. Research report series, National Institute of Standards and Technology Monograph 177, 1992. 78
- [110] L. Dresner. Protection of a test magnet wound with a Ag/BSCCO high-temperature superconductor. Research report series, Oak Ridge National Lab., 1992. 79
- [111] G. Manfreda. *Numerical Analysis of Coupled Thermal-Electromagnetic Problems in Superconducting Cables*. PhD Thesis, Università Degli Studi di Udine, 2015. 80
- [112] J. W. Ekin. *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements*. Oxford University Press, 2006. 80
- [113] E. D. Marquardt, J. P. Le and R. Radebaugh. *Cryogenic material properties database*. 11th International Cryocooler Conference, pages 1–7, Keystone, Co, 2000. 81