



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO TERMoeLECTRICO PARA UN
LIMITADOR DE CORRIENTE DE FALLA
SUPERCONDUCTOR RESISTIVO INTEGRANDO
VARIABILIDADES EN LAS CARACTERISTICAS DE
LOS SUPERCONDUCTORES**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico y Electrónico

P R E S E N T A

Johan Raciél Granados Villeda

DIRECTOR(A) DE TESIS

Frederic Trillaud



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Al Dr. Frederic Trillaud, por la confianza y apoyo proporcionado durante mi formación académica y la realización de este trabajo.

Al Dr. Guilherme Sotelo Gonçalves de la Universidad Federal de Río de Janeiro y el M.I. Gabriel dos Santos de la Universidad Federal Fluminense de Brasil, por proporcionar datos sobre su modelo de LCFS-R.

Al Dr. Wescley de Souza en el Karlsruhe Institute of Technology en Alemania por los datos del modelo de LCFSI-NA.

Al Dr. Rubén Tapia Olvera, profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por formar parte del jurado de este trabajo y apoyarme en este trabajo como representante de mi tutor.

Al Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez, profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por formar parte del jurado de este trabajo.

Al Ing. Rodolfo Soto Carrasco, profesor de Subestaciones Eléctricas en la Facultad de Ingeniería de la UNAM por formar parte del jurado de este trabajo.

Al Dr. Vicente Torres García, profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por formar parte del jurado de este trabajo.

Al Dr. Néstor González Cabrera, profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por formar parte del jurado de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, institución que me ofreció el conocimiento y respaldo para desarrollarme académica y personalmente.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Dedicatoria

A mi padre, gracias por todo el apoyo y cariño que me has dado, por desarrollar mis cualidades más fuertes, darme un hogar y una familia.

A mis Abuelos, Faustino y Emma, a quienes agradezco me hayan dado tanto cariño y las bases de mi persona.

A mis tías, Lupita y Caro, por darme un sitio seguro y mucha confianza.

A mi tío, Guillermo por su apoyo y consejos.

A Karen, Natalia y Cecilia, quienes siempre serán mis pequeñas hermanas.

A mis amigos de la facultad, Josue, Juan, Mendieta, Mario y Rodrigo, por ser las personas en las que pude confiar académica y personalmente en este periodo.

A Andrea, por todo el apoyo y amor.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo y comprobación de un modelo termoeléctrico de un Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo (LCFS-R) que incluye variabilidades entre los superconductores. Este trabajo proporciona un primer paso para estudiar a detalle el comportamiento del LCFS-R tomando en cuenta las propiedades variables de los materiales superconductores de segunda generación.

El modelo termoeléctrico muestra el comportamiento térmico y eléctrico del limitador considerando para ello la ley de potencia para superconductores y una analogía a circuitos eléctricos del comportamiento térmico de los componentes del LCFS-R. El modelo se desarrolló en la plataforma de Matlab-Simulink con el módulo de Simscape Electrical tomando como base un modelo desarrollado previamente en el que se consideran cintas idénticas en el LCFS-R.

El modelo fue verificado en este trabajo mediante una comparación con resultados teóricos y experimentales gracias a datos obtenidos por colegas de la Universidad Federal Fluminense de Brasil y la Universidad Federal de Río de Janeiro.

Con el modelo verificado, se analizó el comportamiento del modelo desarrollado mediante simulaciones con un sencillo caso de estudio. Los resultados obtenidos por el modelo son correctos mostrando el impacto de las variabilidades en las cintas superconductoras en el comportamiento eléctrico y térmico del LCFS-R.

Índice general

Dedicatoria	III
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1. Introducción	7
1.1. Tipos de Limitador de Corriente de Falla Superconductor	8
1.1.1. Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo (LCFS-R)	8
1.1.2. Limitador de Corriente Inductivo (LCFS-I)	9
1.2. Modelo de LCFS-R	10
1.3. Objetivo	11
1.4. Justificación	11
1.5. Alcance del trabajo	12
1.6. Metodología	13
1.7. Hipótesis generales	13
1.8. Contribución de la tesis	13
1.9. Organización de la tesis	14
2. Antecedentes	15
2.1. Superconductividad	15
2.2. Tipos de superconductores	17
2.3. Concepto básico del LCFS-R	19
2.4. Proyectos realizados de LCFS-R	21
2.5. Superconductores usados en la fabricación de LCFS- R	24
2.6. Modelo de cintas idénticas	25
3. Modelo teórico	27
3.1. Principio de funcionamiento	27
3.2. Diseño del LCFS-R	28
3.3. Modelo termoeléctrico	28
3.3.1. Modelo eléctrico	29

3.3.2. Modelo térmico	34
4. Validación del modelo	41
4.1. Primera Comparación	41
4.1.1. Pruebas	43
4.1.2. Discusión	48
4.2. Segunda Comparación	49
4.2.1. Pruebas	52
4.2.2. Discusión	54
4.3. Conclusión	55
5. Impacto del modelo de cintas variables sobre el desempeño de un LCFS-R	57
5.1. Caso de Estudio	57
5.2. Variabilidades entre cintas	59
5.3. Comportamiento eléctrico	61
5.4. Comportamiento térmico	69
5.5. Discusión	73
6. Conclusiones	77
7. Apéndice 1	79
8. Apéndice 2	83
Bibliografía	85

Índice de figuras

1.1. Circuito eléctrico de LCFS-R con impedancia en paralelo	9
1.2. Circuito eléctrico de LCFS-I	10
2.1. Evolución cronológica de la Temperatura crítica de los superconductores	16
2.2. Diagrama que representa el efecto Meissner-Ochsenfeld en un material superconductor ante la presencia de un campo magnético con densidad B	17
2.3. Superficie crítica de un superconductor	17
2.4. Diagrama magnético para superconductores Tipo I y II	18
2.5. Comportamiento del estado mixto de un superconductor tipo II	19
2.6. Comportamiento de un LCFS-R	20
2.7. Esquema de LCFS-R en Chester Street [22]	22
2.8. Bobina superconductora de ENSYSTROB [23]	23
2.9. Detalle de la cinta de BiSCCO-2223 de Sumitomo Electric [®] [26]	24
2.10. Detalle de la cinta de YBCO SCS4050 de SuperPower [®] [27]	24
3.1. Diagrama de conexión del LCFS-R	28
3.2. LCFS-R con N_{tp} cintas conectadas en paralelo	30
3.3. Modelo implementado del LCFS-R	31
3.4. Modelo genérico para la determinación de la distribución de temperatura en la cinta superconductora	35
3.5. Diagrama de frontera	35
3.6. Diagrama general	35
3.7. Modelo térmico de una capa de la cinta	37
3.8. Curva de enfriamiento agregada al modelo [3]. $\Delta T = T - T_{ref}$, donde T es la temperatura a la superficie del cuerpo y T_{ref} la temperatura constante del baño de LN ₂	38
4.1. Circuito para la determinación de la distribución de temperatura en la cinta SAN12500 (SuNAM Co., Ltd.)	42
4.2. Circuito de prueba del LCFS-R para la comprobación del modelo	42
4.3. Resultados de la tensión y corriente eléctrica en el LCFS-R	43
4.4. Comparación de las corrientes en las capas de la cinta	45
4.5. Comparación de las temperaturas en las capas de la cinta	46

ÍNDICE DE FIGURAS

4.6. Comparación con los datos experimentales	47
4.7. Limitador de Corriente Inductivo con Núcleo de Aire [10]	49
4.8. Circuito de prueba para la recuperación térmica	50
4.9. Circuito Equivalente del LCFS-NA	50
4.10. Circuito Térmico y estructura de la cinta SCS12050 de SuperPower® [10]	51
4.11. Resultados de la prueba A	52
4.12. Resultados de la prueba B	53
5.1. Caso de Estudio propuesto para la comparación	57
5.2. Curva de enfriamiento considerada en las simulaciones [6]	58
5.3. Estructura de la cinta SF12100 de SuperPower®	59
5.4. Gráficas de las funciones de densidad de probabilidad para T_c y n	60
5.5. Corriente, resistencia y tensión eléctrica en el LCFS-R	62
5.6. Comportamiento de la resistencia en la capa superconductora R_{sc} en los casos de cintas del MCV y el resultado obtenido por el MCI	64
5.7. Comportamiento de la Corriente i_{sc} en la capa superconductora en el caso 1 del MCV y el resultado obtenido por el MCI	65
5.8. Comportamiento de la Corriente i_{sc} en la capa superconductora en el caso 2 del MCV y el resultado obtenido por el MCI	66
5.9. Comportamiento de la Corriente i_{sc} en la capa superconductora en el caso 3 del MCV y el resultado obtenido por el MCI	67
5.10. Circuito Térmico para la cinta SF12100 de SuperPower®	69
5.11. Temperatura en la capa superconductora del caso 1 del MCV	70
5.12. Temperatura en la capa superconductora del caso 2 del MCV	71
5.13. Temperatura en la capa superconductora del caso 3 del MCV	72
5.14. Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para el caso 1	73
5.15. Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para el caso 2	74
5.16. Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para el caso 3	75
5.17. Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para la recuperación térmica	75
7.1. Diagrama de bloques del algoritmo de Newton-Raphson multivariable implementado, donde e = error, tol = tolerancia, $maxiter$ = máximo de iteraciones	81

Índice de tablas

2.1. Proyectos internacionales realizados de LCFS-R	23
3.1. Equivalencia entre elementos térmicos y eléctricos	36
4.1. Parámetros para el Circuito prueba	42
4.2. Parámetros del LCFS-R	42
4.3. Corriente máxima por capa y variación entre los resultados	44
4.4. Temperatura máxima por capa y variación entre los resultados	44
4.5. Resultados teóricos y experimentales para la corriente I_{LCFS-R}	47
4.6. Resultados teóricos y experimentales para la tensión eléctrica V_{LCFS-R}	47
4.7. Parámetros del circuito de prueba	50
4.8. Características de la cinta SCS12050 de SuperPower [®] [10]	51
4.9. Parámetros de la prueba A	51
4.10. Parámetros de la prueba B	51
4.11. Variación en la temperatura máxima de los resultados del MCV y del MP	54
5.1. Parámetros del caso de estudio analizado	58
5.2. Características de la cinta SF12100 de SuperPower [®] , (Valores promedios indicados por una barra)	60
5.3. Valores para la obtención de la gráfica de densidad normal. Donde μ representa el valor promedio y σ la desviación estándar considerando una distribución normal	61
5.4. Casos de cintas superconductoras del MCV	61
5.5. Valores máximos de corriente durante la falla	62
5.6. Valores máximos de tensión y resistencia eléctrica	63
5.7. Valores máximos de la corriente i_{sc} durante el periodo de falla	68
5.8. Variaciones en los resultados del MCV en la corriente i_{sc} durante el periodo de falla con respecto a los resultados del MCI	76

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
LCFS	Limitador de Corriente de Falla Superconductor
LCFS-R	LCFS resistivo
LCFS-I	LCFS inductivo
LCFS-INB	LCFS-I con Núcleo Blindado
LCFS-INA	LCFS-I con Núcleo Aire
MCV	Modelo de Cintas Variables
MCI	Modelo de Cintas Idénticas
YBCO	Compuesto cerámico compuesto por Ytrio-Bismuto-Cobre-Óxido
BiSCCO	Compuesto cerámico compuesto por Bismuto-Estroncio-Calcio-Cobre-Óxido
SAT	Superconductor de Alta Temperatura Crítica
F	Fuerzas de Lorentz
WPD	Western Power Distribution
LN_2	Nitrógeno líquido
G1	Cintas Superconductoras de primera Generación
G2	Cintas Superconductoras de segunda Generación
B_c	Densidad de flujo magnético crítico
H_c	Campo magnético crítico
I_c	Corriente crítica
T_c	Temperatura crítica
R_{sh}	Resistencia en derivación
BSC-R	Bobina superconductoras resistiva
t	Tiempo

Símbolo	Descripción
SAN12500	Cinta Comercial G2 de SuNAM Co., Ltd.
NIST	National Institute of Standards and Technology
CEPEL	Electrical Energy Research Center
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
ITEP	Institute for Technical Physics
MB	Modelo Brasileño de LCFS-R
DE	Datos Experimentales
MP	Modelo realizado en Python de LCFS-I
G10	Compuesto de fibra de vidrio natural
SCS12050	Cinta Comercial G2 de SuperPower ®
VLCFSI-NA	Tensión en un LCFS-INA
<i>sc</i>	Superconductor o referido a él
Cu	Cobre
Ag	Plata
Ais	Aislamiento
Hs	Hastelloy®
δ	Derivada parcial
Met	Capas metálicas de la cinta superconductora
<i>sup, inf</i>	Subíndices para designar nodos superior e inferior, respectivamente
<i>x, y, z</i>	Ejes del sistema cartesiano de coordenadas
<i>a, p</i>	Referencias al paso de iteración anterior y posterior, respectivamente
<i>n</i>	Índice de Transición

ÍNDICE DE TABLAS

Símbolo	Unidades	Descripción
V	V	Voltaje
I	A	Corriente
R	Ω	Resistencia Eléctrica
ρ	Ωm	Resistividad Eléctrica de un material
G	Ω^{-1}	Conductancia eléctrica
L	H	Inductancia
T	K	Temperatura
H	A/m	Intensidad de Campo Magnético
t	s	Tiempo
F	N	Fuerza de Lorentz
ϕ	W	Flujo de calor
R^{th}	K/W	Resistencia térmica de un material
G^{th}	W/K	Conductancia térmica de un material
ΔT	K	Diferencia de temperatura entre dos nodos
ς	J/(kgK)	Capacidad Calorífica específica de un material
Q	W	Potencia disipada
q	W/m ²	Flujo de calor entre la superficie de la cinta y el LN ₂
γ	kg/m ³	Densidad de un material
C_{th}	J/K	Capacidad térmica de un material
Δt	s	Paso de tiempo
\mathbf{T}	K	Vector de temperatura
\mathbf{Q}	W	Vector del calor disipado en las capas de la cinta superconductora
\mathbf{T}_{ref}	K	Vector de la temperatura en la frontera de la cinta
\mathbf{C}^a	J/K	Matriz de capacidades caloríficas dependientes 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
V_{sc}	V	Voltaje en el superconductor
i_{sc}	A	Corriente a través del superconductor
R_{sc}	Ω	Resistencia total del superconductor

Símbolo	Unidades	Descripción
E_{sc}	V/m	Campo eléctrico del superconductor
J_{sc}	A/m ²	Densidad de corriente del superconductor
T_{sc}	K	Temperatura del superconductor
E_c	V/m	Campo eléctrico crítico, igual a 1 $\mu V/cm$
J_c	A/m ²	Densidad de corriente crítica del superconductor
T_{ref}	K	Temperatura de referencia = 77 K
I_{c0}	A	I_c propio de la cinta a T_{ref}
l_{tp}	m	Longitud total de la cinta superconductora
th	m	Espesor de una capa de la cinta superconductora
w	m	Ancho de la cinta superconductora
A_k	m ²	Área de la sección transversal de la capa k de la cinta
N_{tp}		Número de cintas conectadas en paralelo en una bobina
R_{nsc}	Ω	Resistencia equivalente de las capas superconductoras
R_{nm}	Ω	Resistencia equivalente de las capas metálicas de las cintas del LCFS-R
R_{mk}	Ω	Resistencia equivalente de las capas metálicas de la cinta
$R_{nsc,j}$	Ω	Resistencia equivalente de las cintas superconductoras sin contemplar la cinta j
i_{nsc}	A	Corriente equivalente en las capas superconductoras
i_{nm}	A	Corriente equivalente en las capas metálicas de las cintas del LCFS-R
i_{mk}	A	Corriente equivalente en las capas metálicas de la cinta
$i_{nsc,j}$	A	Corriente equivalente en las cintas superconductoras sin contemplar la cinta j
R_{msh}	Ω	Resistencia equivalente del conjunto R_{nm} y R_{sh}
R_j	Ω	Resistencia generada por las uniones de la cinta a las terminales del LCFS

Introducción

Uno de los principales problemas a los que la ingeniería eléctrica debe hacer frente, es el constante aumento de la demanda energética en el sistema eléctrico. Hoy en día, una alta calidad de energía es obligatoria y existe la necesidad de integrar cantidades cada vez mayores de generación distribuida. Todo esto implica una red eléctrica más sofisticada y un incremento en los niveles de corriente de falla en todo el sistema [1]. Esta red eléctrica es vulnerable a averías y es necesario desarrollar aparatos y procedimientos de protección especiales para evitar desde daños en el aislamiento de los equipos hasta daños generales en la red eléctrica considerablemente más costosos o incluso irreversibles [2]. Los equipos de protección de la red eléctrica actualmente se enfrentan a estos elevados niveles de corriente y a la degradación de su funcionamiento después de años de operación [3]. Bajo estas consideraciones el Limitador de Corriente de Falla Superconductor (LCFS) se muestra como una solución prometedora para mitigar este problema, gracias a su potencial para ser industrializado, sus diseños compactos con posibilidad de montaje modulado, su capacidad de manejar altas densidades de corriente y su funcionamiento automático. Las implementaciones de LCFS aprovechan la característica de los materiales superconductores de presentar una resistencia cercana a cero, cuando su operación está debajo de un valor de corriente denominado corriente crítica, y un valor de resistencia muy grande, cuando se supera este valor de corriente crítica. La transición en el valor de la resistencia en los materiales superconductores es muy rápido y abrupto, por lo que se consume el exceso de energía provocado por la falla de forma casi instantánea [4], limitando la corriente a valores soportados por los equipos del sistema eléctrico en el que se encuentra instalado el LCFS. En condiciones normales de operación el LCFS es un dispositivo que tiene una resistencia cercana a cero y con ello pérdidas despreciables. La introducción de un dispositivo de este tipo a la red eléctrica presenta las siguientes ventajas:

- Favorece la conexión a la red de la generación distribuida, incluyendo fuentes no programables como las renovables.
- Una mayor calidad de la energía, reduciendo las interrupciones, caídas y armónicos.

- Un tamaño compacto que evita o retrasa la necesidad de reemplazar el equipo de protección en caso de una expansión en la red.

Es gracias a estas ventajas que se considera un componente fundamental para las futuras redes inteligentes [1]. En este trabajo se presentará el desarrollo de un modelo de LCFS que permitirá obtener información más precisa del comportamiento de este dispositivo para realizar análisis más exactos sobre su implementación en la red eléctrica.

1.1. Tipos de Limitador de Corriente de Falla Superconductor

En la actualidad alrededor de todo el mundo se tienen implementaciones de diversos diseños y prototipos de LCFS. Dependiendo del diseño y el principio de funcionamiento, estas implementaciones pueden establecerse en distintos tipos. Se describirán los dos tipos de LCFS que por sus características ofrecen mejores perspectivas que tecnologías convencionales en cuestión de pérdidas totales, comportamiento dinámico, recuperación, escalabilidad e implementación en los sistemas eléctricos de potencia [5].

1.1.1. Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo (LCFS-R)

Su funcionamiento se basa en la transición del estado superconductor al estado normal de operación. La resistencia del LCFS durante el funcionamiento normal es despreciable y aumenta rápidamente después de que la corriente de cortocircuito excede la corriente crítica del LCFS. Presenta la desventaja de tener un tiempo de recuperación de varios segundos después de que la falla ha sido contenida, debido al calentamiento del material por su alta resistencia obtenida por la transición al estado normal del material superconductor [4]. Para reducir el tiempo de recuperación y proteger al superconductor de altas temperaturas, se incluye una resistencia en derivación, R_{sh} . Además esta resistencia en derivación ajusta la corriente limitada y evita sobrevoltajes que podrían ocurrir debido a la rápida transición de la resistencia. Este tipo de implementación ofrece ventajas significativas de tamaño, simplicidad y rendimiento durante la falla [5]. Sin embargo sus principales desventajas es el tiempo de recuperación debido al calentamiento del superconductor durante la falla [1, 5] y la necesidad de un diseño que mitigue la inductancia para obtener un interruptor resistivo con poco impacto en la red [5]. En la Fig. 1.1 se muestra un concepto de circuito eléctrico esquemático de Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo LCFS-R [6], donde se puede ver la estructura antes descrita.

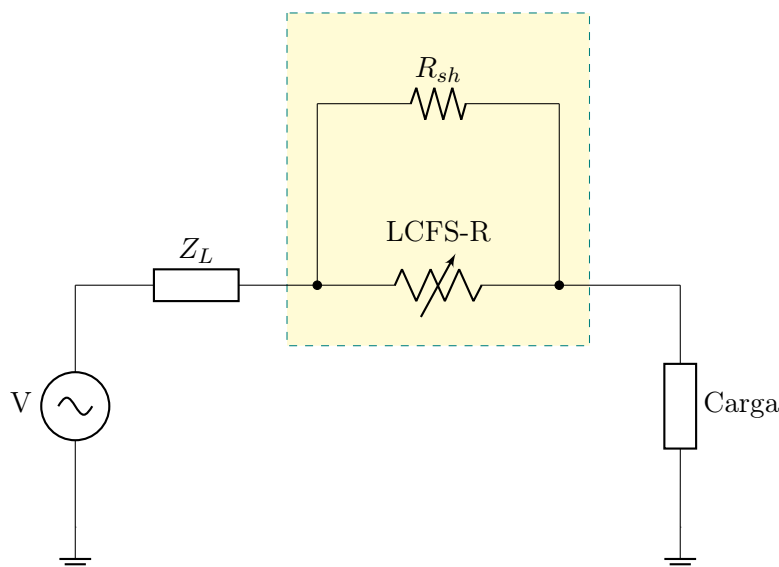


Figura 1.1: Circuito eléctrico de LCFS-R con impedancia en paralelo

1.1.2. Limitador de Corriente Inductivo (LCFS-I)

El término Limitador de Corriente Superconductor Inductivo (LCFS-I) se usa para designar varias estructuras de LCFS que usan como principio la reactancia para la limitación de la corriente de falla. Estas estructuras tienen dos características comunes, en condiciones normales de operación del sistema eléctrico el LCFS-I presenta una reactancia inductiva equivalente baja y en condiciones de falla el LCFS-I pasa a un estado de alta impedancia [6, 7]. Los tipos de LCFS-I constan de un transformador con el devanado primario desarrollado en cobre, mientras que el devanado secundario es en material superconductor y este se encuentra cortocircuitado [5, 7]. En su operación en condiciones de falla, al superar la corriente crítica, el devanado secundario deja su estado superconductor, incrementando la resistencia de manera rápida, aumentando de esta forma la reactancia del limitador. Destacan dos estructuras, el limitador con núcleo blindado LCFS-INB y el limitador con núcleo de aire LCFS-INA. La principal ventaja que se tiene al usar un LCFS-I con respecto a un LCFS-R es que son más compactos y requieren menos materiales para su construcción [5]. En la Fig. 1.2 se muestra un concepto de circuito eléctrico esquemático de Limitador de Corriente de Falla Superconductor Inductivo LCFS-I [1, 6, 7], donde se puede ver la estructura antes descrita.

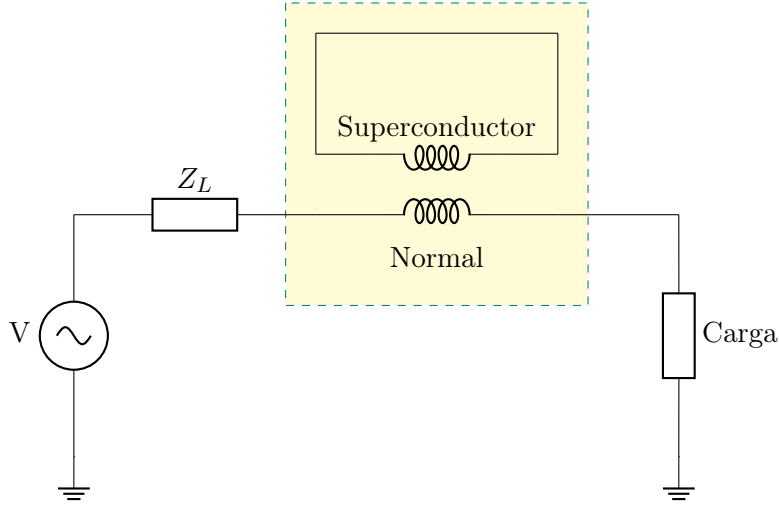


Figura 1.2: Circuito eléctrico de LCFS-I

Se debe señalar que también se han desarrollado LCFS hechos con la combinación del concepto resistivo y el concepto inductivo [8, 9]. Esta tesis desarrolla un modelo LCFS-R ya que parte de un modelo anterior [6], agregando variabilidades en los superconductores de las cintas para analizar los efectos de estas variaciones entre cintas en el LCFS.

1.2. Modelo de LCFS-R

En este trabajo se desarrolla un modelo termoeléctrico para describir el comportamiento de un LCFS-R con cintas superconductoras de características variables (Modelo de Cintas variables, MCV). Se entiende por características variables, a las variabilidades que se encuentran en las propiedades superconductoras básicas de los superconductores de segunda generación. Esas propiedades son la corriente crítica I_c , el índice de transición n y la temperatura crítica T_c . Esos parámetros definen el comportamiento eléctrico y térmico del material. El modelo parte de un trabajo previo desarrollado en [6], el cuál considera que las cintas que conforman al LCFS-R son idénticas (Modelo de cintas idénticas, MCI). De este modelo se retoma las curvas de enfriamiento, la estructura de la implementación y la idea general del modelo. El modelo desarrollado en este trabajo es implementado en Matlab/Simulink, con el módulo Simscape Electrical. El modelo considera cintas de YBCO (la sigla del nombre inglés de Yttrium Barium Copper Oxide).

El MCV en comparación al MCI hace un replanteamiento de como se consideran las resistencias de los elementos que conforman al LCFS-R con el fin de obtener un sistema de ecuaciones que permita integrar la consideración de que las cintas presentan diferentes características en sus capas superconductoras. Lo anterior proporciona un mejor entendimiento de la dinámica que ocurre entre las cintas durante una falla y durante

la recuperación del estado superconductor. El MCV es validado con resultados experimentales y teóricos, gracias a una colaboración con la Universidad Federal Fluminense de Brasil [3] y la Universidad Federal de Río de Janeiro [10]. Finalmente se muestra una sección comparativa con el MCI en la que se analiza el impacto de la integración de las características variables de los superconductores.

Los parámetros de diseño que definen al MCV son: el tipo de cinta utilizada, las características de los superconductores de las cintas, el número de cintas conectadas en paralelo, la longitud de las cintas y el valor de la resistencia en derivación. Los resultados de las pruebas indican un comportamiento adecuado del MCV.

1.3. Objetivo

Desarrollar un modelo termoelectrico de un Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo (LCFS-R) con variabilidades en las características básicas de los superconductores de las cintas, con el propósito de obtener un modelo que represente la dinámica de cintas superconductoras con diferentes características en condiciones normales de operación, en condiciones de falla y su comportamiento post-falla. Los objetivos particulares de la tesis son:

- Realizar una validación del MCV con datos experimentales y teóricos proporcionados por colegas de Universidad Federal Fluminense de Brasil y la Universidad Federal de Río de Janeiro [3] y con datos de un estudio de la recuperación térmica de un Limitador de Corriente de Falla Superconductor Inductivo con Núcleo de Aire (LCFSI-NA) mostrado en [10]
- Realizar una comparación entre el MCV y el MCI en un caso de estudio que permita visualizar el impacto de la integración de las variabilidades en las características básicas (Corriente crítica, temperatura crítica e índice de transición) de los superconductores de las cintas

1.4. Justificación

El aumento constante de la demanda energética, generado por el avance tecnológico, social y poblacional, ocasiona que los sistemas eléctricos de potencia se vuelvan más complejos e interconectados [2, 3]. La generación distribuida se expande reduciendo la distancia entre la carga y la generación. Esto genera un aumento en los niveles de corriente de falla en las diferentes secciones del sistema eléctrico [11]. Además, varias subestaciones operan con equipo que se ve superado por este aumento constante de los niveles de corriente de falla. El Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo (LCFS-R) se presenta como una solución con potencial en ser industrializado para mitigar este problema, debido a sus diseños compactos con posibilidad de montaje

modulado, su capacidad para cambiar rápidamente su impedancia durante una falla, sus altas capacidades de densidad de corriente y su funcionamiento automático.

El progreso en la fabricación de cintas Superconductoras de Alta Temperatura (SAT) de segunda generación permite la producción de Limitadores de Corriente de Falla Superconductores LCFS con cada vez mejores características [12]. Actualmente existen diferentes tipos de cintas superconductoras comerciales las cuales presentan características específicas que permiten desarrollar LCFS que satisfagan necesidades específicas del sistema o sección del sistema eléctrico en el que se desee integrar uno.

Entre las condiciones de funcionamiento de un LCFS se encuentran las especificaciones de las cintas superconductoras que lo componen. Debido a la sensibilidad y dependencia en los parámetros eléctricos y térmicos de las cintas superconductoras en el desarrollo de un LCFS, es necesario conocer con exactitud estas características. Las cintas superconductoras nunca son estrictamente homogéneas en toda su longitud. Aún con un proceso ideal de producción puede presentar variaciones en sus parámetros eléctricos. Las variaciones pueden ser causadas debido a varios factores, como los efectos del procesamiento en el material, las condiciones de manipulación y las condiciones de almacenamiento. Los efectos de estas variaciones en los parámetros de las cintas son de primordial importancia y deben estudiarse con cuidado, ya que pueden generar puntos calientes en el material superconductor [13]. Por tanto, la elección de la cinta superconductora para la implementación en un LCFS no puede limitarse solo a seleccionar algún tipo de cinta, también se debe garantizar las características con las que cuenta la cinta.

La mayoría de los desarrollos de prototipos de LCFS presenta más de una cinta superconductora del mismo tipo en su composición. Actualmente existen distintos modelos que describen correctamente el funcionamiento de un LCFS, implementados en distintas plataformas y formas de modelar el comportamiento. Sin embargo estos modelos no consideran las variaciones presentes entre las cintas superconductoras y su influencia en el funcionamiento del LCFS. El modelo desarrollado en este trabajo pretende integrar estas variabilidades entre cintas superconductoras y ofrecer más información de la afectación de estas variabilidades en el funcionamiento de un Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo LCFS-R con el fin de realizar análisis más exactos para el diseño y comportamiento del LCFS-R en un sistema eléctrico en condiciones de falla y en condiciones normales de operación.

1.5. Alcance del trabajo

El trabajo obtiene un modelo de LCFS-R funcional que integra las características variables de las cintas superconductoras de segunda generación el cual es validado mediante comparaciones con datos teóricos y experimentales de modelos proporcionados por colegas de la Facultad de Ingeniería, la Universidad Federal Flumiense de Brasil y la Universidad Federal de Río de Janeiro.

1.6. Metodología

Para realizar el estudio presentado en este trabajo de tesis se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Construir un marco teórico acerca del LCFS-R, considerando el fenómeno de superconductividad, trabajos previos y diseños existentes de LCFS-R.
2. Desarrollar un modelo teórico que represente el comportamiento eléctrico y térmico del LCFS-R considerando variaciones entre las cintas.
3. Realizar una validación de los resultados teóricos del MCV, comparándolos con resultados teóricos y experimentales.
4. Desarrollar un caso de estudio para realizar una comparación entre el MCV y el MCI, considerando 3 casos de cintas en el MCV para ver el impacto de la inclusión de las variabilidades entre cintas superconductoras en el MCV.
5. Reportar los resultados y conclusiones de la investigación realizada en la tesis.

1.7. Hipótesis generales

Las hipótesis planteadas en este trabajo de tesis son las siguientes:

1. El LCFS-R presenta una resistencia despreciable siempre y cuando en el sistema en el que se encuentra conectado la temperatura y corriente se encuentre por debajo de los valores críticos del superconductor. Es decir, el sistema se encuentra en condiciones normales de operación.
2. Las cintas superconductoras que componen al LCFS-R presentan variaciones que afectan el comportamiento térmico y eléctrico del limitador.
3. Los resultados entre el MCV y el MCI serán similares, presentando ligeras variaciones en la limitación de corriente. Lo que no impacta en el funcionamiento global del LCFS-R.
4. El desarrollo de este modelo permite estudiar el comportamiento de las cintas dentro de un LCFS-R, lo cual permitirá realizar estudios más detallados del comportamiento del LCFS-R en un sistema eléctrico.

1.8. Contribución de la tesis

Se presenta un modelo que describe el comportamiento eléctrico y térmico del LCFS-R. Este modelo describe la transición del estado superconductor al estado normal del

LCFS-R, la distribución de corriente en las cintas superconductoras y el proceso de transferencia de calor dentro del dispositivo considerando que las cintas presentes en la construcción del LCFS-R tienen variabilidades en el índice de transición, la corriente crítica I_c y temperatura crítica T_c . Este modelo se centra en la información del comportamiento de las cintas dentro del LCFS-R.

1.9. Organización de la tesis

Esta tesis presenta la siguiente organización:

- El Capítulo 1 presenta la introducción, los objetivos, la justificación, la metodología que se empleó, las hipótesis planteadas, las contribuciones y la organización de la tesis.
- El Capítulo 2 presenta Antecedentes sobre el fenómeno de superconductividad, los tipos de cintas superconductoras comerciales, los conceptos básicos del LCFS-R, una revisión del modelo del cual parte el trabajo y una revisión a la literatura de los modelos de LCFS-R desarrollados en el mundo.
- En el Capítulo 3 se presenta el desarrollo del MCV. Mostrando a detalle las consideraciones tomadas para la inclusión de las variabilidades entre cintas.
- En el Capítulo 4 se presenta la validación del MCV con datos teóricos y experimentales.
- En el Capítulo 5 se presenta la comparación entre el MCV y el MCI. Se explica el impacto de las variabilidades entre las cintas superconductoras que conforman al LCFS-R.
- El Capítulo 6 presenta las conclusiones obtenidas en el presente trabajo.
- Finalmente los Apéndices presentan complementos a los Capítulos antes descritos que facilitan al lector el entendimiento del tema.

Antecedentes

Este capítulo muestra los antecedentes necesarios para entender el fenómeno de superconductividad y los conceptos básicos del LCFS-R. Se presentan trabajos previos sobre modelos de LCFS-R y sus resultados.

2.1. Superconductividad

La superconductividad es un fenómeno físico en el que algunos materiales presentan una resistencia eléctrica nula cuando son enfriados a temperaturas bajas. Fue descubierta a principios del siglo XX, cuando la disponibilidad de sistemas criogénicos permitió realizar mediciones de la resistencia eléctrica de distintos materiales a temperaturas cada vez más bajas. Fue descubierta por el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes en 1911 quien tras su éxito en la licuación de helio realizó experimentos enfocados en la resistividad del mercurio, elemento que en ese entonces podía conseguirse fácilmente con un alto grado de pureza, y encontró que a una temperatura de 4.2 K el mercurio pasaba bruscamente a un estado donde no mostraba resistencia eléctrica [14]. La temperatura a la que un elemento pierde su resistividad se denominó temperatura crítica T_c . A partir del descubrimiento de Onnes se han descubierto un gran número de materiales y aleaciones con diferentes valores de T_c . Sin embargo no es hasta alrededor de 1985 que se presenta un aumento importante en la T_c de los materiales superconductores descubiertos, los físicos Johannes Georg Bednorz y Karl Alexander Müller descubren el compuesto LaBaCuO , con una T_c superior a los 30 K. Este descubrimiento marca la aparición de los Superconductores de Alta Temperatura Crítica (SAT). En la Fig. 2.1 se muestra la evolución cronológica de la temperatura crítica de los varios superconductores. Las líneas horizontales indican el refrigerante necesario para llevar cada material a su estado superconductor [6, 13].

El fenómeno de superconductividad no se limita solo a la pérdida de la resistencia eléctrica. La investigación de Onnes expuso que el estado superconductor, estado en el que los materiales presentan una resistencia eléctrica nula debido al fenómeno de la superconductividad, podía perderse al exponer el material a un cierto valor de campo

2. ANTECEDENTES

magnético [15]. Esto implica que el estado superconductor no puede existir en presencia de un campo magnético mayor que un valor crítico B_c , incluso cuando se esta por debajo de la T_c . En 1933 los físicos Walter Meissner y Robert Ochsenfeld descubrieron que los superconductores en estado superconductor ($T < T_c$) son diamagnetos perfectos, es decir, aplicando una densidad de flujo B , de modo que $B < B_c$, se observa una exclusión completa de este flujo por parte del material superconductor, Fig. 2.2(a). Si la densidad de campo magnético B aumenta hasta superar el valor de B_c , el campo magnético penetra completamente el material, como se muestra en la Fig. 2.2(b). Durante esta condición $B > B_c$, el material pierde su estado superconductor y se vuelve resistivo, aun cuando la temperatura sea menor que T_c [13].

Aún cuando la resistencia eléctrica en estado superconductor es nula, los materiales tienen una capacidad limitada de transportar corriente eléctrica, este valor límite se denomina corriente crítica I_c . El estado superconductor también se pierde si supera el valor de I_c . Los valores críticos I_c , B_c y T_c definen los límites para mantener el estado superconductor en un material. En la Fig. 2.3 muestra la superficie crítica de un superconductor, las condiciones necesarias para entrar en estado superconductor. Cualquier condición del material fuera de esta superficie indica una pérdida del estado superconductor [4].

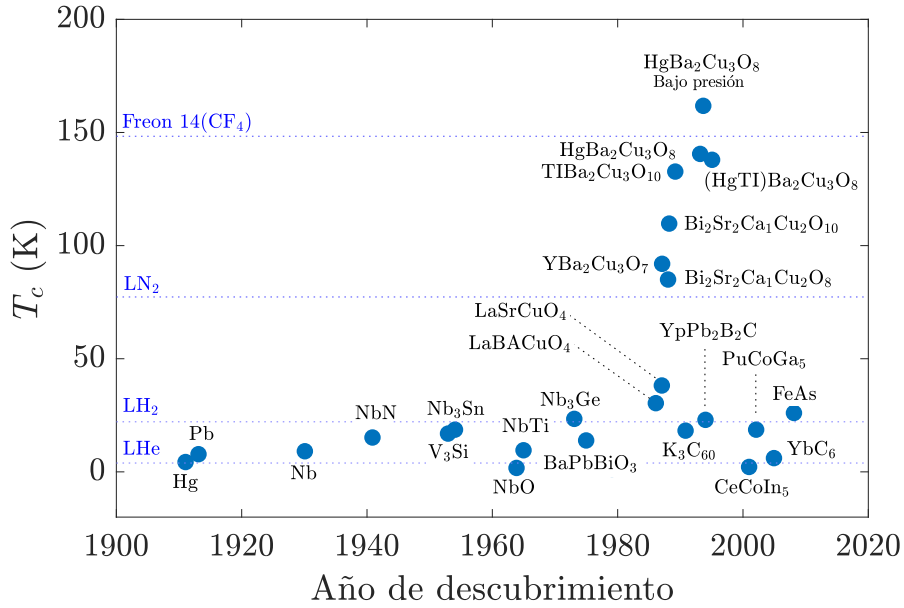


Figura 2.1: Evolución cronológica de la Temperatura crítica de los superconductores

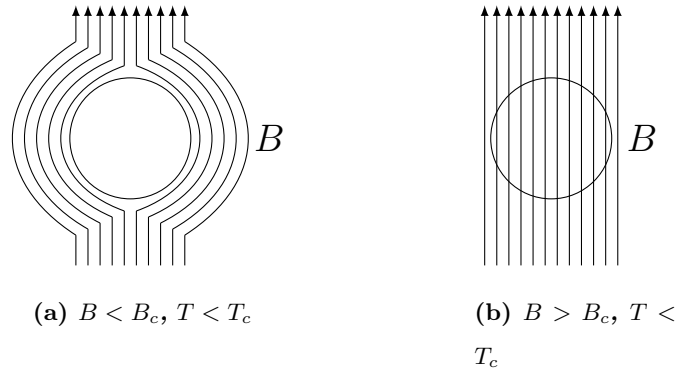


Figura 2.2: Diagrama que representa el efecto Meissner-Ochsenfeld en un material superconductor ante la presencia de un campo magnético con densidad B

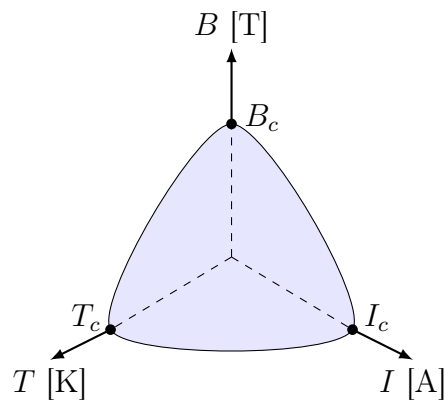


Figura 2.3: Superficie crítica de un superconductor

2.2. Tipos de superconductores

Los superconductores se definen en dos tipos dependiendo del comportamiento del superconductor en un campo magnético aplicado. Los superconductores tipo I en el estado superconductor no permiten la penetración de campos magnéticos externos H inferiores al valor crítico, Fig. 2.2(a). Cuando el campo magnético H supera a H_c , el material pierde el estado superconductor y permite el paso de todo el campo magnético exterior [13], Fig. 2.2(b). El tipo I de superconductores por lo general presentan un valor T_c y H_c demasiado bajos para cualquier aplicación práctica [14]. La Fig. 2.4(a) muestra el diagrama magnético para este tipo de superconductores.

Los superconductores tipo II presentan un comportamiento distinto. La diferencia

2. ANTECEDENTES

entre este tipo de superconductores y el tipo I es que presentan un estado en el que permiten la penetración parcial de campos magnéticos externos. Resultando en una mezcla entre el estado superconductor, Fig. 2.2(a), y el estado normal, Fig. 2.2(b). La Fig. 2.4(b) muestra el diagrama magnético para los superconductores tipo II. Donde se presentan dos valores de campo magnético crítico, H_{c1} y H_{c2} . Dentro del área delimitada por H_{c1} el campo magnético no penetra al superconductor. Sin embargo cuando se supera el valor de H_{c1} el material superconductor presenta un estado denominado como estado mixto. El material permite la entrada parcial del campo magnético externo en filamentos microscópicos cuantizados con un flujo magnético llamados vórtices, en el centro de cada vórtice el material deja de ser superconductor, cada vórtice introduce en el superconductor una línea de campo equivalente a un cuanto, $\phi_0 = 2.067833636 \times 10^{-15}$ Wb, y tienen un diámetro aproximado de 10^{-7} cm, [16]. Los vórtices forman una red teóricamente regular desde la frontera del superconductor, Fig. 2.5(a). Si la fuerza del campo magnético aumenta, el tamaño de estos vórtices no cambiará, pero el número de estos aumentará ocupando el material hasta que no exista más espacio entre ellos, obteniendo la transición al estado normal del material [6, 13]. Si se supera el valor de H_{c2} , el material pierde por completo su estado superconductor y permite el paso de todo el campo magnético externo. Si mientras en un superconductor tipo II que se encuentra en estado mixto circula una corriente i , Fig. 2.5(b) [6], aparecerán las llamadas fuerzas de Lorentz F , fuerzas que actúan sobre cargas eléctricas móviles individuales dentro del campo magnético, estas fuerzas F tienden a mover los vórtices dentro del superconductor en una dirección perpendicular a i . Sin embargo los superconductores cuentan con una fuerza de sujeción F_s , causada por una propiedad extrínseca del material que es provocada por los defectos en la microestructura del superconductor, lo que detiene el movimiento de los vórtices. Es decir cuando la corriente i es menor a I_c , F es menor que F_s y por tanto los vórtices no presentan movimiento.

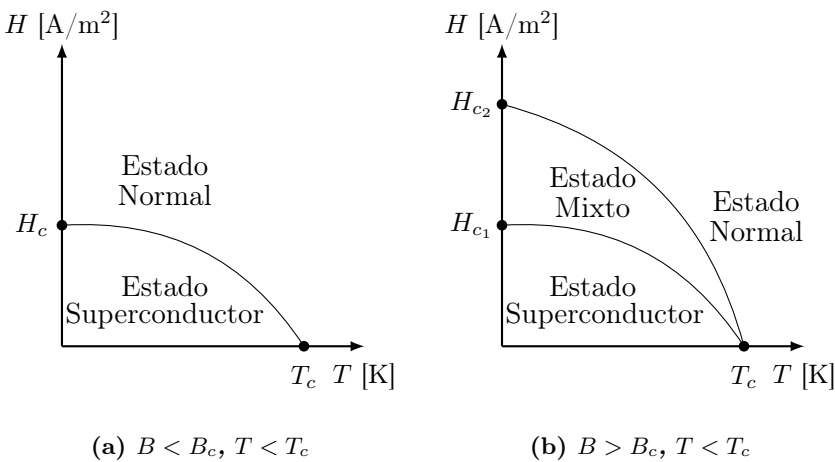
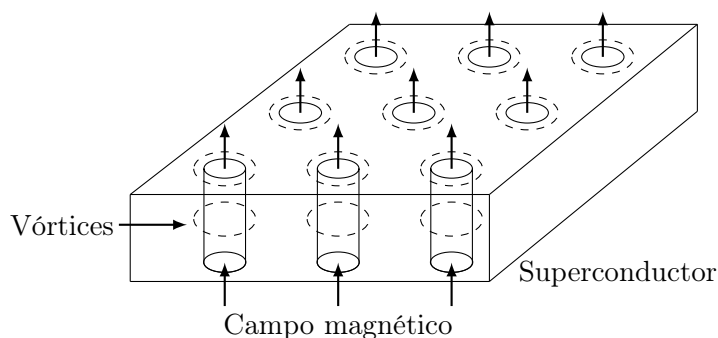
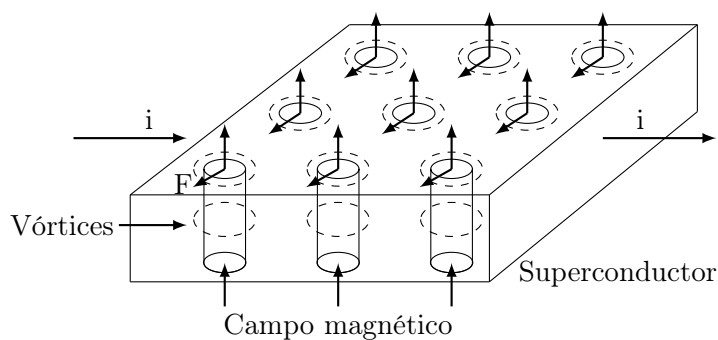


Figura 2.4: Diagrama magnético para superconductores Tipo I y II

(a) *Estado mixto*(b) *Estado mixto con una corriente i* **Figura 2.5:** Comportamiento del estado mixto de un superconductor tipo II

Cuando i supera el valor de I_c , F supera a F_s y los vórtices se mueven en dirección perpendicular a i , generando un campo eléctrico a lo largo del superconductor, que se asocia al aumento de la temperatura [13, 16]. En esta etapa, el material comienza a tener un comportamiento resistivo causado por el campo eléctrico, aun cuando la temperatura esté por debajo de T_c y de que se presente resistencia nula en la trayectoria de i en el material superconductor. Esto deriva en un incremento en la temperatura del material la cual puede superar a T_c y por tanto llevar al material a su estado normal.

2.3. Concepto básico del LCFS-R

El Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo LCFS-R es un dispositivo de protección que basan su funcionamiento en el comportamiento no lineal de la resistencia del material superconductor ante el aumento de la corriente durante una condición de falla en el sistema eléctrico en el que se encuentre conectado. De forma práctica consiste en agregar una resistencia al sistema eléctrico que consuma la energía obtenida

por una condición de falla. Los LCFS-R se conectan en serie al sistema eléctrico. La Fig. 2.6(a) muestra el comportamiento de la resistencia del superconductor con respecto a la corriente que fluye a través del material, se observa la transición de manera abrupta al estado normal cuando la corriente i supera el valor de I_c , aumentando drásticamente la resistencia del superconductor hasta el valor de saturación, el cual está definido por el estabilizador de la cinta o la resistencia en derivación del LCFS-R si se tiene presente [17]. En cuanto a la corriente de falla, la Fig. 2.6(b) muestra una comparación de la corriente ante una falla con y sin LCFS-R obtenida de [17] donde se aprecia como la integración del LCFS-R en el sistema eléctrico reduce considerablemente los niveles de corriente de falla. Si se conecta un LCFS-R en el sistema eléctrico la corriente de falla puede ser reducida a un valor tolerable por el sistema.

Para representar el comportamiento del LCFS-R se han implementado distintos tipos de modelos que se diferencian entre sí por el grado de detalle del comportamiento del LCFS-R. El grado de detalle de los modelos de LCFS-R depende de los requerimientos del análisis a realizar [6, 13]. Entre los modelos más simples, destaca el modelo de escalón de resistencia [18], este modelo considera que si el valor absoluto de la corriente a través del LCFS-R i es menor que la corriente de disparo i_d , el LCFS-R se encuentra en estado superconductor y por tanto su resistencia R_{sc} será despreciable. Cuando la corriente i supera el valor de i_d , la resistencia R_{sc} se incrementará al valor nominal R_n . Cuando la corriente i se reduce a un valor menor a i_d , el LCFS-R será restaurado a su estado superconductor después de un tiempo de recuperación. El comportamiento de este modelo se describe en (2.1) [18].

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

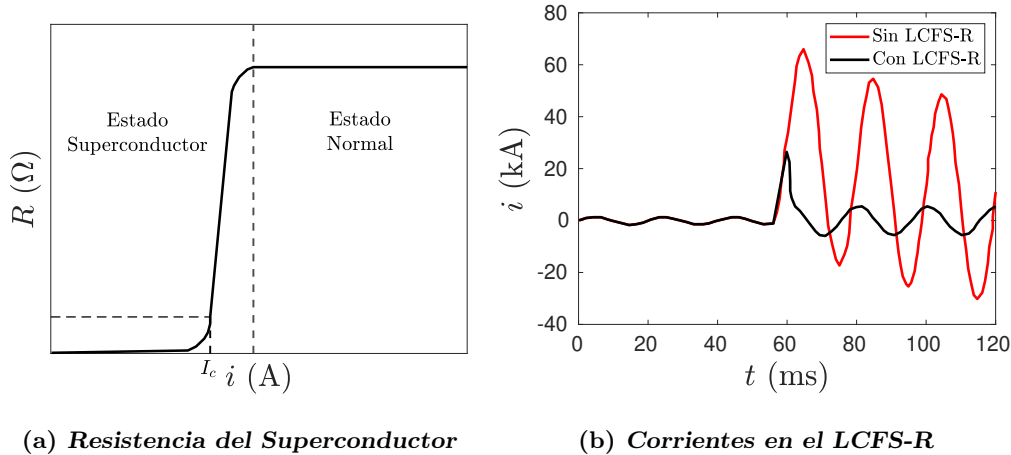


Figura 2.6: Comportamiento de un LCFS-R

Otro modelo destacable es el modelo exponencial, este modelo representa con mayor precisión el comportamiento del LCFS-R. El comportamiento de este modelo se describe por (2.2). En este modelo 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 . Cuando se presenta la falla, la resistencia R_{sc} incrementa exponencialmente con el tiempo a partir de una constante de tiempo τ , ya que si supera el valor de la corriente I_c , hasta alcanzar el valor máximo de resistencia R_m en el que el LCFS-R se asume esta en su estado normal [19]. En este modelo no se consideran los efectos térmicos del LCFS-R, por lo que no se describe la fenomenología básica de los superconductores [18, 19].

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

Los modelos más refinados consideran toda la fenomenología básica de los superconductores, para representar su comportamiento eléctrico se emplea la ley de potencia para el superconductor [13], descrita en (2.4), 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 en el superconductor, J_c es la densidad de corriente crítica y n es el índice de transición del superconductor [13]. Además en estos modelos se considera la ecuación de transferencia de calor para la evolución del comportamiento térmico en el superconductor, mostrada en (2.3), donde C_{th} es la capacidad térmica, Q es la densidad de potencia gastada y k es la conductividad térmica [13, 18].

$$\nabla \cdot (-k\nabla T) + C_{th} \frac{\delta T}{\delta t} = Q \quad (2.3)$$

$$E_{sc} = E_c \left(\frac{J_{sc}}{J_c(T)} \right) \quad (2.4)$$

Considerar la ecuación de transferencia de calor en cada componente del LCFS-R permite obtener circuitos eléctricos para manipular de manera más sencilla los acoplamientos no lineales entre el comportamiento eléctrico y térmico [20]. Al considerar (2.3) y (2.4) los modelos pueden considerar circuitos eléctricos equivalentes para modelar el comportamiento térmico, permitiendo manipular con cierta facilidad los acoplamientos no lineales de los fenómenos eléctricos y térmicos del LCFS-R. Estos modelos pueden obtener una mejor aproximación al comportamiento real electromagnético y térmico del superconductor. El modelo presentado en este trabajo hace consideración de la ecuación de potencia para superconductores y la ecuación de transferencia de calor.

2.4. Proyectos realizados de LCFS-R

Debido a las características y versatilidad del LCFS-R, alrededor del mundo se han diseñado y ensamblado distintos prototipos. La tendencia actual es la fabricación

2. ANTECEDENTES

con LCFS-R con cintas de Superconductores de Alta Temperatura (SAT) ya que el enfriamiento es realizado con nitrógeno líquido, reduciendo el costo de enfriamiento debido a que es un material abundante y de bajo costo [13].

En el año 2012 la Western Power Distribution (WPD), entidad a cargo de la operación de la red eléctrica de distribución de varios sectores de Inglaterra que está a cargo de entregar electricidad a 7,8 millones de usuarios en el Reino Unido [21], implementó FlexDGrid, un proyecto que buscaba aumentar la flexibilidad del sistema eléctrico frente al aumento de la demanda. Este proyecto optó por incluir dispositivos de LCFS-R para la limitación de corriente. Para ello se utilizó la subestación Chester Street ubicada en la red eléctrica de Birmingham, Inglaterra, Fig. 2.7 [22]. Los LCFS-R eran monofásicos a 12 kV con una corriente nominal de 1.6 kA, se emplearon 3 módulos de LCFS-R, uno por fase. Estaban constituidos por cintas fabricadas de óxido de cobre, bario e itrio (YBCO) [22]. Este proyecto tuvo una duración de 5 años, empezando en 2012 y finalizando en 2017. Gracias a este proyecto se demostró que la inclusión de un LCFS libera una mayor capacidad de red y mejoran la seguridad del sistema eléctrico en comparación con las soluciones tradicionales de limitación de nivel de falla. Sin embargo también se obtuvo que se requiere más trabajo relacionado con el funcionamiento y la confiabilidad de los dispositivos superconductores resistivos para garantizar que la conexión al sistema eléctrico sea sólida y segura. Esto implicaría cambiar la metodología de enfriamiento del dispositivo en la instalación de Chester Street de un circuito de enfriamiento cerrado a un sistema de enfriamiento de circuito abierto [21, 22].

Otro proyecto destacable de LCFS-R es ENSYSTROB, proyecto financiado por el gobierno alemán para un LCFS-R que comenzó en 2009 y finalizó en 2011. Tuvo como objetivo la construcción de un LCFS-R trifásico de 12 kV a 800 A para la protección del suministro doméstico en una central eléctrica [23]. Con este proyecto se pudo demostrar la estabilidad del LCFS-R con respecto a la alta tensión. Se mostró, mediante simulaciones y experimentos, que las pérdidas de CA en funcionamiento normal son menores que la entrada de calor de los cables de corriente. El LCFS-R constó de bobinas construidos a base de cintas de YBCO conectados en serie como el mostrado en la Fig. 2.8 [23].

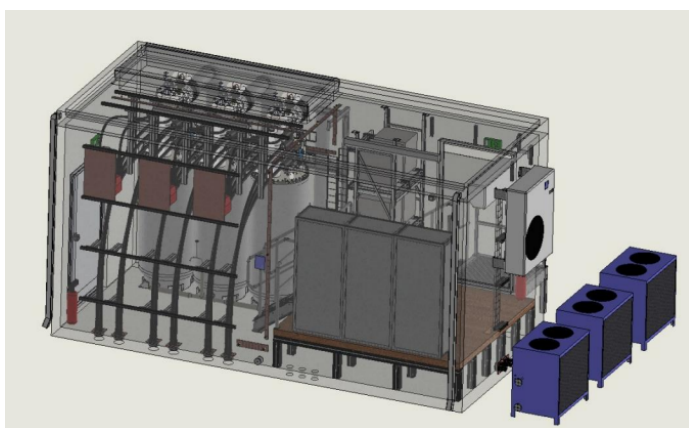


Figura 2.7: Esquema de LCFS-R en Chester Street [22]

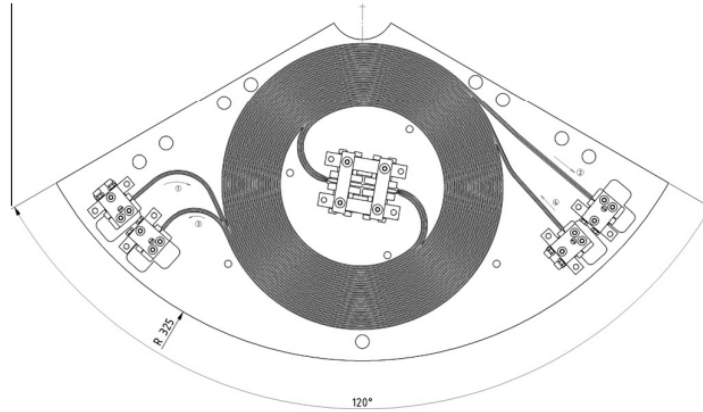


Figura 2.8: Bobina superconductora de ENSYSTROB [23]

El proyecto AmpaCity es otro proyecto Alemán que logró avances significativos en el desarrollo de dispositivos hechos con Superconductores de Alta Temperatura (SAT), en particular cables y limitadores de corriente. El objetivo del proyecto fue desarrollar, fabricar e instalar un sistema SAT de 10 kV y 40 MVA que consta de un limitador de corriente de falla y un cable de 1 km en la ciudad de Essen, Alemania. Este proyecto demostró que el uso generalizado de cables y limitadores de corriente de falla SAT depende de la medida en que sea posible mejorar la relación precio-rendimiento de los materiales SAT, optimizar el costo y la confiabilidad de la tecnología de enfriamiento requerida [24].

La Tabla 2.1 [5] muestra otros proyectos de LCFS-R que se han implementado en el mundo. En la siguiente sección se abordará el tema de los materiales superconductores usados en la fabricación de LCFS-R.

Fabricante	País/año	Características	Fases	Material Superconductor
ABB	Suiza/2001	8 kV, 800 A	1	BSCCO-2212
ACCEL/Nezans SC	Alemania/2004	6.9 kV, 600 A	3	BSCCO-2212
KEPRI	Korea/2004	3.8 kV, 200 A	3	YBCO
Mitsubishi	Japón/2004	200 V, 1 kA	1	YBCO
AMSC/Siemens	EUA/2012	115 kV, 1.2kA	3	YBCO
Nexans SC	Alemania/2015	10 kV, 2.3 kA	3	YBCO

Tabla 2.1: Proyectos internacionales realizados de LCFS-R

2.5. Superconductores usados en la fabricación de LCFS- R

Actualmente los principales retos que afronta la producción comercial de los superconductores son: fabricar un material barato, que pueda funcionar a temperatura ambiente y que tenga una fácil manufactura. Los materiales Superconductores de Alta Temperatura (SAT) descubiertos hasta ahora mantienen su estado superconductor con una temperatura de operación entre 77 K y 150 K, la cual se puede obtener con nitrógeno líquido (LN_2), fluido industrial con bajo costo y que cuenta con excelentes propiedades como aislante [25]. Existen principalmente dos tecnologías de cintas SAT usadas en la fabricación de diseños y prototipos de LCFS-R, los SAT de primera y segunda generación (G1 y G2), las cuales están fabricadas de compuestos de BiSCCO e YBCO respectivamente [5]. En este tipo de cintas se presenta una matriz de materiales metálicos adicionales al material superconductor con el fin de resistir corrientes por encima de la corriente crítica del superconductor, proporcionar soporte mecánico y soporte térmico a la cinta. Destacan las cintas SAT G1 basadas en filamentos de BiSCCO (Bismuto-Estroncio-Calcio-Cobre-Óxido) inmersos en una matriz de plata. Este tipo de cintas presenta dos compuestos principales: el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{10+x}$ (BiSCCO-2223) y el $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ (BiSCCO-2212) [13]. En la Fig. 2.9 se muestra a detalle la estructura de una cinta de BiSCCO-2223 hecha por Sumitomo Electric[®] [26]. De igual forma destacan las cintas G2 basadas en YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, Ytrio-Bismuto-Cobre-Óxido), también conocido como (RE)BCO (Óxido de cobre y bario de tierras raras, por sus siglas en inglés de Rare-earth barium copper oxide), compuestas por capas de diferentes metales que cubren una delgada capa de YBCO [5]. En la Fig. 2.10 se muestra la estructura de una cinta basada en YBCO hecha por SuperPower[®] [27]. En el desarrollo de este trabajo se consideran distintas cintas de YBCO para las simulaciones ya que es la tendencia actual en la construcción de LCFS-R.



Figura 2.9: Detalle de la cinta de BiSCCO-2223 de Sumitomo Electric[®] [26]

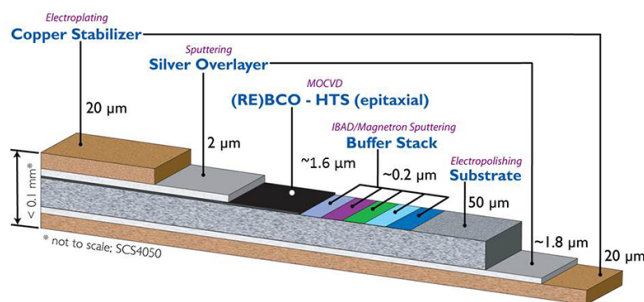


Figura 2.10: Detalle de la cinta de YBCO SCS4050 de SuperPower[®] [27]

2.6. Modelo de cintas idénticas

El modelo realizado en este trabajo parte del Modelo de Cintas Idénticas (MCI) realizado por el Dr. José Juan Pérez Chávez, presentado en su trabajo de Doctorado [6]. El modelo MCI es un modelo que resuelve el acoplamiento termoelectrico de un LCFS-R, tomando en cuenta la dependencia de la temperatura de las propiedades de los materiales que constituyen al LCFS-R. Las ecuaciones de transferencia de calor dentro de cada componente del LCFS-R del MCI consideran circuitos eléctricos equivalentes, con el fin de describir los comportamientos eléctricos y térmicos del LCFS-R. En el MCI se resuelve la distribución de corriente a través de las diferentes capas que conforman las cintas superconductoras a través del método de Newton-Raphson, considerando la resolución de la ecuación no lineal del superconductor y que el voltaje entre las cintas superconductoras es el mismo. Además, se considera la dependencia de la corriente crítica I_c y del índice de transición n con la temperatura del superconductor. Fue desarrollado en la plataforma de simulación Matlab-Simulink con el módulo Simscape Electrical y ha sido validado con simulaciones y resultados experimentales de un diseño particular de LCFS-R obtenido en la literatura, obteniendo resultados correctos [6].

Modelo teórico

En este capítulo se muestra el desarrollo de un modelo teórico del LCFS-R derivado del modelo presentado en [6]. En este modelo, se incorporaron más detalles de la transición del estado superconductor al estado normal debido a las variabilidades de las propiedades eléctricas del superconductor entre cintas. Se describen las ecuaciones para describir el comportamiento termoeléctrico del LCFS-R por medio de un modelo de parámetros concentrados.

3.1. Principio de funcionamiento

Durante el funcionamiento estable del sistema eléctrico al que se conecta el LCFS-R, la corriente fluye sin ninguna limitación, esto debido a que la resistencia del superconductor dentro de los valores críticos de corriente, temperatura y campo magnético es cercana a cero, además de que el diseño de construcción reduce la impedancia inductiva con el fin de hacerla despreciable.

Sin embargo, en el estado de falla, al elevarse los niveles de corriente y superar el valor crítico de corriente de las cintas que conforman al LCFS-R, los componentes superconductores cambian a su estado normal y por tanto hay un aumento drástico en la resistencia del superconductor. Durante este cambio de estado la corriente empieza a distribuirse en las capas metálicas de la cinta, por lo que la participación de las capas superconductoras de las cintas en el proceso de limitación disminuye. El valor de la resistencia eléctrica del LCFS-R por tanto alcanza un valor máximo determinado por la resistencia de derivación conectada al LCFS-R.

El aumento en la resistencia permite al LCFS-R disipar el exceso de energía causado por la falla, limitando la corriente a valores tolerables por el sistema eléctrico. Térmicamente cuando se presenta la falla se tiene un aumento en la temperatura del LCFS-R. El tiempo requerido para volver a un funcionamiento normal del LCFS-R esta en función del tiempo requerido para enfriar al limitador por debajo de la temperatura crítica de las cintas y así llevarlo a su estado superconductor nuevamente [4].

3.2. Diseño del LCFS-R

El diseño considera bobinas superconductoras resistivas BSC-R, conectadas en paralelo enfriadas mediante Nitrógeno líquido LN_2 . A este módulo se le conecta una resistencia de derivación externa R_{sh} , como se muestra en la Fig. 3.1, donde i es la corriente total a través del circuito, la cuál se divide en la corriente circulante por la resistencia de derivación i_{sh} y la corriente que circula en el limitador de corriente i_{BSC-R} . En este diseño la resistencia de derivación proporciona una ruta extra para la corriente total, con el fin de acelerar el tiempo de recuperación del LCFS-R [4] y regular la corriente limitada. Se considera fuera del sistema criogénico del limitador, con el fin de que la temperatura alcanzada por la resistencia en derivación en el estado de falla no afecte el consumo de LN_2 .

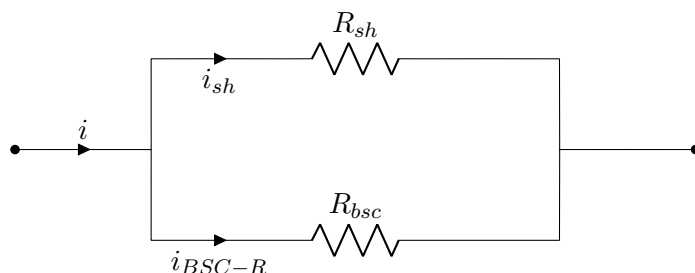


Figura 3.1: Diagrama de conexión del LCFS-R

3.3. Modelo termoeléctrico

El modelo que se presenta en este trabajo resuelve el acoplamiento térmico y eléctrico del limitador de corriente superconductor, considerando la vinculación de la temperatura con las características de los materiales. El modelo se implementó en el software Matlab/Simulink, la distribución de corriente en las capas de la cinta superconductora y la resistencia de derivación se resuelven mediante un algoritmo de Newton-Raphson multivariable en cada paso de tiempo. Además se considera lo siguiente:

- Las cintas en paralelo tienen diferentes características: factor de transición n , temperatura crítica T_c y corriente crítica I_c [13].
- Las cintas están aisladas entre si, conectadas en paralelo y son enfriadas con LN_2 .
- El campo eléctrico instantáneo está uniformemente distribuido en la sección transversal de las cintas que conforman al limitador, por tanto las cintas y capas se modelan como resistencias conectadas en paralelo.

- La corriente crítica de las cintas superconductoras tiene un decremento lineal con el aumento de la temperatura.
- La inductancia es despreciable en la bobina superconductora resistiva.
- La temperatura es uniforme a lo largo de la cinta.

3.3.1. Modelo eléctrico

Para el comportamiento eléctrico del LCFS-R, se implemento un modelo de parámetros concentrados, en el cual los parámetros dependen de la temperatura. La resistencia eléctrica de la capa superconductora de una cinta R_{sc} se obtiene de la ley de potencia para superconductores [28], como se muestra en (3.1). Donde $E_c = 1[\mu V/cm]$ es el campo eléctrico crítico, l_{tp} es la longitud de la cinta, I_c es la corriente crítica de la cinta superconductora y n es el índice de transición del superconductor.

$$R_{sc} = \frac{E_c l_{tp}}{I_c} \left(\frac{|i_{sc}|}{I_c} \right)^{n-1} \quad (3.1)$$

La corriente crítica I_c y el índice n dependen de la temperatura de la cinta T_{sc} , como se muestra en (3.2) y (3.3), donde n_0 es el factor n a la temperatura de referencia $T_{ref} = 77 K$, I_{c_0} es la corriente crítica con campo propio de la cinta a T_{ref} y T_c es la corriente crítica de la cinta superconductora [29].

$$I_c(T_{sc}) = I_{c_0} \left(\frac{T_c - T_{sc}}{T_c - T_{ref}} \right) \quad (3.2)$$

$$n(T_{sc}) = n_0 \left(\frac{T_{ref}}{T_{sc}} \right) \quad (3.3)$$

En la Fig. 3.1 se muestra una generalización del LCFS-R. En la Fig. 3.2 se describe el modelo implementado, en esta figura se pueden ver los detalles de la BSC-R y la distribución de la corriente a través de las cintas. Este modelo admite varias cintas en paralelo por lo que en la figura estas cintas se ven representadas por dos resistencias en paralelo, la resistencia del componente superconductor R_{sc_i} y la resistencia de las capas metálicas la cinta R_{mn} . El conjunto de las capas metálicas de una cinta esta referido a la matriz metálica de la cinta.

De la Fig. 3.2, se obtienen las siguientes ecuaciones que describen las resistencias y corrientes en el LCFS-R:

$$R_{nsc} = \left(\sum_{k=1}^{N_{tp}} \frac{1}{R_{sc_k}} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

$$R_{nm} = \left(\sum_{k=1}^{N_{tp}} \frac{1}{R_{m_k}} \right)^{-1} \quad (3.5)$$

$$R_{nsc,j} = \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{N_{tp}} \frac{1}{R_{sc_k}} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

$$i_{nm} = \sum_{k=1}^{N_{tp}} i_{m_k} \quad (3.7)$$

$$i_{nsc} = \sum_{k=1}^{N_{tp}} i_{sc_k} \quad (3.8)$$

$$i_{nsc,j} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{N_{tp}} i_{sc_k} \quad (3.9)$$

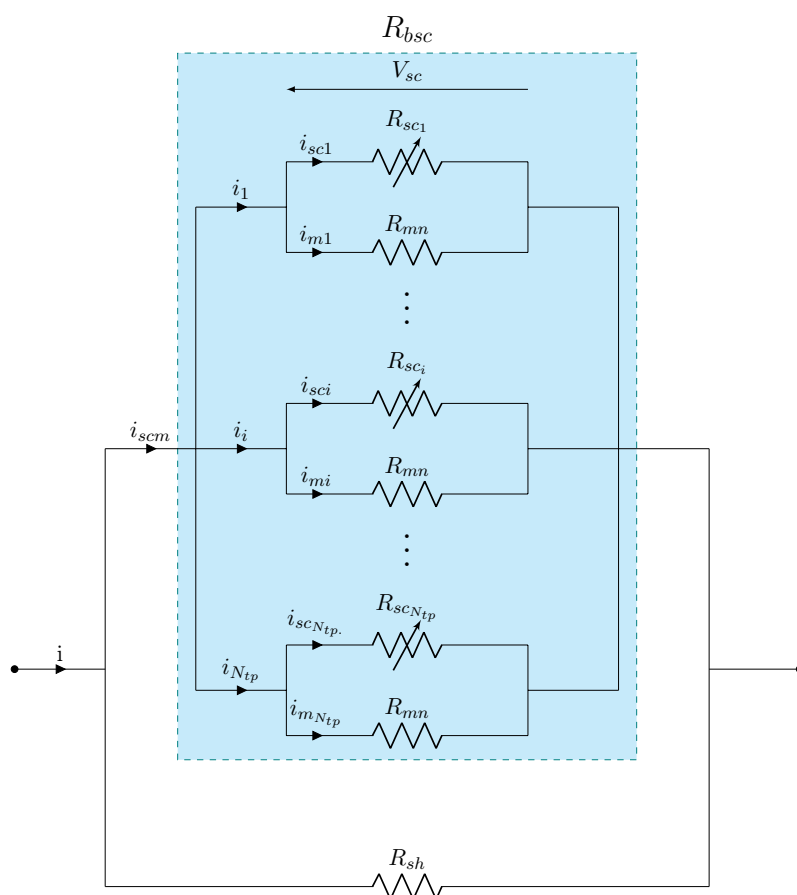


Figura 3.2: LCFS-R con N_{tp} cintas conectadas en paralelo

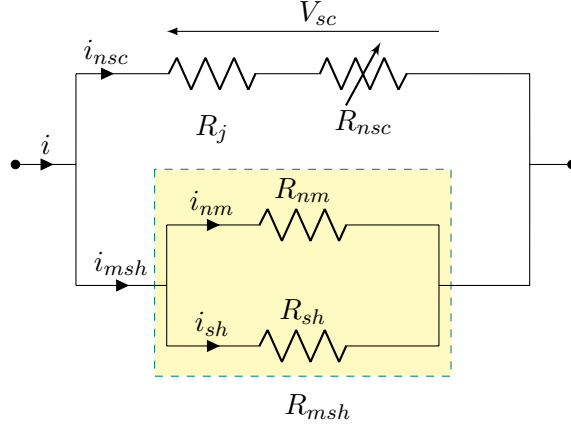


Figura 3.3: Modelo implementado del LCFS-R

Donde N_{tp} es el número de cintas en paralelo. La resistencia de las distintas capas metálicas de una cinta, están definidas según (3.11). En la que k representa cada capa metálica de la cinta, A_k es la sección transversal para cada capa y ρ_k es la resistividad de los materiales, la cual es dependiente de la temperatura de cada capa. A partir (3.4), (3.5), (3.8) y (3.7) podemos agrupar la resistencia equivalente a la matriz metálica de las cintas R_{nm} y la resistencia en derivación R_{sh} en la resistencia R_{msh} (3.10), como se describe en la Fig. 3.3.

$$R_{msh} = \frac{R_{nm}R_{sh}}{R_{nm} + R_{sh}} \quad (3.10)$$

$$R_k = \frac{\rho_k l_{tp}}{A_k} \quad (3.11)$$

Con el modelo mostrado en la Fig. 3.3 se pretende obtener un sistema de ecuaciones que puedan ser resueltos mediante un algoritmo numérico. De la Fig. 3.3, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$i = i_{nsc} + i_{msh} \quad (3.12)$$

$$i_{msh} = i_{nm} + i_{sh} \quad (3.13)$$

La resistencia generada por las uniones de la cinta a las terminales del limitador R_j se adiciona la resistencia equivalente de las capas superconductoras R_{nsc} , como se muestra en la Fig. 3.3, por lo que la resistencia equivalente de las capas superconductoras esta descrita por (3.14). La resistencia R_j se describe según (3.15), donde R_{sj} es la resistencia de unión, aproximadamente igual a 20×10^{-9} [Ω] [30], N_c es el número de bobinas que contiene el LCFS-R.

$$R_{nsc} = R_{nsc} + R_j \quad (3.14)$$

$$R_j = 2N_{tp}(N_c + 1)R_{sj} \quad (3.15)$$

3. MODELO TEÓRICO

Para obtener la resistencia del LCFS-R, representada por (3.16), se requiere resolver la distribución de corriente en cada capa de cinta para todas las cintas, para ello y de acuerdo a la ley de potencia para los superconductores, se obtiene que la tensión eléctrica a lo largo de una cinta j en estado superconductor V_{sc} , esta descrito por (3.17), donde $V_c = E_c * l_{tp}$ es la tensión eléctrica crítica, i_{scj} es la corriente que circula en la cinta j , I_{cj} su corriente crítica y n_j es su factor n . Además se tiene que la tensión V_{sc} , esta dado por (3.18), y por tanto puede expresarse como se muestra en (3.19).

$$R_{LCF} = \left(\frac{1}{R_{nsc}} + \frac{1}{R_{msh}} \right)^{-1} \quad (3.16)$$

$$V_{sc} = V_c \left(\frac{i_{scj}}{I_{cj}} \right)^{n_j} \quad (3.17)$$

$$V_{sc} = V_m = V_{sh} \quad (3.18)$$

$$V_{sc} = \left(\frac{R_{msh} R_{nsc,j}}{R_{msh} + R_{nsc,j}} \right) (i_{msh} + i_{nsc,j}) \quad (3.19)$$

Igualando (3.17) y (3.19) y considerando que los valores de R_j^* y β_j están dados por (3.20) y (3.21), se obtiene (3.22), esta ecuación describe la función para la obtención de la corriente que circula por el superconductor i_{scj} de una cinta j .

$$R_j^* = \frac{R_{msh} R_{nsc,j}}{R_{msh} + R_{nsc,j}} \quad (3.20)$$

$$\beta_j = \frac{R_j^* I_{cj}^{n_j}}{V_c} \quad (3.21)$$

$$i_{scj}^{n_j} - \beta_j (i_{msh} + i_{nsc,j}) = 0 \quad (3.22)$$

Entonces para la solución de la corriente del componente superconductor a través de N_{tp} cintas durante la distribución de corriente en las capas metálicas se establece el sistema de ecuaciones en forma vectorial que se muestra en (3.23) el cual esta en función del vector de corriente \mathbf{i}_{sc} (3.24).

$$\mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc}) = \begin{bmatrix} i_{sc1}^{n_1} - \beta_1 (i_{msh} + i_{nsc,1}) \\ i_{sc2}^{n_2} - \beta_2 (i_{msh} + i_{nsc,2}) \\ \vdots \\ i_{scN_{tp}}^{n_{N_{tp}}} - \beta_{N_{tp}} (i_{msh} + i_{nsc,N_{tp}}) \end{bmatrix}_{[1 \times N_{tp}]} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{i}_{sc} = (i_{sc1}, i_{sc2}, \dots, i_{scN_{tp}}) \quad (3.24)$$

Se utilizará el método de Newton-Raphson multivariable para la solución de (3.23). Este método es un proceso iterativo que se basa en utilizar el desarrollo de Taylor para

aproximar una función derivable en las proximidades de un punto, se considera que el sistema $\mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc})$ es derivable en el dominio que contiene los valores de \mathbf{i}_{sc} . Se mostrará la generalización para la solución de un caso de N_{tp} cintas en paralelo. Inicialmente se obtiene la aproximación de la corriente actual del componente superconductor, vector mostrado en (3.25), mediante un simple divisor de corriente, el cual esta dado en (3.26), donde R_{LCF} es la resistencia equivalente del LCFS-R, i es la corriente total a través del LCFS-R, R_{nsc} es la corriente del componente superconductor de la cinta y el subíndice j hace referencia a la cinta j . Siguiendo el método de Newton-Raphson multivariable [31], la solución de (3.23) puede representarse como (3.27), donde $\delta\mathbf{i}_{sc,a}$, descrito en (3.28), es el incremento elemental de la corriente del superconductor y para el caso inicial $\mathbf{i}_{sc,a} = \mathbf{i}_{sc}^0$. Los subíndices a y p hacen referencia al valor del paso de iteración actual (valores conocidas) y posterior (valores por estimar), respectivamente.

$$\mathbf{i}_{sc}^0 = (i_{sc1}^0, i_{sc2}^0, \dots, i_{scN_{tp}}^0) \quad (3.25)$$

$$i_{scj} = \frac{R_{LCF}}{R_{nscj}} i \quad (3.26)$$

$$\mathbf{i}_{sc,p} = \mathbf{i}_{sc,a} + \delta\mathbf{i}_{sc,a} \quad (3.27)$$

$$\delta\mathbf{i}_{sc,a} = (\delta\mathbf{i}_{sc1,a}, \delta\mathbf{i}_{sc2,a}, \dots, \delta\mathbf{i}_{scN_{tp},a}) \quad (3.28)$$

Para la obtención de (3.28) se debe sustituir (3.27) en (3.23), obteniéndose (3.29). Desarrollando el primer miembro de (3.29) con la serie de Taylor (3.28), limitándose al primer orden, se obtiene (3.30), donde se deduce que la derivada $\mathbf{F}'(\mathbf{i}_{sc,a})$ es la matriz jacobiana mostrada en (3.31).

$$\mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc,a} + \delta\mathbf{i}_{sc,a}) = 0 \quad (3.29)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc,a} + \delta\mathbf{i}_{sc,a}) = \mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc,a}) + \mathbf{F}'(\mathbf{i}_{sc,a})\delta\mathbf{i}_{sc,a} = \mathbf{0} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{i}_{sc,a}) = \begin{bmatrix} n_1 i_{sc1,a}^{n_1-1} & -\beta_1 & \dots & -\beta_1 \\ -\beta_2 & n_2 i_{sc2,a}^{n_2-1} & \dots & -\beta_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\beta_{N_{tp}} & -\beta_{N_{tp}} & \dots & n_{N_{tp}} i_{scN_{tp},a}^{n_{N_{tp}}-1} \end{bmatrix}_{[N_{tp} \times N_{tp}]} \quad (3.31)$$

Entonces (3.30) puede ser descrito como (3.32). Considerando que $\mathbf{J}(\mathbf{i}_{sc,a})$ no es singular, se obtiene la solución para $\delta\mathbf{i}_{sc,a}$, como se muestra en (3.33).

$$\mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc,a}) + \mathbf{J}(\mathbf{i}_{sc,a})\delta\mathbf{i}_{sc,a} = \mathbf{0} \quad (3.32)$$

$$\delta\mathbf{i}_{sc,a} = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{i}_{sc,a}) \times \mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc,a}) \quad (3.33)$$

Para este método se espera que generalmente de convergencia cuadrática siempre y cuando la aproximación inicial de \mathbf{i}_{sc} sean lo suficientemente exactos y que $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{i}_{sc,a})$ exista [31], ya que si la matriz jacobiana es singular, el método falla en la búsqueda de una raíz, como se ve en (3.33). Con la obtención de la corriente (3.27) se finaliza una iteración y los valores estimados $\mathbf{i}_{sc,p}$ se convierten en valores conocidos $\mathbf{i}_{sc,a}$. Para que el método converja debe cumplirse con el criterio de que el error entre las dos últimas aproximaciones sea menor a la tolerancia establecida, en este trabajo se considera una tolerancia de $1 \mu\text{A}$, por lo que se realizan las iteraciones necesarias para cumplir con este criterio en la solución de (3.23), adicionalmente se agrega un máximo de iteraciones para controlar el calculo computacional realizado. Para mayor detalle, en el Apéndice 1 se muestra el algoritmo 1, que describe los pasos a seguir para la obtención de la nueva corriente en la capa superconductora de N_{tp} capas con el método descrito, el algoritmo 2 que describe la obtención de $\delta\mathbf{i}_{sc,a}$ y el Diagrama de bloques a seguir para la implementación del método, Fig. 7.1.

Con la corriente en el componente superconductor i_{sc_j} se obtienen las respectivas resistencias de las capas superconductoras (3.1) y la resistencia equivalente del LCFS-R (3.16). Resumiendo, la resistencia equivalente del LCFS-R tiene el siguiente comportamiento:

- Condiciones normales de operación: $R_{LCF} = R_j$
- Distribución de corriente: $R_j < R_{LCF} < R_{sh}$
- Condición de falla: $R_{LCF} \approx R_{sh}$

3.3.2. Modelo térmico

El modelo retoma el planteamiento térmico del modelo presentado en [6], modificando la cantidad de nodos a considerar para el cálculo de la temperatura, reduciendo el tamaño de las matrices en la implementación. Se consideran 5 nodos en la cinta ubicados en el centro de los agrupamientos de capas, el nodo 1 corresponde al aislamiento superior Ais_{sup} , el nodo 2 agrupa las capas metálicas superiores al superconductor Met_{sup} , el nodo 3 corresponde al superconductor Sc , el nodo 4 agrupa las capas metálicas inferiores al superconductor Met_{inf} y el nodo 5 se refiere al aislamiento inferior Ais_{inf} , Fig. 3.4. Se asume que la temperatura cambia al largo del espesor de la cinta, que las propiedades de la cinta son uniformes a lo largo de su longitud y que la temperatura es constante a lo ancho de la cinta. A partir de la ecuación de la conservación de la energía se obtienen las temperaturas de la capas de acuerdo a los esquemas que se muestran en las Fig. 3.5 y 3.6 [6]. En el nodo i , la conservación de la potencia, esta representada por (3.34), 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 .

$$\phi_{i-1,i} = \phi_{i,i} + \phi_{i,i+1} \quad (3.34)$$

En (3.35) y (3.36) definen a la diferencia de temperatura ΔT entre la capa i y las capas contiguas, donde ϕ es el flujo de calor, R_i^{th} y G_i^{th} son la resistencia térmica y la conductancia térmica de la capa i de la cinta, respectivamente y están definidas por (3.37), donde k_i y th_i es la conductividad térmica del material y el espesor de la capa, mientras que w y l_{th} se refieren al ancho y la longitud de la cinta, respectivamente. La multiplicación de w y l_{th} definen a la superficie de la cinta paralela al plano xz [6].

$$\Delta T = R_i^{th} \phi \quad (3.35)$$

$$\phi = G_i^{th} \Delta T \quad (3.36)$$

$$G_i^{th} = \frac{1}{R_i^{th}} = k_i \frac{wl_{th}}{th_i} \quad (3.37)$$

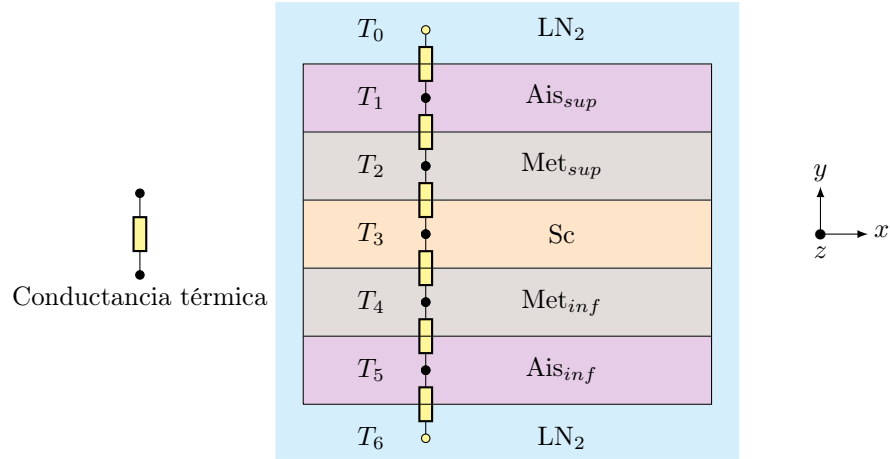


Figura 3.4: Modelo genérico para la determinación de la distribución de temperatura en la cinta superconductora

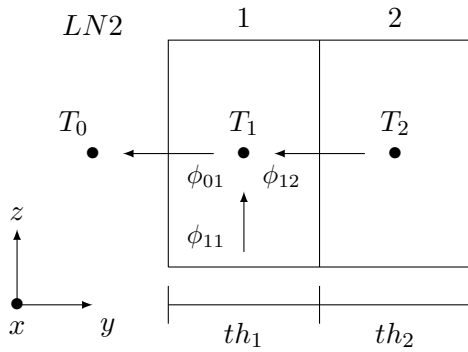


Figura 3.5: Diagrama de frontera

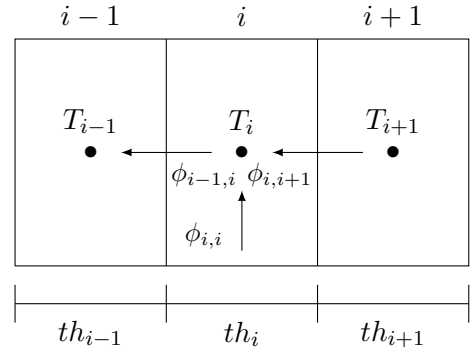


Figura 3.6: Diagrama general

3. MODELO TEÓRICO

Propiedad térmica	Símbolo	Unidad	Equivalencia →	Propiedad eléctrica	Símbolo	Unidad	
Temperatura	T	K			Voltaje	V	V
Flujo de calor	ϕ	W			Corriente	I	A
Resistencia térmica	R^{th}	K/W			Resistencia eléctrica	R	Ω
Conductancia térmica	G^{th}	W/K			Conductancia eléctrica	S	Ω^{-1}

Tabla 3.1: Equivalencia entre elementos térmicos y eléctricos

Con el fin de resolver las ecuaciones de transferencia de calor entre cada capa de la cinta se llega a una representación mediante circuitos eléctricos [20]. A través de los circuitos eléctricos equivalentes, las temperaturas en los nodos pueden actualizarse a partir de valores previos calculados a través de un método numérico explícito. En la Tabla 3.1 se muestra la equivalencia entre propiedades térmicas y eléctricas.

Se definen los flujos de calor entre el nodo i y los nodos adyacentes $i-1$ e $i+1$ en (3.38) y (3.39), mientras que el calor generado en el nodo i , $\phi_{i,i}$, esta representado por (3.40). $G_{i-1,i}$ y $G_{i,i+1}$ son las conductancias térmicas dependientes de la temperatura de los materiales (en W/K) y se define entre los nodos $i-1$ e $i+1$ con sus respectivas temperaturas T_{i-1} y T_{i+1} . Con respecto a (3.40), el calor disipado en las capas i de la cinta Q_i^a esta representado por (3.41), el cual se calcula a partir de las resistencias obtenidas con las temperaturas de la iteración previa, además ν_i es el volumen de la capa en cuestión, 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 ς_i es la capacidad calorífica de la cinta, mientras que γ_i es la densidad del material.

$$\phi_{i-1,i} = G_{i-1,i}(T_{i-1} - T_i) \quad (3.38)$$

$$\phi_{i,i+1} = G_{i,i+1}(T_i - T_{i+1}) \quad (3.39)$$

$$\phi_{i,i} = Q_i^a + \frac{\nu_i C_i^a}{\Delta t} (T_i^p - T_i^a) \quad (3.40)$$

$$Q_k = R_k i_k^2 \quad (3.41)$$

Las conductancias térmicas, las capacidades caloríficas y las resistividades eléctricas, dependen en la temperatura de acuerdo con los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés, National Institute of Standards and Technology [32]). Los subíndices a y p indican las temperaturas del paso de tiempo anterior y posterior, respectivamente [6]. Δt es el paso de tiempo del método numérico empleado [33].

El modelo presentado usa las funciones que representan la capacidad calorífica, la conductividad térmica y resistividad eléctrica, presentes en el modelo de [6].

En la Fig. 3.7 se muestra el circuito eléctrico equivalente de la transferencia de calor en una capa i de la cinta, se representa la temperatura actualizada en el nodo i en un tiempo t , denotada por T_i^p , a partir de la temperatura anterior en el tiempo $t - \Delta t$,

denotada por T_i^a , y la temperatura de los nodos adyacentes $(i-1, i+1)$ en el tiempo t . Este circuito representa el flujo de calor entre los agrupamientos de capas adyacentes al nodo i y el calor interno generador en el nodo a través de conductancias térmicas representadas en el circuito.

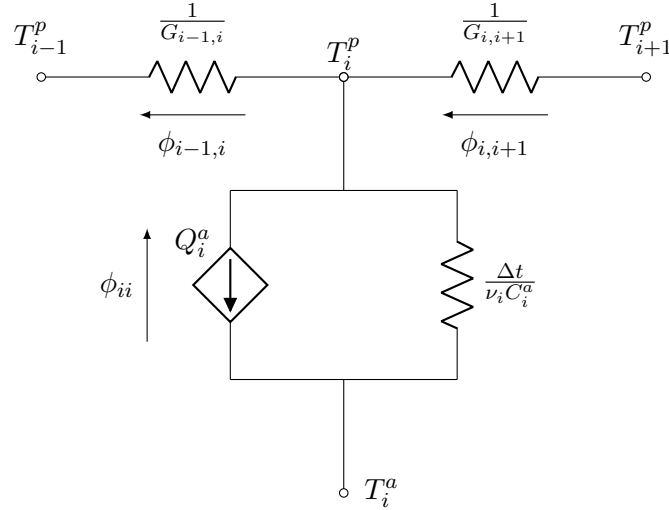


Figura 3.7: Modelo térmico de una capa de la cinta

En (3.42) se describe el balance de potencia de forma matricial, \mathbf{T}^p representa el vector de temperaturas actualizadas en el tiempo t , \mathbf{C}^a es la matriz diagonal de capacidades caloríficas la cual es dependiente de las temperaturas obtenidas en la iteración anterior, \mathbf{Q}^a es el vector del calor disipado en los agrupamientos de capas que conforman a la cinta en la iteración anterior, \mathbf{T}_{ref} es el vector de las temperaturas en la frontera con $\mathbf{T}_{ref} = 77$ K y \mathbf{G}_b^a es la matriz de conductancias térmicas calculada en el tiempo $t - \Delta t$, la cual se describe en (3.43).

$$\mathbf{T}^p \simeq (\mathbf{C}^a + \Delta t \mathbf{G}^a)^{-1} (\mathbf{C}^a \mathbf{T}^a + \Delta t [\mathbf{G}_b^a \mathbf{T}_{ref} + \mathbf{Q}^a]) \quad (3.42)$$

$$\mathbf{G}^a = \begin{bmatrix} -G_{0,2} & G_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ G_{2,1} & -G_{1,3} & G_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & G_{3,2} & -G_{2,4} & G_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & G_{4,3} & -G_{3,5} & G_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & G_{5,4} & -G_{4,6} \end{bmatrix}_{5 \times 5} \quad (3.43)$$

Los términos de la matriz de conductancias térmicas de la cinta $G_{i,i+1}$ y $G_{i+1,i}$ se obtienen de (3.45), donde R_i^{th} es la resistencia térmica del agrupamiento de capas i de la cinta, (3.44), la cual se obtiene del despeje de (3.37). Los términos de la diagonal principal $G_{i,i}$, están representados en (3.46). Para las conductancias térmicas entre las capas externas de la cinta y el LN₂ circulante $G_{0,1}$ y $G_{4,6}$ se representan en (3.47)

3. MODELO TEÓRICO

y (3.48).

$$R_i^{th} = \frac{th_i}{wl_{th}k_i} \quad (3.44)$$

$$G_{i,i+1} = G_{i+1,i} = \frac{2}{R_i^{th} + R_{i,i+1}^{th}} \quad (3.45)$$

$$G_{i-1,i+1} = G_{i-1,i} + G_{i,i+1} \quad (3.46)$$

$$G_{0,1} = \frac{1}{R_{LN2}^{th} + \frac{R_{Ais_s}^{th}}{2}} \quad (3.47)$$

$$G_{0,6} = \frac{1}{R_{LN2}^{th} + \frac{R_{Ais_i}^{th}}{2}} \quad (3.48)$$

Para este modelo, se retoman las curvas de enfriamiento del modelo de [6], las cuales describen la evolución del flujo de calor q entre la superficie de la cinta y el nitrógeno líquido circulante a $T_{ref} = 77$ K, las cuales son usadas para la actualización de la temperatura en el modelo térmico. Se adiciona la curva de enfriamiento empleada en el capítulo de validación de este documento, Fig. 3.8 [3].

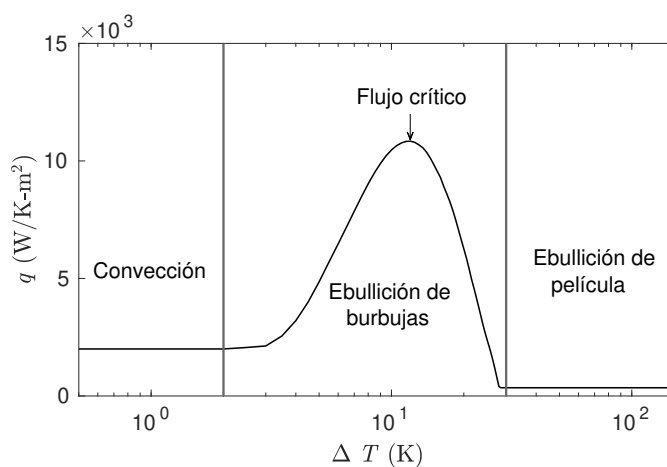


Figura 3.8: Curva de enfriamiento agregada al modelo [3]. $\Delta T = T - T_{ref}$, donde T es la temperatura a la superficie del cuerpo y T_{ref} la temperatura constante del baño de LN₂

La curva de enfriamiento de la Fig. 3.8, al igual que las ya incluidas considera tres etapas [34]:

- **Convección:** El calor generado por la cinta se transfiere por el movimiento natural del nitrógeno líquido a través de la superficie a medida que aumenta la temperatura del fluido.

- Ebullición de burbujas: El calor se transfiere debido a un cambio de fase en el fluido cercano a la superficie de la cinta y se generan burbujas. Durante este periodo se alcanza un flujo máximo de calor, llamado flujo crítico y la transferencia de calor es dependiente de la formación de burbujas sobre la superficie.
- Ebullición de película: Después del flujo crítico, la formación de vapor es tan grande que las burbujas colapsan para formar una película de vapor en la superficie de la cinta. Actúa como aislante térmico y el calor es transferido al fluido mediante conducción térmica en la película generada. El coeficiente de convección disminuye durante esta etapa.

Validación del modelo

En este capítulo se presentan dos comparaciones que validan el comportamiento del Modelo de Cintas Variables (MCV). La primera comparación se realiza con los datos teóricos y experimentales proporcionados por la Universidad Federal Fluminense y la Universidad Federal de Río de Janeiro del modelo Modelo Brasileño (MB) desarrollado en [3] y los resultados experimentales de pruebas realizadas en el laboratorio de CEPTEL (Electrical Energy Research Center, Rio de Janeiro). La segunda comparación se obtiene con los datos obtenidos por el KIT (Karlsruhe Institute of Technology, Alemania) para el proceso de recuperación térmica de un Limitador de Corriente de Falla Superconductor Inductivo con núcleo de Aire (LCFSI-NA) [10]. El MCV considera cintas idénticas en las comparaciones.

4.1. Primera Comparación

Esta validación del comportamiento del MCV se realizó gracias a la colaboración con los colegas presentados en [3], los cuales proporcionaron sus datos teóricos y experimentales con el fin de poder realizar una comparación entre los modelos. Los datos experimentales proporcionados hacen referencia a las pruebas a alta corriente realizadas en el laboratorio de CEPTEL [3]. Para poder realizar la comparación se preparó un caso de estudio con los datos proporcionados. La evolución del flujo de calor del caso de estudio es modelado por la curva de enfriamiento presentada en la Fig. 3.8. Se agregó el comportamiento térmico del sustrato del Acero inoxidable debido a que en los datos proporcionados se considera una cinta SAN12500 (SuNAM Co., Ltd.), Fig. 4.1. Se presenta un circuito de prueba para evaluar las corrientes de cortocircuito, presentado en la Fig. 4.2, donde V_s representa la fuente de voltaje de prueba, R_{sh} y L_{sh} son los componentes de la impedancia en derivación, R_{load} y L_{load} representan la carga conectada al circuito y R_{LCFS-R} es la resistencia variable del LCFS-R. En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros usados en el circuito de prueba del LCFS-R para realizar las simulaciones del modelo. Para los parámetros del limitador se agregaron las características de la cinta de la Fig. 4.1 [3] y las mostradas en la Tabla 4.2.

4. VALIDACIÓN DEL MODELO

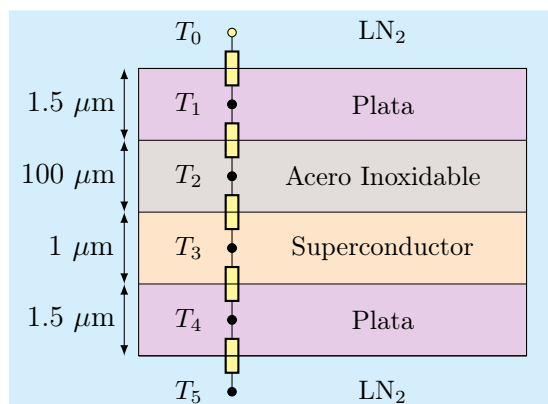


Figura 4.1: Circuito para la determinación de la distribución de temperatura en la cinta SAN12500 (SuNAM Co., Ltd.)

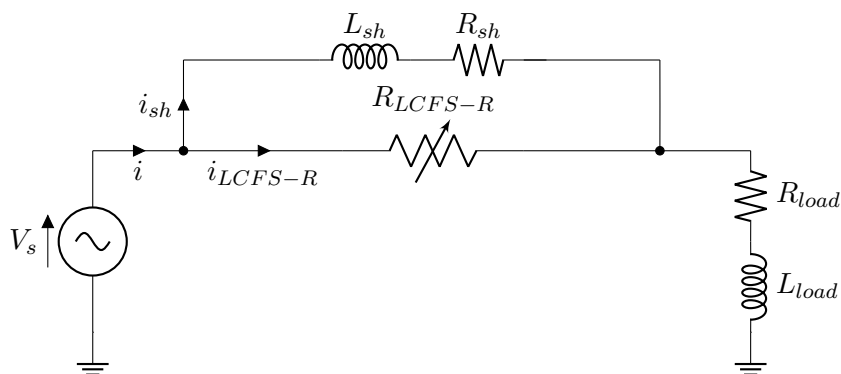


Figura 4.2: Circuito de prueba del LCFS-R para la comprobación del modelo

Parámetro	Valor	Unidad
V_s	137	V_{rms}
Frecuencia	60	Hz
Fase	215	grados
L_{sh}	0.2652	mH
R_{sh}	0.05	Ω
R_{load}	0.018	Ω
L_{load}	54.38	μ H

Tabla 4.1: Parámetros para el Circuito prueba

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura crítica T_c	91	K
Corriente crítica I_c	500	A
Índice de transición n	30	-
Ancho de la cinta	12	mm
Largo de la cinta	3.88	m
Núm. de cintas en paralelo	1	-

Tabla 4.2: Parámetros del LCFS-R

4.1.1. Pruebas

Las pruebas consisten en simular una falla en el circuito de prueba con una corriente de cortocircuito de $5 \text{ kA}_{\text{RMS}}$. En la Fig. 4.3(a) se muestran los resultados obtenidos de para la corriente i en la simulación con el MCV comparándolos con un caso sin limitador, se obtiene que la corriente se ve reducida considerablemente con la inclusión del MCV hasta un valor de $1.07 \text{ kA}_{\text{RMS}}$. En comparación el MB obtiene un valor de $1.05 \text{ kA}_{\text{RMS}}$, Fig. 4.3(b), lo cual indica una variación en i del 1.98 % con respecto al MCV. En cuanto a la tensión eléctrica, se presenta la Fig 4.3(c) donde se muestran los resultados obtenidos por el MCV y el MB durante la simulación, obteniendo $108.7 \text{ V}_{\text{RMS}}$ con el MCV y $109.13 \text{ V}_{\text{RMS}}$ con el MB, una variación del 0.38 %. En la Fig. 4.3(d), se hace énfasis en la variación que se tiene en los primeros milisegundos. Estas variaciones se abordaran en los resultados posteriores.

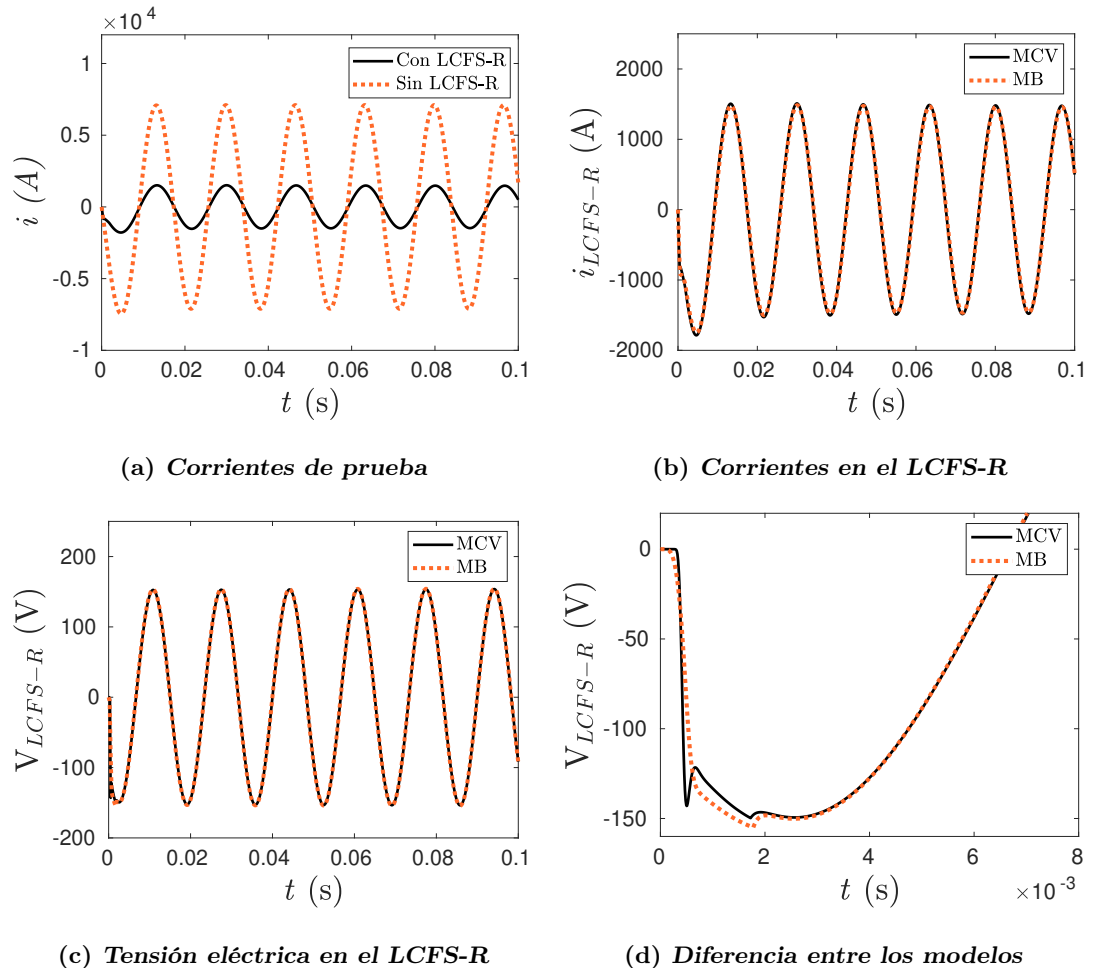


Figura 4.3: Resultados de la tensión y corriente eléctrica en el LCFS-R

4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Las variaciones presentes entre los modelos se mostraran a detalle con el fin de entender el comportamiento de los mismos. En la Fig. 4.4 se muestran los resultados de las corrientes de las capas de la cinta que compone al LCFS-R para ambos modelos y en la Tabla 4.3 se muestra un resumen de las corrientes máximas y la variación entre los valores obtenidos. El comportamiento de la corriente de las capas entre los modelos muestra variaciones principalmente en las capas de plata, las cuales tienen una variación máxima de corriente del 28.1 %, Fig. 4.4(a) y 4.4(b). En el caso del sustrato de acero inoxidable la variación entre los modelos se reduce al 0.76 %, Fig. 4.4(c). Finalmente los resultados en la capa superconductora muestran una variación máxima del 6.37 %, Fig. 4.4(d). Los resultados de la capa superconductora muestran una variación importante en el comportamiento de la corriente en los primeros segundos de la simulación. Esta diferencia en los modelos afecta el comportamiento de la corriente de las demás capas como se observa en las Fig. 4.4(e) y 4.4(f).

En cuanto a la evolución térmica de los modelos, los resultados se muestran en la Fig. 4.5, además la Tabla 4.4 describe los valores máximos y variaciones de la temperatura en las capas. La temperatura de las capas de la cinta en los modelos tiene un comportamiento casi idéntico debido a que los modelos consideran que la temperatura esta uniformemente distribuida en la cinta. Sin embargo la evolución de la temperatura es diferente en los modelos, obteniendo una elevación de la temperatura generalmente mayor por parte del MB durante la simulación. La temperatura máxima obtenida para las capas durante la simulación es de alrededor de 211.74 K en el MCV y de 249.1 K en el MB, una variación del 15 %. En la Fig. 4.5(e) se muestra un acercamiento al comienzo de la simulación, donde se aprecia una elevación inicial de la temperatura más abrupta por parte del MCV.

Resultados	Capa de Plata _{sup}	Capa de SC	Capa de Acero	Capa de Plata _{inf}
MCV	142.59 A	683.13 A	83.31 A	142.66 A
MB	111.34 A	642.26 A	82.68 A	111.38 A
Variación	28.1 %	6.37 %	0.76 %	28.1 %

Tabla 4.3: Corriente máxima por capa y variación entre los resultados

Resultados	Capa de Plata _{sup}	Capa de SC	Capa de Acero	Capa de Plata _{inf}
MCV	211.74 K	211.74 K	211.75 K	211.74 K
MB	249.11 K	249.11 K	249.2 K	249.11 K
Variación	15.01 %	15.01 %	15.03 %	15.01 %

Tabla 4.4: Temperatura máxima por capa y variación entre los resultados

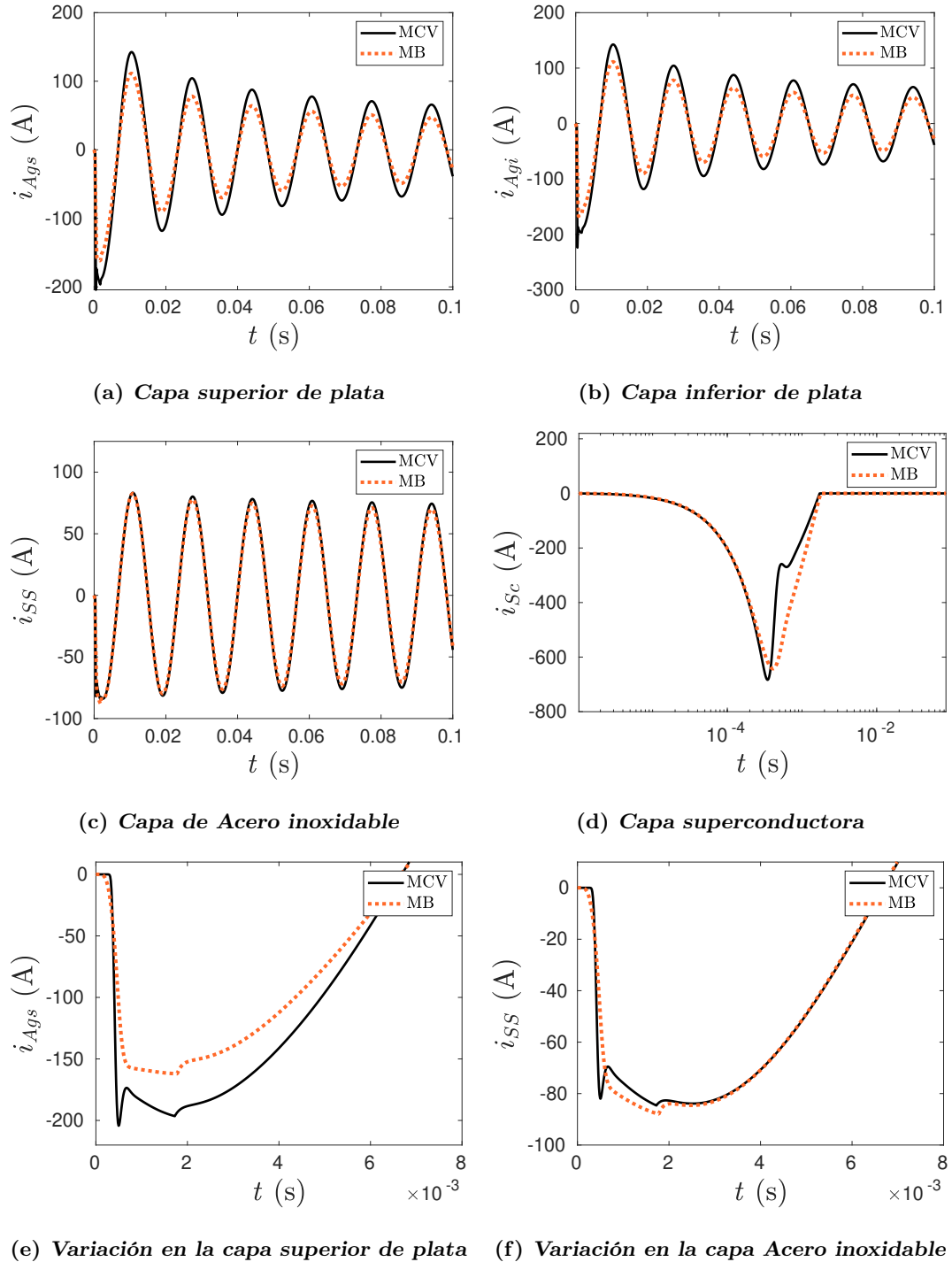
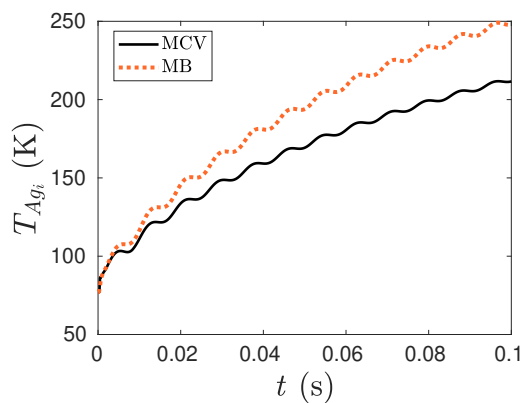
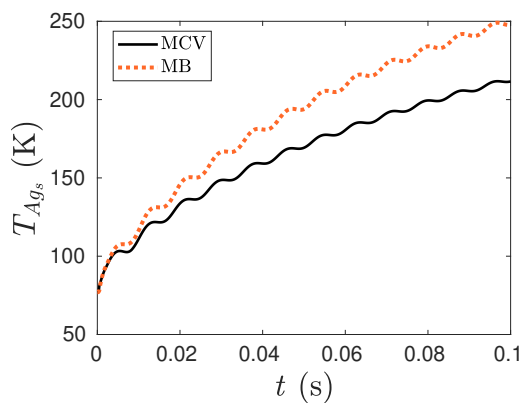


Figura 4.4: Comparación de las corrientes en las capas de la cinta

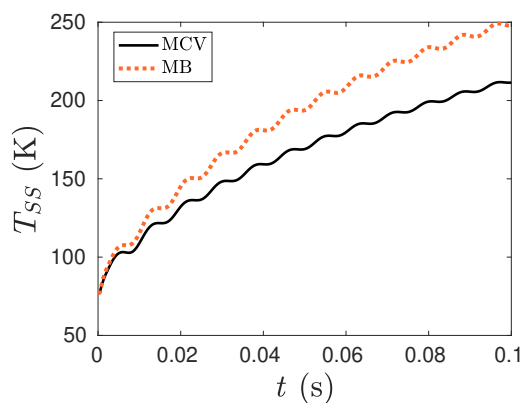
4. VALIDACIÓN DEL MODELO



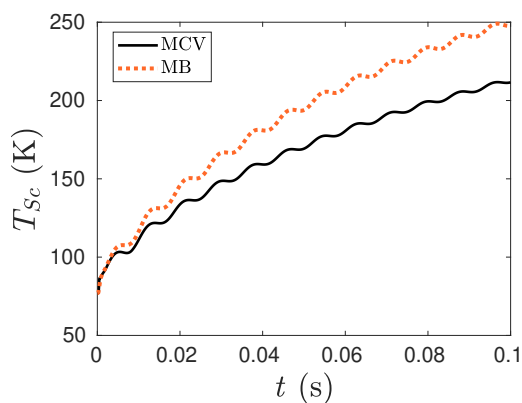
(a) *Capa superior de plata*



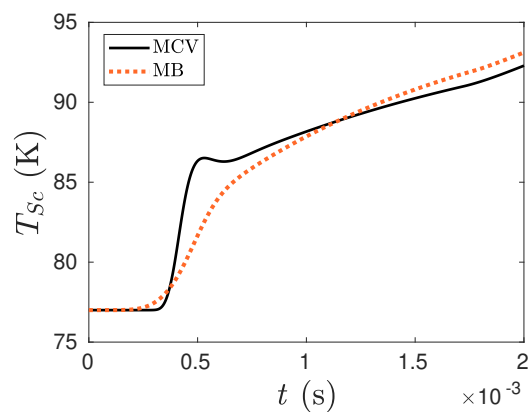
(b) *Capa inferior de plata*



(c) *Capa de Acero inoxidable*



(d) *Capa superconductora*



(e) *Variación inicial en la capa superconductora*

Figura 4.5: Comparación de las temperaturas en las capas de la cinta

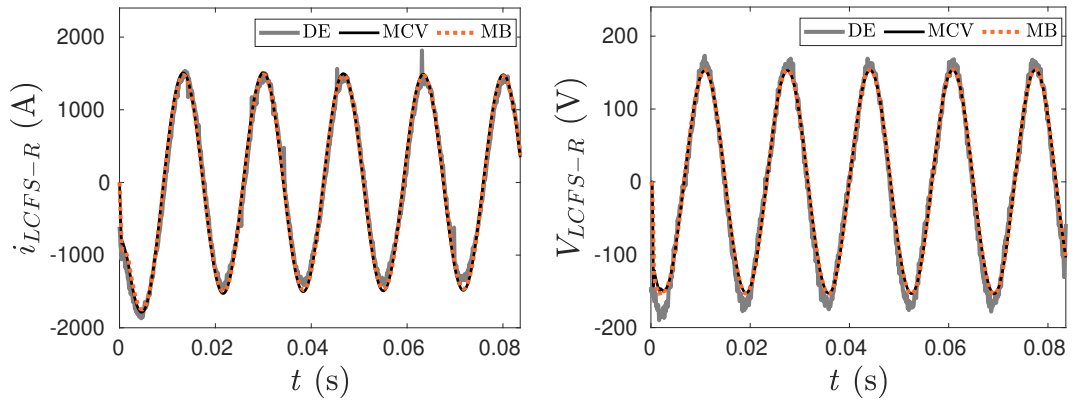
Para finalizar las pruebas de la validación del comportamiento eléctrico se compararon los resultados de corriente y tensión eléctrica en el LCFS-R de los modelos con los resultados de los datos experimentales (DE) del laboratorio de CEPTEL [3], Fig. 4.6(a) y 4.6(b). Los resultados muestran un comportamiento congruente de los resultados teóricos de los modelos con respecto a los resultados experimentales. En las Tablas 4.5 y 4.6 se muestran los resultados de corriente y tensión pico máxima en el LCFS-R en esta comparación. Presentándose una variación ligeramente menor en el MCV con respecto al resultado experimental, 16.6 % para la corriente y 11.2 % para la tensión eléctrica, mientras que para el MB se obtuvieron variaciones del 18.2 % para la corriente y 10.8 % para la tensión eléctrica.

Resultados	Teórico	Experimental	Variación máxima
MCV	1.51 kA	1.81 kA	16.6%
MB	1.48 kA		18.2%

Tabla 4.5: Resultados teóricos y experimentales para la corriente I_{LCFS-R}

Resultados	Teórico	Experimental	Variación máxima
MCV	153.75 V	173.1 V	11.2%
MB	154.33 V		10.8%

Tabla 4.6: Resultados teóricos y experimentales para la tensión eléctrica V_{LCFS-R}



(a) Corriente en el LCFS-R

(b) Voltaje en el LCFS-R

Figura 4.6: Comparación con los datos experimentales

4.1.2. Discusión

Los resultados obtenidos por las pruebas descritas en el apartado anterior muestran resultados correctos para el MCV. Las variaciones en el comportamiento global son menores con respecto al MB. Sin embargo estos resultados también muestran las diferencias presentes entre los modelos.

Los factores que causan estas diferencias provienen principalmente de los datos de las propiedades de los materiales usados en los trabajos respectivos. El MB basa el comportamiento térmico de los materiales en trabajos previos realizados para la caracterización de la cinta [3]. En cambio el MCV toma el comportamiento de los materiales del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés, National Institute of Standards and Technology [32]). El cambio en la información de las características térmicas de los materiales causa la variación en la evolución de la temperatura, visto en la Fig. 4.5, provocando así la variación en los valores de la capacidad calorífica y la conductancia térmica, y como consecuencia la variación en la resistencia de las capas de la cinta y la distribución de corriente distinta entre las capas, Fig. 4.6. Las variaciones presentes al comienzo de la simulación en el MCV, es producto de los factores antes descritos, ya que al comparar los resultados de la temperatura, Fig. 4.5(e), con los resultados de la corriente en las capas, Fig. 4.4, se observa que la corriente tiene un comportamiento que sigue al cambio pronunciado en la evolución de la temperatura al comienzo de la simulación.

La distribución de las corriente es otro factor importante a considerar en las diferencias obtenidas por esta comparación. El MB considera un simple divisor de corriente para modelar la corriente en las capas. Mientras que en el MCV se hace uso de la ley de potencia para superconductores para obtener una transición fina de la resistencia del superconductor, Fig. 4.4(d).

En cuanto a los resultados del MCV con los datos experimentales del laboratorio de CEPTEL, se obtuvo que el modelo cumple correctamente con la descripción del comportamiento eléctrico, presentando variaciones que son despreciables. Las variaciones máximas que se presentan en las Tablas 4.5 y 4.6 y son causadas por un pico de corriente obtenido a los 0.0631 s en los resultados experimentales, sin embargo, las variaciones omitiendo este pico en las mediciones rondan el 2.5% para ambos modelos. El comportamiento del modelo es congruente en esta comparación.

4.2. Segunda Comparación

Esta comparación se realiza con los datos proporcionados por el estudio presentado en [10], el cual muestra los resultados de un Modelo desarrollado en Python (MP) que describe el proceso de recuperación térmica (Descenso de la temperatura después de la condición de falla) para un Limitador de Corriente Superconductor Inductivo con Núcleo de Aire (LCFSI-NA) y que fue validado por pruebas realizadas en el Instituto de Física Técnica (ITEP, por sus siglas en inglés, Institute for Technical Physics) del Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT, por sus siglas en inglés, Karlsruhe Institute of Technology).

El MCV modela un Limitador de Corriente Superconductor Resistivo, sin embargo la comparación es posible debido a que se hace uso de un circuito equivalente en el que se puede incluir el modelo de LCFS-R como una resistencia variable [10].

El LCFSI-NA consiste en dos bobinas de solenoide concéntricas alineadas, que actúan como devanados primarios y secundarios, Fig. 4.7 [35]. El devanado primario está hecho de 34 vueltas de cobre y opera a temperatura ambiente. El devanado secundario está compuesto por 22 anillos apilados de cintas SCS12050. Todas las partes no conductoras están hechas de fibra de vidrio natural G10 para despreciar cualquier influencia sobre el campo magnético. Cada cinta en el devanado secundario tiene una longitud total de 1.47 m y se supone que todas están en paralelo y, por tanto, actúan electromagnéticamente como un devanado de una sola vuelta [10, 35].

El circuito de prueba para esta comparación es el mostrado en la Fig. 4.8 [10]. El control entre el funcionamiento normal y la condición de falla se controla mediante los interruptores s_1 y s_2 . El funcionamiento normal del Limitador está definido cuando el interruptor s_2 está cerrado y el interruptor s_1 se encuentra abierto, la corriente en esta condición se define por la resistencia R_{load} . Para la condición de falla el interruptor s_2 se abre y el interruptor s_1 se cierra. En la condición de falla la corriente se controla por el valor de la resistencia R_c .



Figura 4.7: Limitador de Corriente Inductivo con Núcleo de Aire [10]

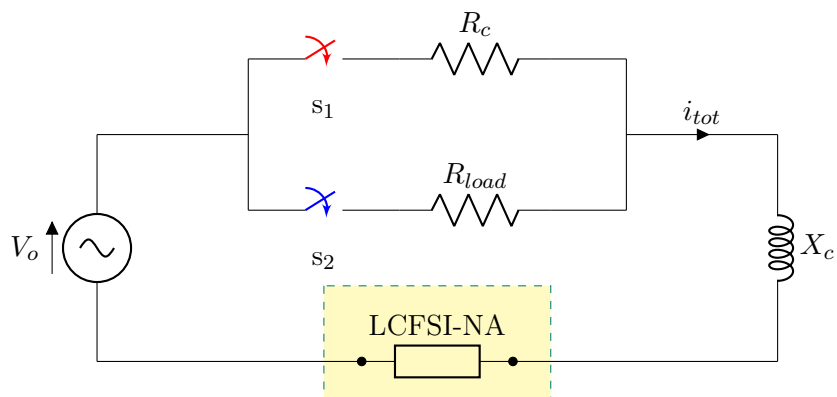


Figura 4.8: Circuito de prueba para la recuperación térmica

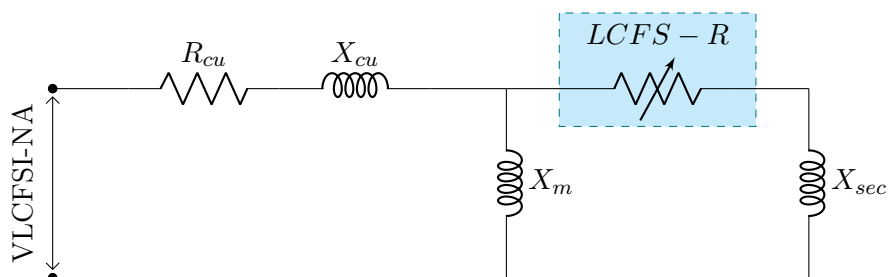


Figura 4.9: Circuito Equivalente del LCFS-NA

Propiedad	Valor	Unidad
R_{cu}	0.185	$m\Omega$
X_{cu}	15	$m\Omega$
X_m	0.135	Ω
X_{sec}	7	$m\Omega$
V_o	400	V_{rms}
Frecuencia	50	Hz

Tabla 4.7: Parámetros del circuito de prueba

Propiedad	Valor	Unidad
Longitud	32.24	m
Corriente crítica promedio, \bar{I}_c	310	A
Temperatura crítica promedio, \bar{T}_c	92	K
Índice de transición promedio, \bar{n}	30	-
Ancho, w	12	mm

Tabla 4.8: Características de la cinta SCS12050 de SuperPower[®] [10]

Elemento	Valor	Unidad
R_c	475	m Ω
R_{load}	5.8	Ω

Elemento	Valor	Unidad
R_c	150	m Ω
R_{load}	2.67	Ω
X_c	54	m Ω

Tabla 4.9: Parámetros de la prueba A

Tabla 4.10: Parámetros de la prueba B

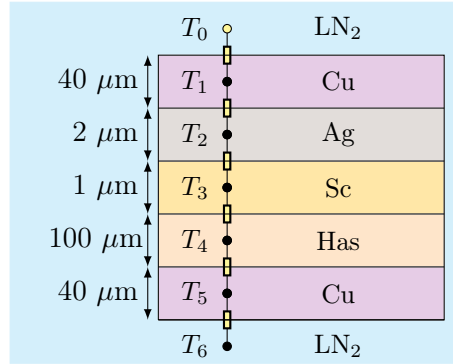
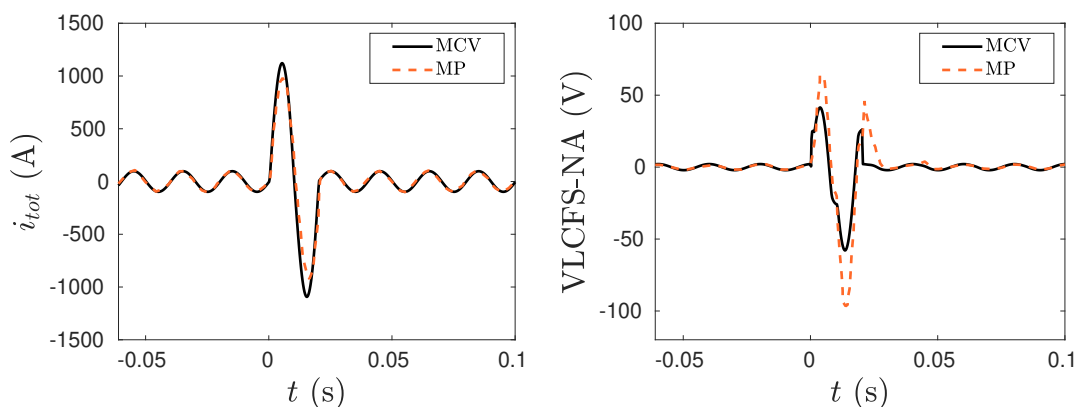
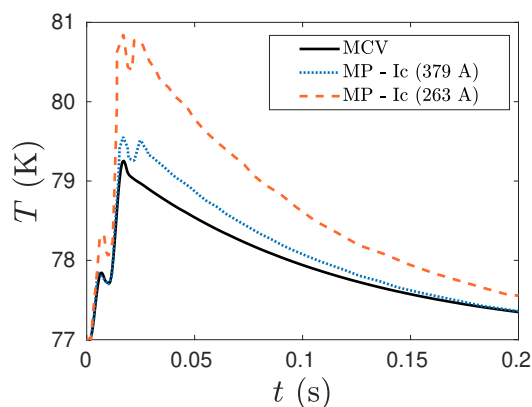


Figura 4.10: Circuito Térmico y estructura de la cinta SCS12050 de SuperPower[®] [10]

El circuito equivalente del LCFSI-NA se muestra en la Fig. 4.9, este circuito es extraído de [10] y permite incluir el MCV como una resistencia variable para modelar el comportamiento del LCFSI-NA. Los parámetros para el circuito de prueba se muestran en la Tabla 4.7. Se realizaron dos pruebas en esta validación, en las Tablas 4.9 y 4.10 se muestran los parámetros considerados en las pruebas, para la prueba A no se considera la inductancia X_c . La cinta usada en el modelo es la SCS12050 de SuperPower[®], en la Tabla 4.8 se muestran las características de la misma. La estructura de las cintas y el circuito térmico se muestra en la Fig. 4.10. Para las pruebas se usó la curva de enfriamiento mostrada en la Fig. 3.8.

4.2.1. Pruebas

En la Fig. 4.11 se muestran los resultados del MCV y los resultados del MP mostrados en [10] para la prueba A. La corriente i_{tot} muestra un comportamiento idéntico durante el funcionamiento normal del limitador, sin embargo, durante el periodo de falla se presenta una variación del 12.53 %, 1.12 kA_{pico} en el MCV y 981.1 A_{pico} en el MP. Para la tensión eléctrica $V_{LCFSI-NA}$ se muestra una variación en el periodo de falla del 54.17 %, obteniendo 41.46 V_{pico} en el MCV y 63.92 V_{pico} en el MP. En cuanto a la recuperación térmica, Fig. 4.11(c), se consideran los resultados para las cintas con mayor y con menor corriente crítica I_c para los resultados del MP (379 A y 263 A, respectivamente). Debido a que los datos de [10] no especifican las variabilidades de las cintas, el MCV considera cintas idénticas con una corriente crítica promedio de 310 A.

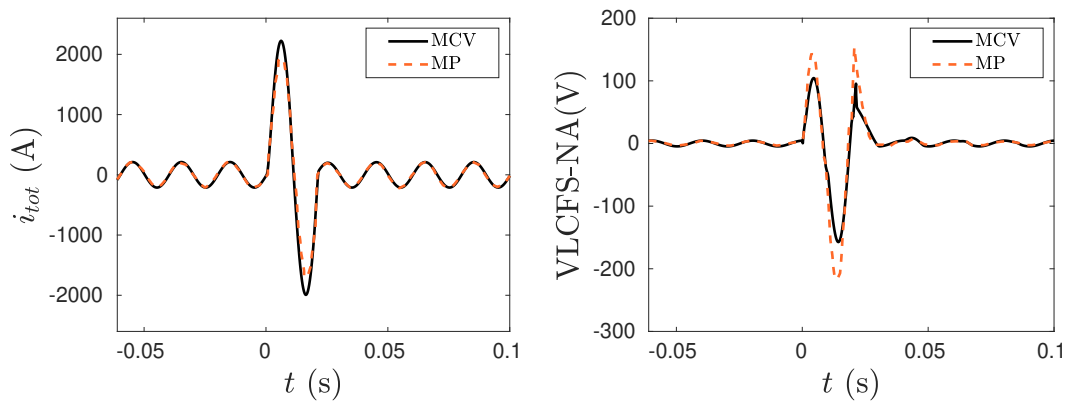
(a) Corriente i_{tot} (b) Tensión eléctrica $V_{LCFSI-NA}$ 

(c) Recuperación térmica

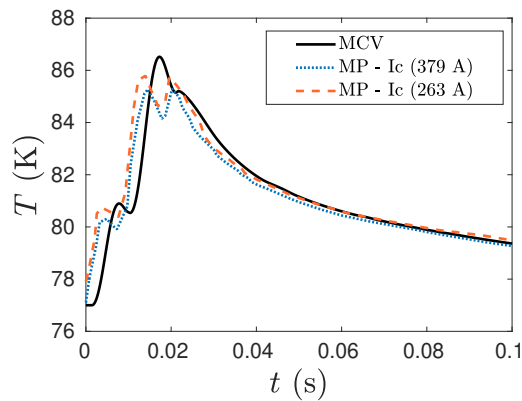
Figura 4.11: Resultados de la prueba A

La variación máxima en la evolución térmica el MCV en la prueba A es de 0.3 K para el resultado del MP con mayor corriente crítica y de 1.6 K para el caso de menor corriente crítica, una variación del 0.38 % y 1.98 % respectivamente.

En cuanto a la prueba B se tienen resultados similares, Fig. 4.12. Para la corriente i_{tot} durante el periodo de falla se tiene una variación en los picos de corriente del 12.6 %, 2.22 kA_{pico} en el MCV y 1.94 kA_{pico} en el MP. En cuanto a la tensión VLCFSI-NA se tiene una variación máxima del 37.91 %, obteniendo 157 V_{pico} para el MCV y 217 V_{pico} para el MP. La recuperación térmica presenta un comportamiento similar, con una variación máxima de 0.22 K y 1 K para las cintas con mayor y menor valor de corriente crítica respectivamente. En la Tabla 4.11 se muestra un resumen de las variaciones máximas en la evolución térmica en las pruebas realizadas.

(a) Corriente i_{tot}

(b) Tensión eléctrica VLCFSI-NA



(c) Recuperación térmica

Figura 4.12: Resultados de la prueba B

4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Resultados	MCV	MP		Variación	
		I_c - mayor	I_c - menor	I_c - mayor	I_c - menor
Temperatura en la prueba A	79.25 K	79.55 K	80.85 K	0.38 %	1.98 %
Temperatura en la prueba B	86.3 K	86.52 K	85.3 K	0.25 %	1.17 %

Tabla 4.11: Variación en la temperatura máxima de los resultados del MCV y del MP

4.2.2. Discusión

Esta comparación se centra en observar el comportamiento de la recuperación térmica del MCV con los resultados obtenidos en [10] por el MP. En general el MCV presenta un comportamiento adecuado en las pruebas térmicas con variaciones despreciables, sin embargo, se tienen variaciones considerables en el comportamiento eléctrico.

La principal diferencia del MCV y el MP es la evolución del índice de transición n . El MCV considera una evolución del índice de transición n que parte de la relación entre la Temperatura de Referencia T_{ref} y la Temperatura del superconductor T_{sc} , mostrada en 3.3. En cuanto al MP el valor del índice de transición depende de la definición de tres etapas, la etapa de fluencia de flujo donde $n = 30$, la etapa de flujo-fluido donde $n = 2$ y la etapa de estado normal donde $n = 1$ [10]. En adición a esto los modelos toman datos distintos en el comportamiento térmico de los materiales, considerándose datos experimentales para los materiales del MP, mientras que el MCV toma el comportamiento de los materiales del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés, National Institute of Standards and Technology [32]).

Lo descrito anteriormente afecta principalmente a las variaciones en la corriente del limitador y en la temperatura. No obstante para las variaciones en la tensión eléctrica VLCFSI-NA, las variaciones más altas en esta comparación, también se debe considerar que el MCV se integra en un circuito equivalente para funcionar como un elemento de un Limitador de Corriente Inductivo. Aún con las variaciones en la tensión se considerara un correcto funcionamiento del MCV debido a sus resultados en la corriente y en la recuperación térmica.

La recuperación térmica presentada en las pruebas A y B obtienen resultados congruentes entre el MCV y MP, con variaciones de menos del 2% en las temperaturas máximas alcanzadas, Tabla 4.11. El resultado de la comparación en recuperación térmica de los modelos por tanto es congruente y valida el comportamiento del MCV.

4.3. Conclusión

Los resultados de la primera comparación se realiza con datos del MB y de las pruebas realizadas en CEPTEL [3]. En estas pruebas se pudo observar el comportamiento del MCV cuando se considera una sola cinta en el limitador. Aún con la diferencia entre datos de la evolución térmica de los materiales, el MCV mostró un comportamiento satisfactorio, con variaciones máximas con respecto a los resultados experimentales del 16.5% para la corriente y del 11.2% para la tensión eléctrica en el LCFS-R.

La segunda comparación se centra en los resultados del estudio para la recuperación térmica de un LCFSI-NA [10]. En esta comparación se presentan dos diferencias importantes, los datos de los materiales son diferentes y el MCV modela un LCFS-R por lo que el modelo se hace uso de en un circuito equivalente para obtener el comportamiento de un LCFSI-NA. Durante la comparación de la recuperación térmica, para el MP se consideraron resultados correspondientes a las cintas con mayor y con menor corriente crítica mientras que para el MCV se consideró el resultado de cintas con el valor promedio. Los resultados muestran un comportamiento térmico correcto por parte del MCV con variaciones menores al 2% en comparación a los resultados del MP.

Los resultados obtenidos por el MCV en las comparaciones son congruentes y muestran variaciones despreciables, con ello se obtiene que el modelo presenta un buen comportamiento. Por tanto el MCV tiene validez en el análisis del funcionamiento de un LCFS-R.

Impacto del modelo de cintas variables sobre el desempeño de un LCFS-R

El desarrollo de este capítulo presenta un caso de estudio para realizar la comparación entre el modelo de cintas variables MCV que se obtuvo en el Capítulo 3 de este trabajo y el modelo de cintas idénticas MCI que fue considerado como base del mismo [6]. El caso de estudio presenta tres casos de cintas con el fin de observar el impacto en el comportamiento del LCFS-R de la inclusión de las variaciones entre los superconductores de las cintas.

5.1. Caso de Estudio

Se considera un caso de estudio que permite analizar el comportamiento de los modelos de LCFS-R simulando una condición de falla y así observar el impacto de las variaciones en los superconductores de las cintas. El caso de estudio está descrito por la Fig. 5.1.

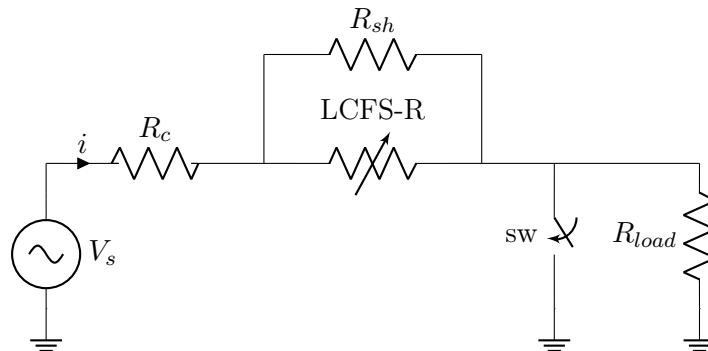


Figura 5.1: Caso de Estudio propuesto para la comparación

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

El caso de estudio esta constituido por una fuente de voltaje V_s , la resistencia R_c para controlar el nivel de corriente de corto circuito, la resistencia R_{load} para controlar la corriente a través del LCFS-R en condiciones normales de operación, un interruptor (sw) para controlar la condición de falla y el conjunto de LCFS-R con su resistencia en derivación R_{sh} . En condiciones de falla, el interruptor sw esta cerrado, por lo que la corriente i en el circuito esta definida por la resistencia R_c . La condición de falla se libera cuando el interruptor sw es abierto, entonces la corriente i en el circuito esta definido por las resistencias R_c y R_{load} , teniendo más impacto durante este periodo la resistencia R_{load} debido a su mayor valor con respecto a R_c . Para los modelos de LCFS-R se usará la curva de enfriamiento usada en el estudio presentado en [6], Fig. 5.2.

Se consideraran 3 diferentes casos de cintas superconductoras para el MCV. La Tabla 5.1 resume los parámetros del caso de estudio. Los parámetros fueron propuestos para considerar un LCFS-R compuesto por 4 cintas superconductoras de Alta Temperatura SAT 2G SF12100 de SuperPower[®] [27] conectadas en paralelo.

Propiedad	Valor	Unidad
Voltaje V_s	300	V _{RMS}
Frecuencia	60	Hz
Resistencia de corto circuito, R_c	0.183	Ω
Resistencia de carga, R_{load}	10	Ω
Cintas en paralelo del LCFS-R	4	-
Resistencia en derivación, R_{sh}	0.05	Ω
Largo de las cintas	4	m

Tabla 5.1: Parámetros del caso de estudio analizado

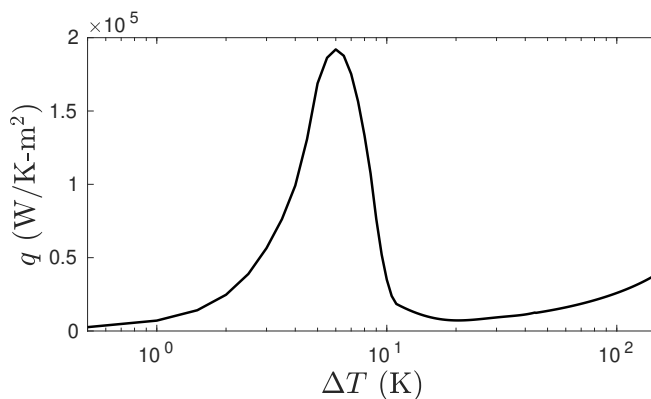


Figura 5.2: Curva de enfriamiento considerada en las simulaciones [6]

5.2. Variabilidades entre cintas

El alcance de este trabajo no abarca la caracterización de las cintas superconductoras que se utilizaran en los modelos de LCFS-R, por lo que se consideran datos extraídos de la literatura para obtener las especificaciones de las cintas. Se utilizan los datos del artículo presentado en [36], donde se describen los resultados experimentales para la caracterización de la corriente crítica I_c de cintas SAT 2G SF12100 de SuperPower® [27]. La estructura de este tipo de cintas se presenta en la Fig. 5.3. En la Tabla 5.2 se muestra el resumen de las características de la cinta SAT 2G SF12100, se incluye el rango de corriente crítica I_c y los valores promedio de la cintas obtenidos por el estudio, los valores promedio serán considerados para las cintas del MCI. Para el MCV se obtuvieron 3 casos de cintas diferentes.

La generación de las variabilidades de corriente crítica I_c entre las cintas de los 3 casos realizados para el MCV se obtuvo seleccionando valores al azar dentro del rango de I_c . Se realizó en el software Matlab con la metodología descrita en su documentación para la generación de números aleatorios dentro de un rango [37]. Inicialmente se hace uso de generadores de números aleatorios para obtener N_{tp} valores normalizados (entre 0 y 1) extraídos de una distribución uniforme, es decir los N_{tp} resultados diferentes obtenidos tienen la misma probabilidad de ocurrir, donde N_{tp} corresponde al número de cintas en el LCFS-R. Para ajustar el rango de números generados al rango de valores de corriente crítica I_c se multiplica cada valor por el ancho del rango ΔI_c , descrito en 5.1, donde $I_{c_{sup}} = 312$ A y $I_{c_{inf}} = 281$ A y hacen referencia a los límites superior e inferior del rango de corriente crítica. Finalmente se ajusta la parte inferior del rango de números aleatorios generado sumando el valor de $I_{c_{inf}}$. En el Apéndice 2 se muestra el Algoritmo 3 que describe esta operación.

$$\Delta I_c = I_{c_{sup}} - I_{c_{inf}} \quad (5.1)$$

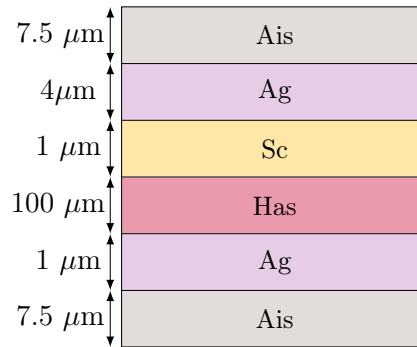


Figura 5.3: Estructura de la cinta SF12100 de SuperPower®

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

Propiedad	Valor	Unidad
Corriente crítica promedio, \bar{I}_c	300	A
Temperatura crítica, \bar{T}_c	91	K
Índice de transición, \bar{n}	21	-
Ancho, w	12	mm
Rango de corriente crítica	281 - 312	A

Tabla 5.2: Características de la cinta SF12100 de SuperPower[®], (Valores promedios indicados por una barra)

El estudio considerado para la obtención de las características de la cinta se centra en la caracterización y pruebas de la corriente crítica de las cintas. Sin embargo el MCV considera que las cintas presentan variabilidades tanto en la corriente crítica I_c como en la temperatura crítica T_c y en el índice de transición n . Para la obtención de los parámetros restantes de los casos de cintas del MCV, se realizaron algunas consideraciones. Se modeló las variaciones a partir de una distribución normal en el que se consideraron los valores promedio de los parámetros presentados en la Tabla 5.2. Para la desviación estándar σ , se tomó un valor basado en las variaciones esperadas en cintas superconductoras. La Tabla 5.3 muestra los valores tomados para la obtención las gráficas de función de densidad a partir de la distribución normal. Con las gráficas del índice de transición n y temperatura crítica T_c , Fig. 5.4(a) y 5.4(b), se seleccionaron rangos que consideran valores con una frecuencia mayor al 10% para la obtención de las variaciones entre cintas y se realizó la metodología descrita para la obtención de los valores aleatorios. Los resultados se muestran en la Tabla 5.4.

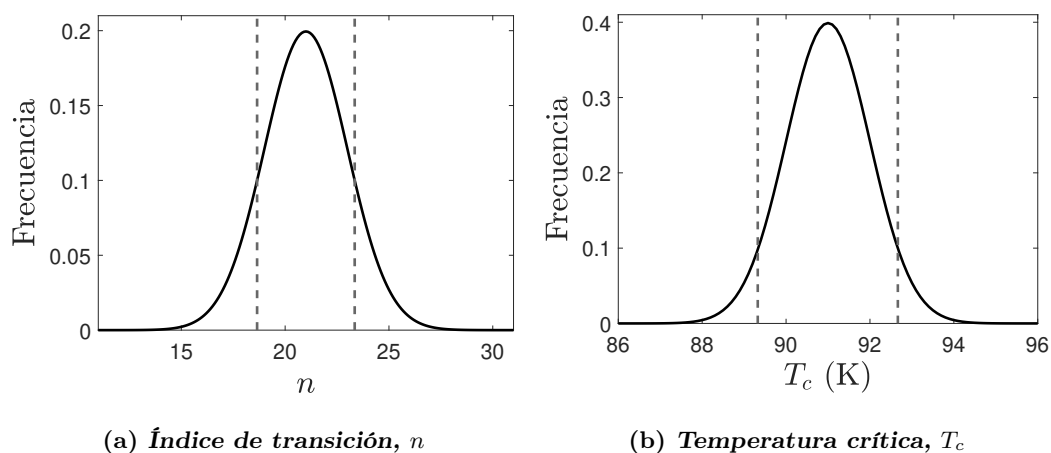


Figura 5.4: Gráficas de las funciones de densidad de probabilidad para T_c y n

Tabla 5.3: Valores para la obtención de la gráfica de densidad normal. Donde μ representa el valor promedio y σ la desviación estándar considerando una distribución normal

Propiedad	μ	σ
Temperatura crítica, T_c	91	1
Índice de transición, n	21	5

Tabla 5.4: Casos de cintas superconductoras del MCV

Caso 1	Cinta				Unidad
	1	2	3	4	
I_c	303	295	310	288	A
T_c	90.70	89.90	91.41	91.66	K
n	20	19	21	21	-
Caso 2					
I_c	306	309	284	309	A
T_c	91.90	89.39	91.44	91.82	K
n	22	18	21	22	-
Caso 3					
I_c	292	302	286	295	A
T_c	92.01	92.54	91.70	91.60	K
n	22	23	18	21	-

5.3. Comportamiento eléctrico

El caso de estudio propuesto permite simular el comportamiento térmico y eléctrico del LCFS-R ante condiciones de falla y condiciones normales de operación. Gracias a esto se puede evaluar el comportamiento del MCV en sus tres casos de cintas con una comparación con el MCI que considera cintas con el valor promedio de sus características eléctricas.

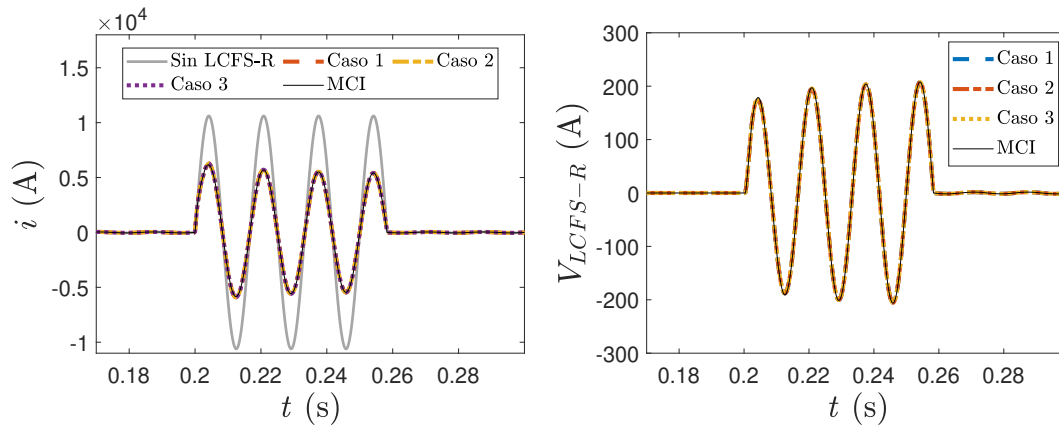
La condición de falla en el caso de estudio es controlada por el interruptor sw. Esta condición tiene una duración de 0.05 s iniciando a partir de los 0.2 s y tiene una corriente pico de 10.6 kA. En la Fig. 5.5 se muestran los resultados de la corriente i obtenidos por un caso sin LCFS-R comparándolos con el resultado obtenido por el MCI y por el MCV. Se obtiene una reducción de la corriente de falla del 41.5 % con la integración de alguno

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

de los modelos de LCFS-R. Para los casos con LCFS-R se muestra un comportamiento casi idéntico entre ambos modelos, presentándose variaciones entre los casos de cintas del MCV menores al 1% y que en comparación con el MCI se tienen variaciones máximas de alrededor al 2.5%, Fig. 5.5(a). La Tabla 5.6 muestra las corrientes pico máximas obtenidas en esta comparación donde se ve a detalle la semejanza del comportamiento entre los modelos.

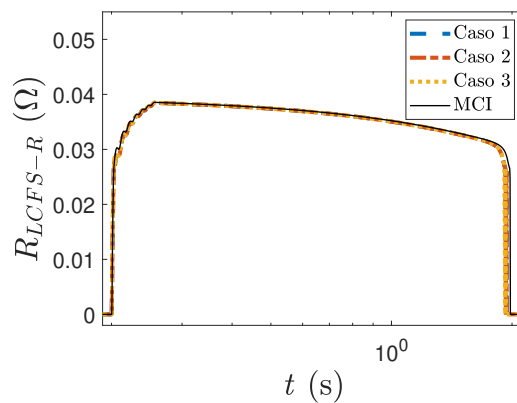
Variable	Caso 1	Caso 2	Caso 3	MCI	Sin LCFS-R
Corriente eléctrica máxima (kA)	6.311	6.312	6.30	6.15	10.6

Tabla 5.5: Valores máximos de corriente durante la falla



(a) Acercamiento a la corriente i

(b) Acercamiento tensión eléctrica



(c) Resistencia eléctrica en el LCFS-R

Figura 5.5: Corriente, resistencia y tensión eléctrica en el LCFS-R

Variable	Caso 1	Caso 2	Caso 3	MCI
Tensión eléctrica máxima (V)	207.6	207.59	207.61	207.87
Resistencia máxima ($m\Omega$)	38.487	38.486	38.491	38.571

Tabla 5.6: Valores máximos de tensión y resistencia eléctrica

En cuanto a los resultados de los modelos sobre la tensión eléctrica que se obtiene en el LCFS-R se tiene una variación entre el MCV y el resultado del MCI menores al 0.15 %, Fig. 5.5(b). Para la resistencia del LCFS-R, los resultados de los modelos se muestran en la Fig. 5.5(c).

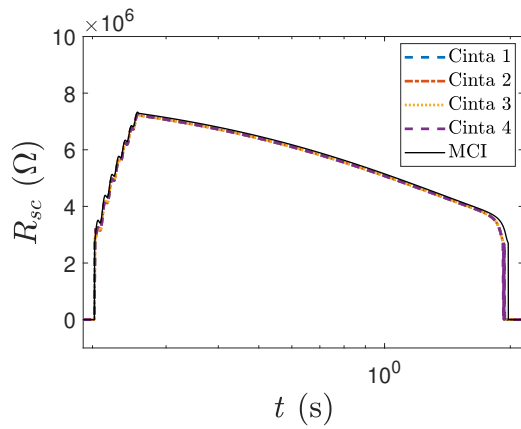
Los resultados del comportamiento eléctrico muestran un comportamiento similar entre los casos de cintas del MCV y el comportamiento obtenido en el MCI, con variaciones máximas del 0.3%. En la Tabla 5.5 se muestra un resumen de los valores máximos de tensión eléctrica y resistencia en el LCFS-R. Los resultados obtenidos tanto en tensión, corriente y resistencia eléctrica en el LCFS-R muestran que la integración de las variabilidades de las cintas afectan de manera mínima el comportamiento global del LCFS-R.

Para entender las variaciones en el comportamiento con la integración de las variaciones en las características de los superconductoras de las cintas se muestran un análisis individual de los 3 casos de cintas del MCV. Los resultados de la resistencia en el superconductor en los casos de cintas del MCV y del MCI se muestran en la Fig. 5.6. La evolución de la resistencia en general presenta un comportamiento similar en los modelos, sin embargo se tienen diferencias derivadas de la variación entre cintas. El caso 1, Fig. 5.6(a), se diferencia de los resultados del MCI por una elevación de la resistencia del superconductor más rápida principalmente en la cinta 2 y en la cinta 1, para más detalle se observa la Fig. 5.6(b) la cual muestra un acercamiento de la elevación de la resistencia en el cambio de estado superconductor al estado normal.

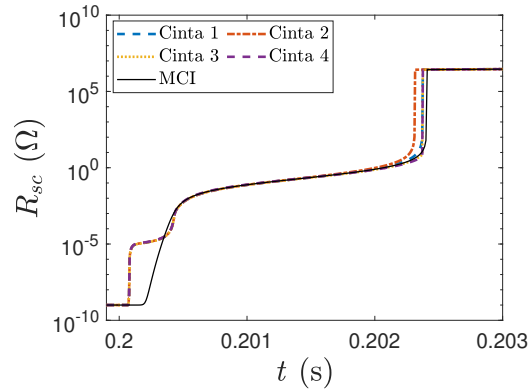
Para el caso 2 el resultado es similar, Fig. 5.6(c), la cinta 2 presenta una elevación a su valor máximo más rápida con respecto a las demás cintas, las cuales tienen una elevación más lenta con respecto al resultado arrojado por el MCI, Fig. 5.6(d). En cuanto al caso 3, Fig. 5.6(e), las resistencias presentan una elevación a su valor máximo de unos microsegundos más lento con respecto al resultado obtenido en el MCI, Fig. 5.6(f).

Las variaciones en las cintas del MCV afectan la evolución de la resistencia de las capas superconductoras, aunque en comparación con el resultado del MCI es similar, las variaciones máximas en los resultados rondan el 1% y referente a las diferencias en la transición del estado superconductor al estado normal, es decir cuando los superconductores presentan su valor máximo de resistencia, tienen variaciones de cercanas a los 10 μ s. Además de las diferencias en el comportamiento antes descritas, se presenta una diferencia en el tiempo de recuperación térmica del LCFS-R (retorno al valor despreciable en la resistencia de la capa superconductora de las cintas), sin embargo este tema se abordará en el análisis térmico.

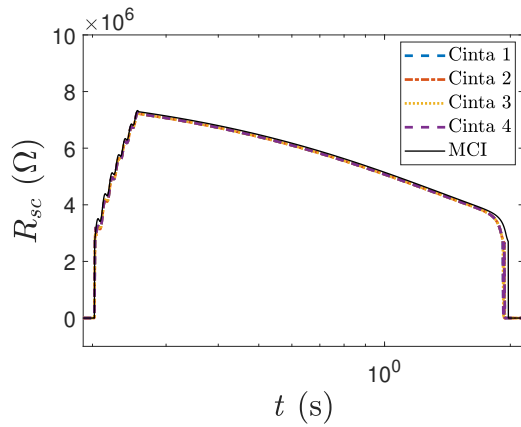
5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R



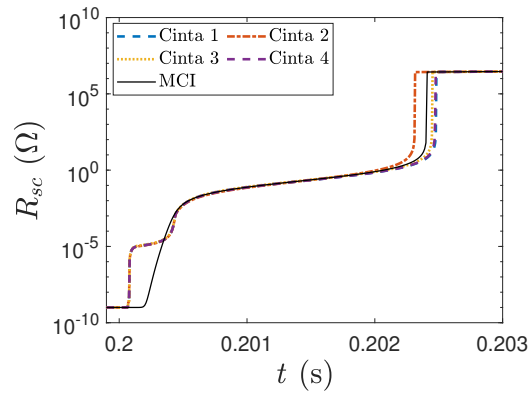
(a) Resistencia Caso 1



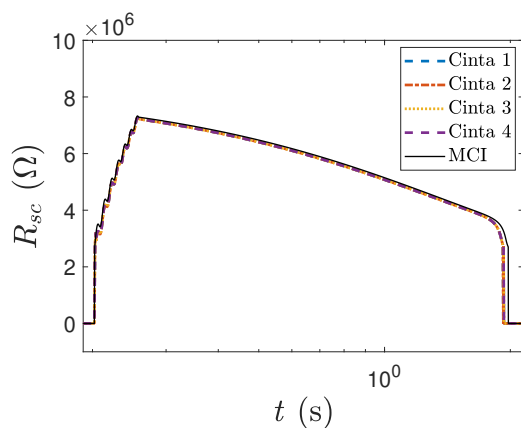
(b) Acercamiento Caso 1



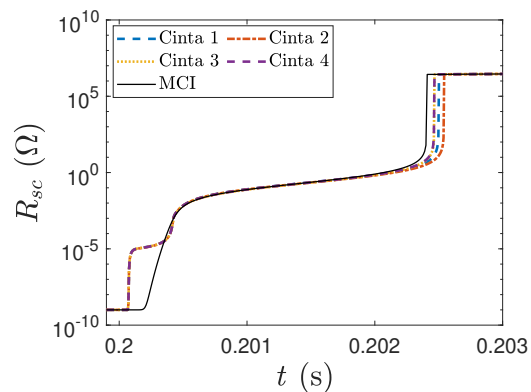
(c) Resistencia Caso 2



(d) Acercamiento Caso 2



(e) Resistencia Caso 3



(f) Acercamiento Caso 3

Figura 5.6: Comportamiento de la resistencia en la capa superconductora R_{sc} en los casos de cintas del MCV y el resultado obtenido por el MCI

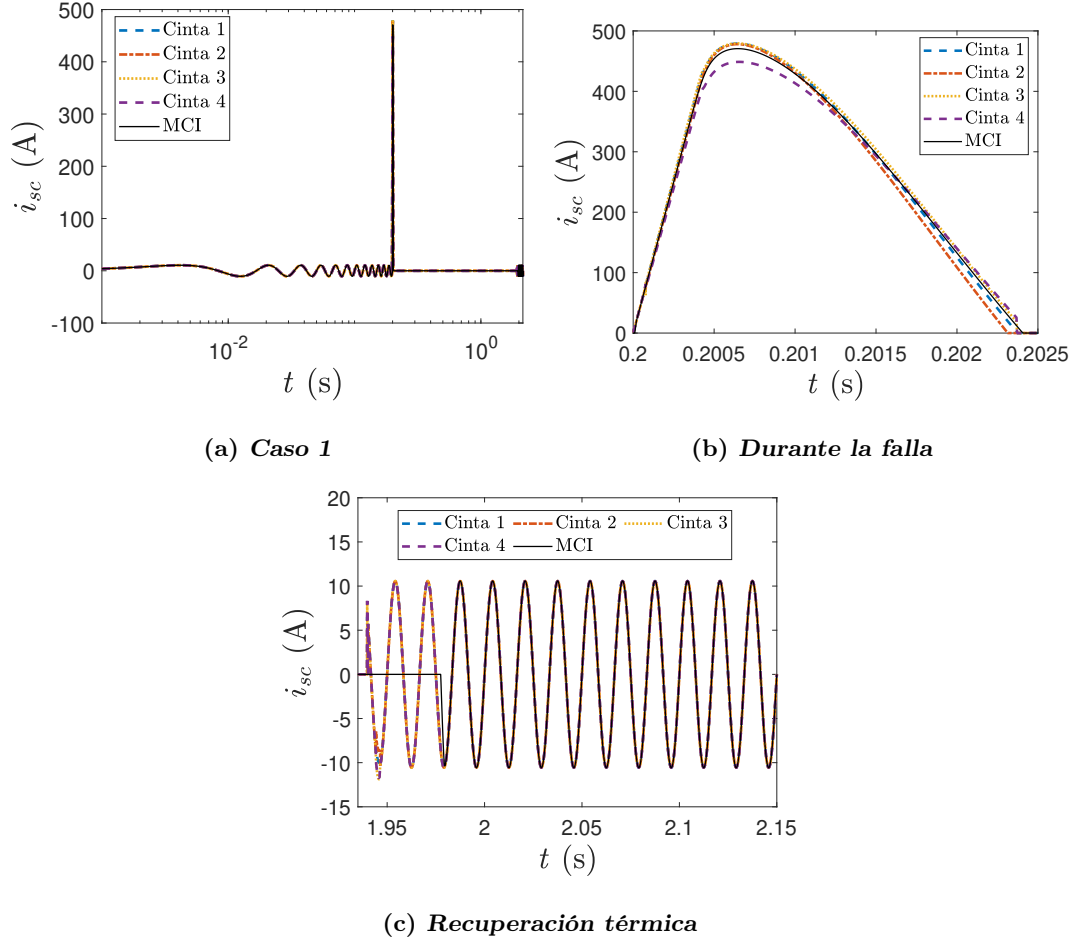


Figura 5.7: Comportamiento de la Corriente i_{sc} en la capa superconductora en el caso 1 del MCV y el resultado obtenido por el MCI

La evolución de la corriente por tanto también se ve afectada con las variabilidades entre capas superconductoras, notándose durante el periodo de falla y en la recuperación térmica del LCFS-R. Los resultados del caso 1 se muestran en la Fig. 5.7. Durante las condiciones normales de operación el comportamiento es idéntico al resultado del MCI, Fig. 5.7(a). Sin embargo durante el periodo de falla se presentan variaciones en la corriente de las capas superconductoras. La cinta 4 presenta un pico máximo de corriente menor al de las demás cintas del caso y que el resultado del MCI, una variación del 6.47% con respecto a las demás cintas del MCV y del 4.68% con respecto al resultado del MCI. Las demás cintas del caso presentan una variación del valor máximo de corriente menor al 0.5% con respecto al resultado del MCI. El tiempo de conducción durante la falla también se ve afectado, mostrando que la cinta con menor T_c (cinta 2) pierden su estado superconductor 0.1 ms antes que las demás cintas del caso. Para la re-

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

cuperación térmica del LCFS-R (momento en el que las capas superconductoras vuelven a conducir corriente) del caso 1 se muestran en la Fig. 5.7(c). Se observa que las diferentes características de las cintas superconductoras reducen el tiempo de recuperación térmica en 37.72 ms.

En cuanto al caso 2, los resultados se presentan en la Fig. 5.8. Durante las condiciones normales de operación el resultado entre el MCV y el MCI es idéntico. La corriente durante la falla, Fig. 5.8(b), muestra las diferencias debidas a las características variables entre cintas del MCV. La cinta con menor I_c (cinta 3) presenta una corriente máxima menor al de las demás cintas. Mientras que la cinta 2, cinta con menor T_c , es la que presenta el valor máximo de corriente. Los resultados para la corriente de las capas superconductoras durante recuperación térmica se muestran en la Fig. 5.8(c), observándose que el caso 2 es 38.01 ms más rápido que el resultado del MCI.

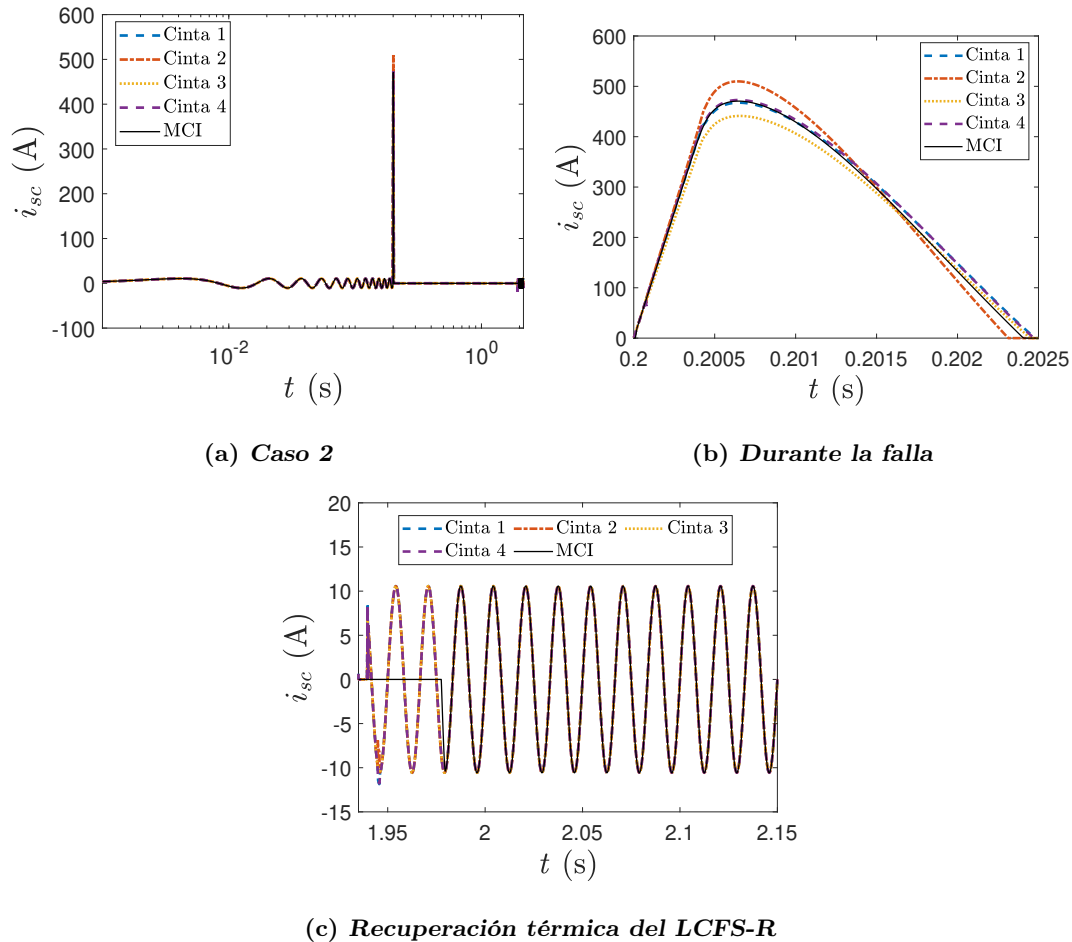


Figura 5.8: Comportamiento de la Corriente i_{sc} en la capa superconductora en el caso 2 del MCV y el resultado obtenido por el MCI

Para el caso 3, los resultados de la corriente en la capa superconductora de las cintas se muestra en la Fig. 5.9. Al igual que los demás casos de cintas, se muestra un comportamiento idéntico entre los modelos en el periodo anterior a la falla, Fig. 5.8(a). En el periodo de falla las variaciones entre cintas son notorias, Fig. 5.9(b). Las cintas 1, 2 y 4 presentan un valor menor de corriente máxima con respecto al MCI. En cambio la cinta 3, la cinta con un índice n menor a las demás cintas del caso, presenta un valor mayor con respecto al MCI. El tiempo de conducción de las capas superconductoras durante la falla en general es mayor al resultado del MCI, 0.1 ms en promedio, Fig. 5.9(b). En cuanto a la corriente durante la recuperación térmica, este caso de cintas presenta el mejor tiempo de recuperación de la corriente en las capas superconductoras, siendo 48.77 ms más rápida que el resultado obtenido por el MCI, Fig. 5.9(c).

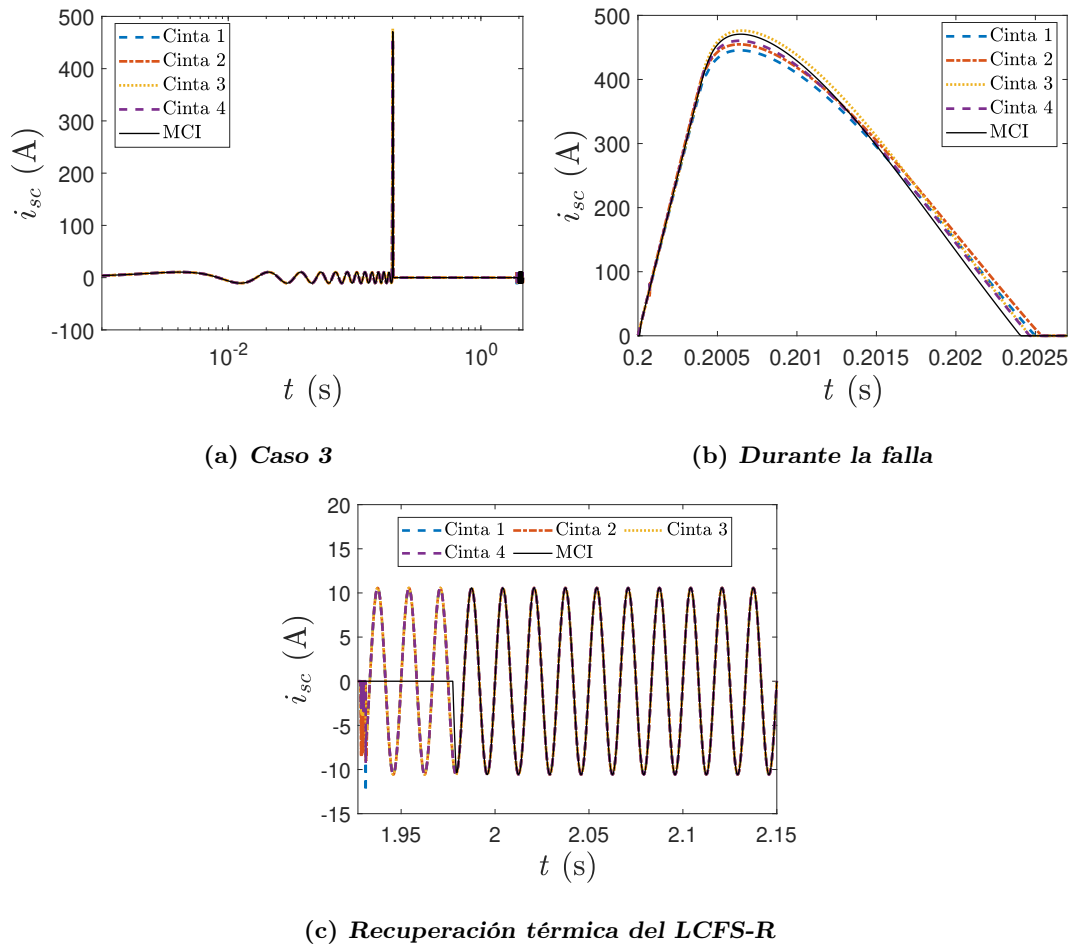


Figura 5.9: Comportamiento de la Corriente i_{sc} en la capa superconductora en el caso 3 del MCV y el resultado obtenido por el MCI

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

Para mayor detalle del comportamiento de la corriente durante la falla se agrega la Tabla 5.7 que incluyen los detalles de valores máximos de corriente, tiempo de conducción de la capa superconductora de las cintas durante la falla y la recuperación térmica del LCFS-R respectivamente.

Los resultados del comportamiento eléctrico muestran un correcto comportamiento por parte del modelo MCV, sin embargo para entender las variaciones se debe analizar el comportamiento térmico y ver la relación con el comportamiento eléctrico.

Corriente máxima (A)					
	Cinta 1	Cinta 2	Cinta 3	Cinta 4	MCI
Caso 1	479.35	478.1	479.35	448.64	
Caso 2	467.46	509.81	441.21	472.95	470.647
Caso 3	445.49	454.8	476.1	470.65	
Transición al estado normal (ms)					
Caso 1	202.37	202.31	202.37	202.37	
Caso 2	202.48	202.31	202.45	202.47	202.41
Caso 3	202.5	202.54	202.47	202.46	
Recuperación térmica (s)					
Caso 1	1.9397				
Caso 2	1.9394				1.9768
Caso 3	1.9289				

Tabla 5.7: Valores máximos de la corriente i_{sc} durante el periodo de falla

5.4. Comportamiento térmico

Para realizar la comparación térmica entre modelos se retoma que el MCV toma 5 nodos para el modelo termoelectrico, Fig. 5.10(a), mientras que el MCI capa capa representa un nodo, Fig. 5.10(b). Por tanto que el modelo MCV considera el promedio de temperaturas de las capas consideradas por el nodo. En esta sección se muestra el comportamiento del MCV en sus casos de cintas de la evolución térmica en comparación al MCI y su relación con el comportamiento eléctrico.

Los resultados para el caso 1 se muestran en la Fig. 5.11. Se observa que el comportamiento general de la temperatura entre los modelos es similar, presentándose variaciones principalmente en la evolución de la temperatura durante la pérdida del estado superconductor (cuando la temperatura supera la temperatura crítica de las cintas) y durante la recuperación térmica del LCFS-R (cuando la temperatura desciende a un valor menor a la temperatura crítica de las cintas), Fig. 5.11(c) y 5.11(b) respectivamente. Esta diferencia en la evolución de la temperatura corresponde a las variaciones entre cintas y es el causante de las diferencias en el tiempo de conducción del superconductor de las cintas. Para entender mejor esta correspondencia entre los valores se agregan las Fig. 5.11(d) y 5.11(e) donde se observa la afectación del comportamiento térmico en la recuperación térmica de la capa superconductora de la cinta 1 del caso, obteniendo que el comportamiento del modelo es correcto ya que al presentarse una temperatura menor a la T_c ($T_{sc} < T_c$), la cinta retoma su estado superconductor, es decir la resistencia retoma su valor cercano a 0 y por tanto se retoma la conducción en esta capa. Finalmente se observa que cuando se retoma el estado superconductor en las cintas, la temperatura en el MCV decae de manera más lenta que el resultado del MCI, con una variación del 3.65%. Los cambios en el comportamiento térmico debido a las variaciones en los superconductores de las cintas son mínimos, sin embargo comprueba que el MCV considera las variaciones eléctricas en la evolución de la temperatura.

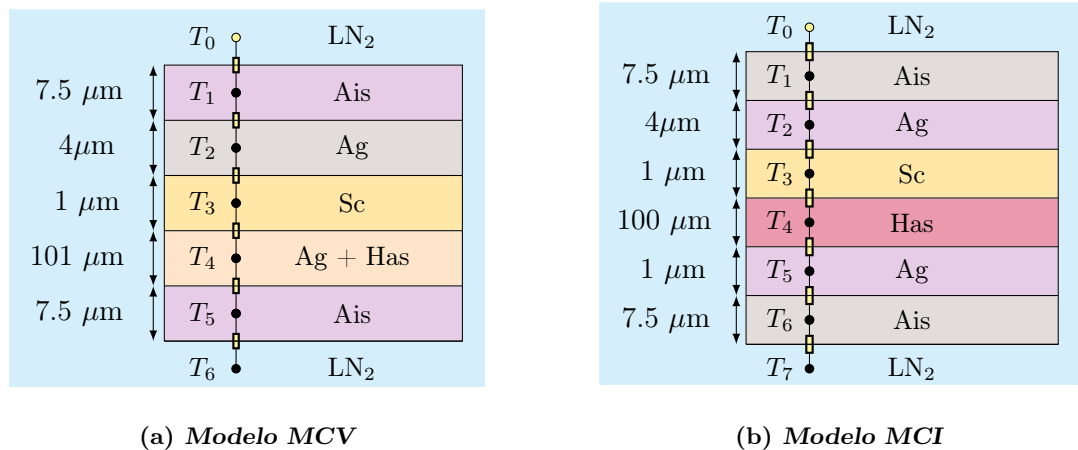
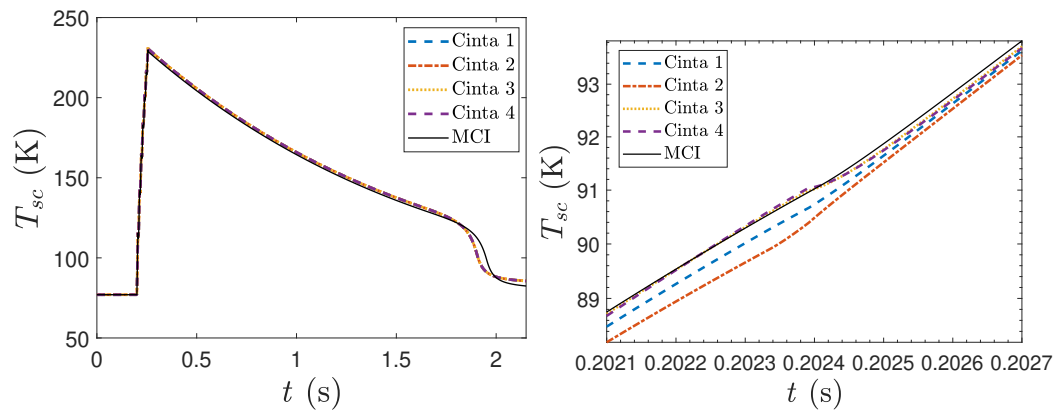


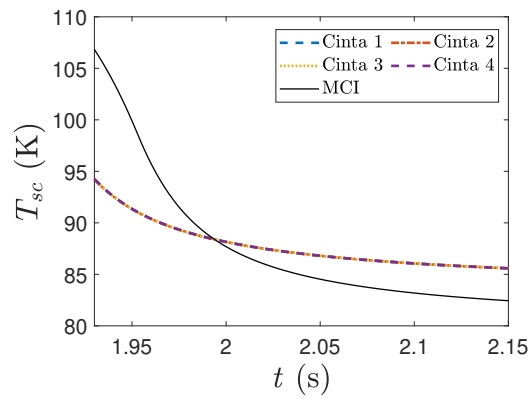
Figura 5.10: Circuito Térmico para la cinta SF12100 de SuperPower[®]

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

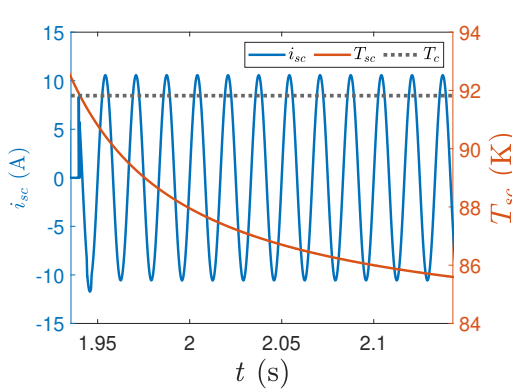


(a) Resultado total

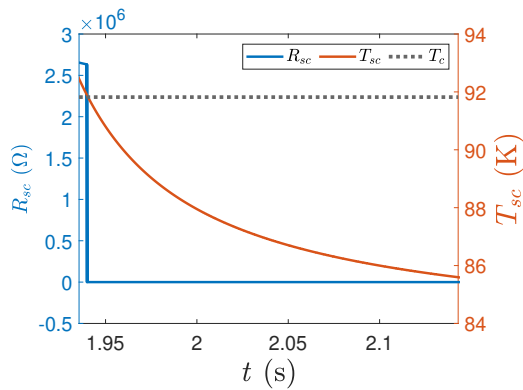
(b) Acercamiento cuando $T > T_c$



(c) Recuperación térmica $T < T_c$



(d) Corriente contra temperatura



(e) Resistencia contra temperatura

Figura 5.11: Temperatura en la capa superconductora del caso 1 del MCV

Para el caso 2 los resultados en la capa superconductora se presentan la Fig. 5.12. Se observa un comportamiento similar al descrito por parte del caso 1. Antes y durante la falla el comportamiento entre modelos es similar con variaciones mínimas que no superan el 1%. No obstante las variaciones se van acentuando durante la pérdida del estado superconductor y al acercarse al tiempo de recuperación del caso, Fig. 5.12(c) y 5.12(b) respectivamente, llegando a tener variaciones máximas del 3% durante estas etapas. De manera similar, la evolución térmica corresponde a los resultados eléctricos mencionados en la sección anterior para el caso de cintas.

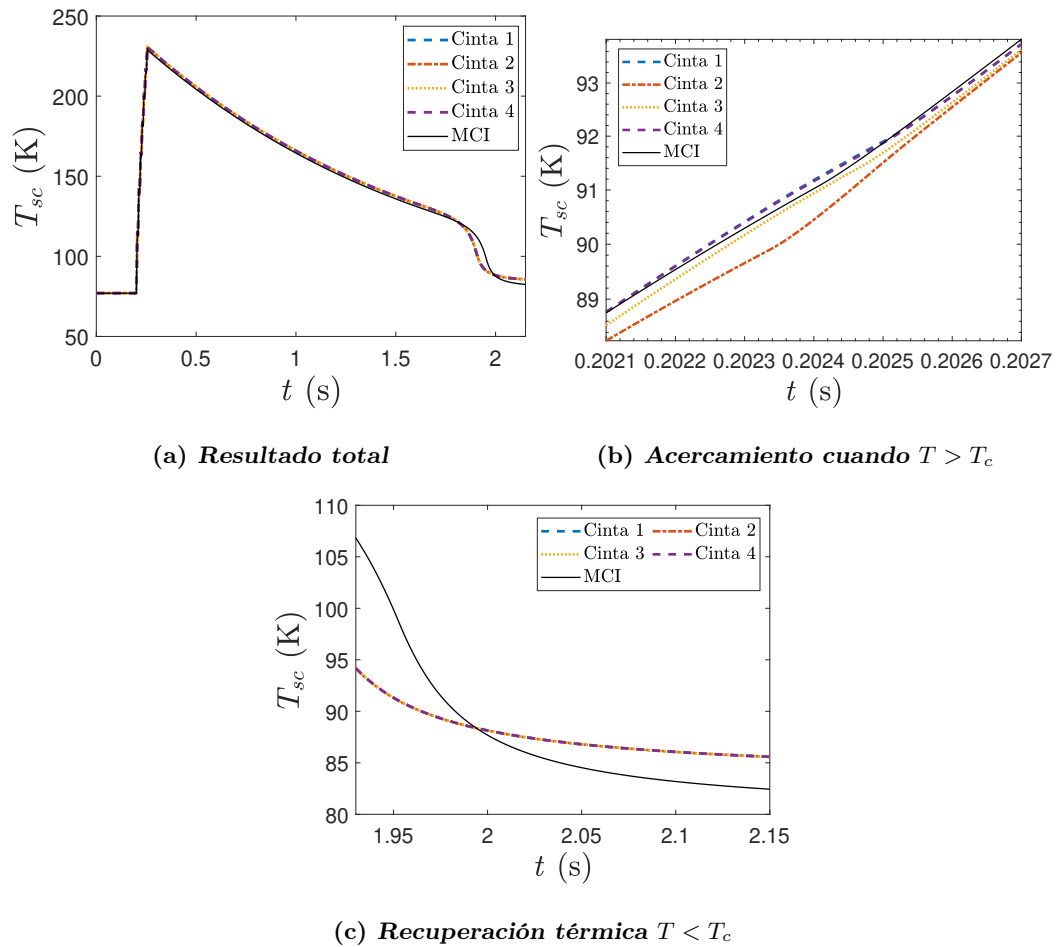
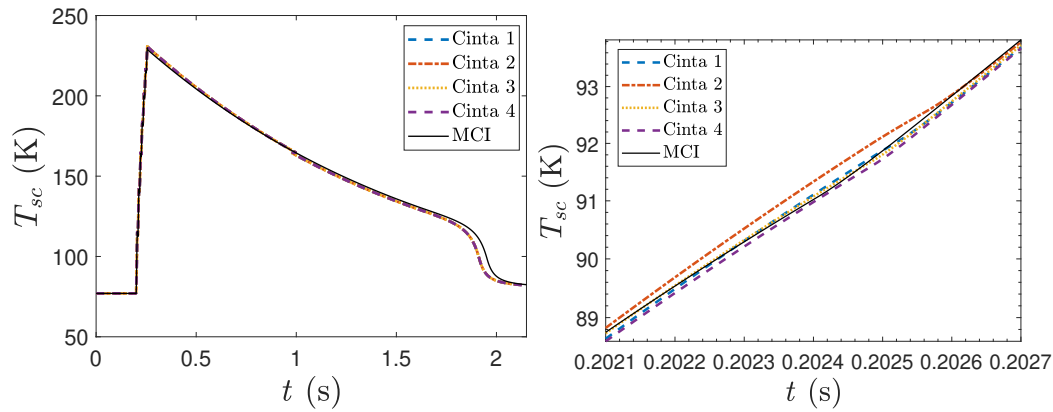


Figura 5.12: Temperatura en la capa superconductora del caso 2 del MCV

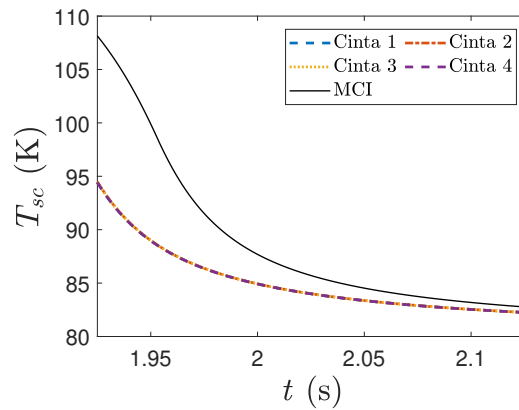
5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

En cuanto a los resultados para el caso 3 se muestran en la Fig. 5.13. El comportamiento es similar al de los casos antes descritos. Las variaciones más notorias se presentan en la recuperación térmica, Fig. 5.13(c), este caso de cintas se destaca por presentar una menor variación durante la pérdida del estado superconductor debido a que sus valores de T_c son los más cercanos entre si, Fig. 5.13(b). Además, debido a que presenta mayores valores de T_c , el tiempo de recuperación de este caso es de cerca a 10 ms más rápido, lo que corresponde al resultado de la Fig. 5.9(c).



(a) *Resultado total*

(b) *Acercamiento cuando $T > T_c$*



(c) *Recuperación térmica $T < T_c$*

Figura 5.13: Temperatura en la capa superconductora del caso 3 del MCV

5.5. Discusión

La comparación presentada anteriormente demostró que el impacto sobre el desempeño del limitador de incluir cintas con diferentes características tiene un comportamiento muy similar que el considerar un caso en el que todas las cintas son iguales.

El caso 1 se caracteriza por tener valores de temperatura crítica T_c e índice de transición n menores entre los casos de cintas, pero además el valor de las características de las cintas son los más cercanos a los valores usados en el MCI. Debido a esto el caso 1 presenta mayor semejanza al comportamiento del MCI en comparación a los demás casos, Fig. 5.14. En este caso se pueden apreciar los efectos de la integración de las variabilidades en el superconductor en la I_c principalmente en la cinta 4 la cual presentó una corriente menor durante la falla, Fig. 5.7(b), con una variación del 4.68 % con respecto al resultado obtenido por el MCI, Fig. 5.14(a). Mientras que en la variación en la transición al estado normal, la cinta 2 es la que destaca ya que pierde la conducción de corriente unos micro segundos antes con respecto a las demás cintas debido a que tiene una T_c menor causando la mayor variación en este apartado con 0.05 %, Fig. 5.14(b).

Se observa además que la variación en el comportamiento térmico general y en el tiempo de recuperación térmica es la menor con respecto a los demás casos con una variación del 1.88 %, como se muestra en la Fig. 5.17.

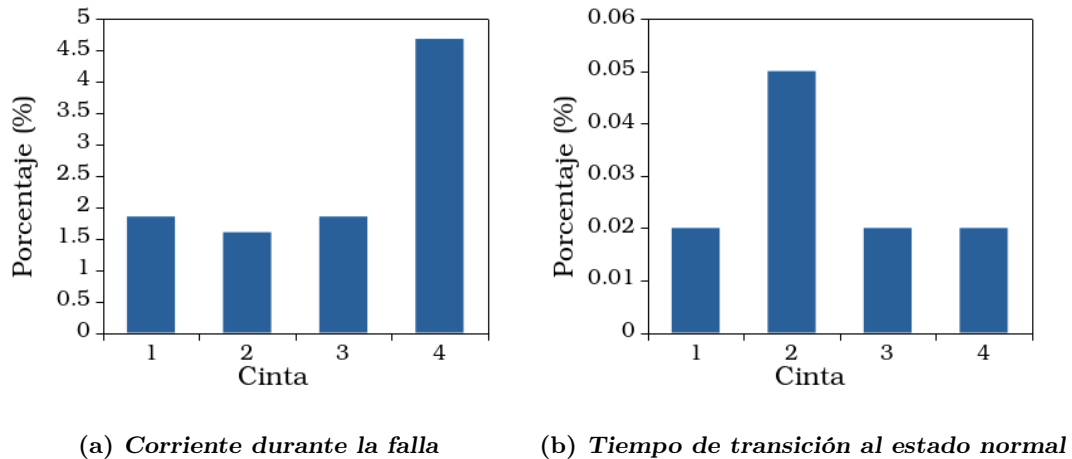


Figura 5.14: Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para el caso 1

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

Los resultados del caso 2 del MCV muestran que las variaciones en la corriente son las más altas con respecto a los demás casos, Fig. 5.8(b). Se observa que la cinta 2, al tener una I_c mayor al resto, puede conducir una corriente mayor durante la falla, con una variación del 8.32%. En tanto la cinta 3, al tener una I_c menor al resto de cintas es la que conduce una menor corriente durante la falla, con una variación del 6.25%. La cinta 2 y la cinta 3 por tanto son las cintas con mayor variación en la corriente máxima durante la falla, Fig. 5.15(a). En cuanto al tiempo de transición al estado normal se observa una vez más el impacto del valor de la T_c , la cinta 2 al tener una T_c menor a las demás cintas tiene un tiempo de conducción menor, obteniendo la variación mayor en esta comparación (0.05%). En comparación la cinta 3, la cinta con mayor T_c puede conducir durante más tiempo que la cinta 2, Fig. 5.15(b). Este caso de cintas presenta un mejor tiempo de recuperación que el caso 1 y es debido a que la T_c es en promedio mayor y por tanto aunque el comportamiento térmico entre los casos es similar, se obtienen valores de temperatura menores a su T_c en un tiempo más rápido, Fig. 5.12(c).

El caso 3 de cintas del MCV por su parte se caracteriza por presentar los valores más bajos de I_c lo que provoca que la corriente i durante la falla tenga la variación más alta en comparación al resultado del MCI, 5.9(b). Destacando la cinta 4 la cual debido a sus valores de I_c , T_c y n más cercanos a los valores promedios (valores usados en el MCI), obtiene un comportamiento casi idéntico al del MCI.

Además de lo mencionado, el caso presenta los valores más altos de T_c , por lo que es el caso con el mejor tiempo de recuperación y el que presenta más variación con respecto al resultado del MCI, Fig. 5.17.

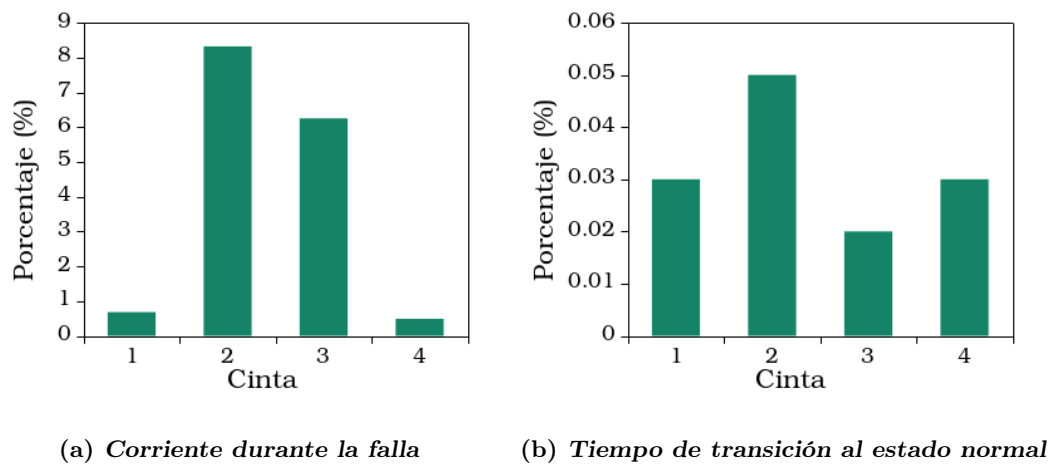


Figura 5.15: Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para el caso 2

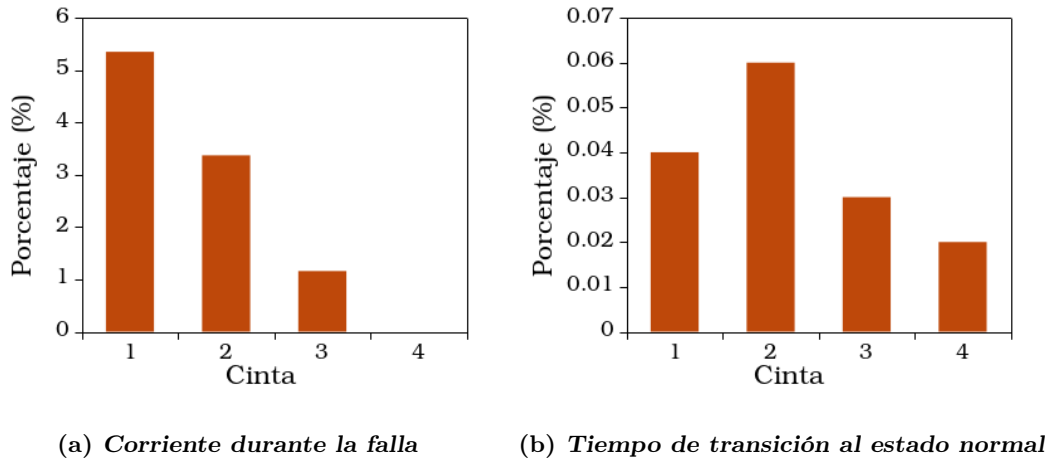


Figura 5.16: Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para el caso 3

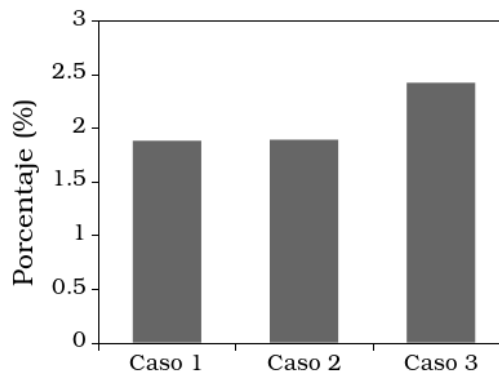


Figura 5.17: Variación porcentual de los resultados del MCV con respecto a los resultados del MCI para la recuperación térmica

El impacto del índice n durante las comparaciones se observa principalmente en las capas con un índice de transición mayor, obteniendo un aumento en la resistencia más brusco, Fig. 5.6. Sin embargo debido a la poca diferencia que se tiene en el índice de transición de las cintas de segunda generación, el efecto se ve opacado por las demás variaciones en los parámetros eléctricos.

Se debe complementar que aunque principalmente la diferencia de la respuesta térmica de los modelos es debido a la integración de las variabilidades en los parámetros de

5. IMPACTO DEL MODELO DE CINTAS VARIABLES SOBRE EL DESEMPEÑO DE UN LCFS-R

las cintas en el MCV, también se tienen variaciones debido al modelo térmico, el MCV considera un agrupamiento en los nodos 2 y 4 para simplificar el cálculo, Fig. 5.10.

Para mayor detalle se agrega la Tabla 5.8 donde se muestran los porcentajes de variación de las cintas de los casos con respecto al resultado del MCI. Los resultados obtenidos por el MCV son los esperados. La integración de las variabilidades en los superconductores de las cintas no supone una afectación considerable, siendo despreciables en el desempeño global del limitador. No obstante, los caso de cintas permitieron mostrar el impacto de las variabilidades del superconductor, observándose distintos efectos en el comportamiento de los superconductores, además de verificar el comportamiento termoeléctrico del MCV.

Este modelo servirá para realizar un análisis más real del comportamiento de un LCFS- R ante las variaciones en el superconductor de las cintas y con esto entender mejor su funcionamiento y diseño.

Variación en la Corriente máxima				
	Cinta 1	Cinta 2	Cinta 3	Cinta 4
Caso 1	1.85 %	1.6 %	1.85 %	4.68 %
Caso 2	0.68 %	8.32 %	6.25 %	0.49 %
Caso 3	5.35 %	3.37 %	1.16 %	0.006 %
Variación en el tiempo de transición al estado normal				
Caso 1	0.02 %	0.05 %	0.02 %	0.02 %
Caso 2	0.03 %	0.05 %	0.02 %	0.03 %
Caso 3	0.04 %	0.06 %	0.03 %	0.02 %
Variación en el tiempo de la recuperación térmica				
Caso 1				1.88 %
Caso 2				1.89 %
Caso 3				2.42 %

Tabla 5.8: Variaciones en los resultados del MCV en la corriente i_{sc} durante el periodo de falla con respecto a los resultados del MCI

Conclusiones

El trabajo presentado en esta tesis permitió desarrollar y comprobar el funcionamiento de un modelo de Limitador de Corriente de Falla Superconductor Resistivo (LCFS-R) que incluye variabilidades entre los superconductores de las cintas y que describe los comportamientos térmicos y eléctricos del limitador considerando la ley de potencia para superconductores y una analogía termoelectrica de los elementos del LCFS-R.

El modelo fue desarrollado considerando como base un modelo de LCFS-R que considera que las cintas superconductoras son idénticas [6]. El modelo de cintas idénticas (MCI) enfoca su análisis en el impacto del LCFS-R en redes eléctricas y sistemas eléctricos de potencia. A diferencia del trabajo presentado en esta tesis que tiene como objetivo incluir y analizar el impacto de las variabilidades en las cintas en el comportamiento del limitador.

El modelo resultante de este trabajo, el modelo de cintas variables (MCV), fue comparado con los resultados de otros modelos y con datos experimentales con el fin de tener una validación de su comportamiento térmico y eléctrico. Durante las pruebas realizadas en esta validación se obtuvieron resultados congruentes, con ligeras variaciones derivadas de las consideraciones que toman los diferentes modelos. Los resultados obtenidos por tanto verificaron el funcionamiento térmico y eléctrico del MCV.

Para observar la afectación en el comportamiento del limitador al considerar las características variables de las cintas superconductoras (I_c , T_c y n) se realizó una comparación entre el MCV y el MCI. Esta comparación consistió en proponer un caso de estudio en el cual se pudiera observar el comportamiento del limitador en sus condiciones de falla, de distribución de corriente y condiciones normales de operación. Se obtuvieron tres casos de cintas con características variables para el MCV y se usó un caso de cintas idénticas con el MCI. El MCV mostró la variación en el comportamiento del LCFS-R dependiendo de las características individuales de las cintas con un comportamiento correcto en cada caso. Se observó que la variación en los resultados de los modelos es mínima en el comportamiento global del LCFS-R, sin embargo en el comportamiento individual de las cintas se aprecian diferencias causadas por las variaciones en los superconductores.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el modelo podrá ser usado para analizar el impacto de las variabilidades en los superconductores de las cintas en el comportamiento del LCFS-R y con ello obtener un análisis más detallado de las cintas superconductoras que lo componen al aumentar el número de cintas en paralelo.

Durante este trabajo se verificaron las siguientes hipótesis:

- En condiciones normales de operación del LCFS-R, cuando la temperatura y corriente se encuentran debajo de sus niveles críticos, se presenta una resistencia despreciable en el LCFS-R.
- El comportamiento del LCFS-R presenta una variación mínima aún cuando se considera que las cintas superconductoras son diferentes entre sí.
- Los resultados obtenidos por el MCV permiten estudiar el comportamiento de las cintas dentro de un LCFS-R, lo cual permitirá realizar estudios más detallados del comportamiento del LCFS-R en un sistema eléctrico.

Trabajos a futuro sobre el modelo:

- Implementar un estudio de Monte Carlo para extraer las distribuciones relativas a la corriente de falla (estudio estocástico).
- Implementar el modelo en una red para ver el desempeño en una operación más cercana a la realidad.
- Usar el modelo como base para proyectos que involucren más cintas en paralelo como lo son los cables superconductores.

Apéndice 1

Algoritmo 1 Newton-Rapshon multivariable, donde e = error, tol = tolerancia, $maxiter$ = máximo de iteraciones

Entrada: \mathbf{i}_{sc}^0 , β , \mathbf{n} , \mathbf{i}_{msh} , e , tol , $maxiter$.

Salida: \mathbf{i}_{sc}

- 1: $j = 1$
 - 2: $\mathbf{i}_{sc,a} = \mathbf{i}_{sc}^0$
 - 3: **mientras** $e \geq tol$ y $j \leq maxiter$ **hacer**
 - 4: Se obtiene $\delta\mathbf{i}_{sc,a}$.
 - 5: Se obtiene $\mathbf{i}_{sc,p}$.
 - 6: Se obtiene el error entre las dos ultimas iteraciones.
 - 7: **si** $j > maxiter$ **entonces**
 - 8: devuelve un error.
 - 9: **fin si**
 - 10: Se actualiza el valor de la corriente $\mathbf{i}_{sc,a} = \mathbf{i}_{sc,p}$
 - 11: $j = j + 1$
 - 12: **fin mientras**
 - 13: **devolver** \mathbf{i}_{sc}
-

Algoritmo 2 Algoritmo para la obtención de $\delta \mathbf{i}_{sc,a}$

Entrada: $\mathbf{i}_{sc,a}$, β , \mathbf{n} , \mathbf{i}_{msh} , N_{tp}

Salida: $\delta \mathbf{i}_{sc,a}$

- 1: **para** $ii = 1$ hasta N_{tp} cintas en paralelo **hacer**
 - 2: $\mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc,aii}) = i_{sc,aii}^{n_{ii}} - \beta_1(i_{msh} + i_{nsc,ii})$.
 - 3: $\mathbf{J}(\mathbf{i}_{sc,aii}, \cdot) = -\beta_{ii}$
 - 4: $\mathbf{J}(\mathbf{i}_{sc,aii}, \mathbf{i}_{sc,aii}) = n_{ii} i_{sc,aii}^{n_{ii}-1}$
 - 5: **fin para**
 - 6: **si** $|\mathbf{J}(\mathbf{i}_{sc,a})| \neq 0$ **entonces**
 - 7: Se obtiene $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{i}_{sc,a})$.
 - 8: **si no**
 - 9: devuelve un error.
 - 10: **fin si**
 - 11: **devolver** $\delta \mathbf{i}_{sc,a} = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{i}_{sc,a}) \times \mathbf{F}(\mathbf{i}_{sc,a})$
-

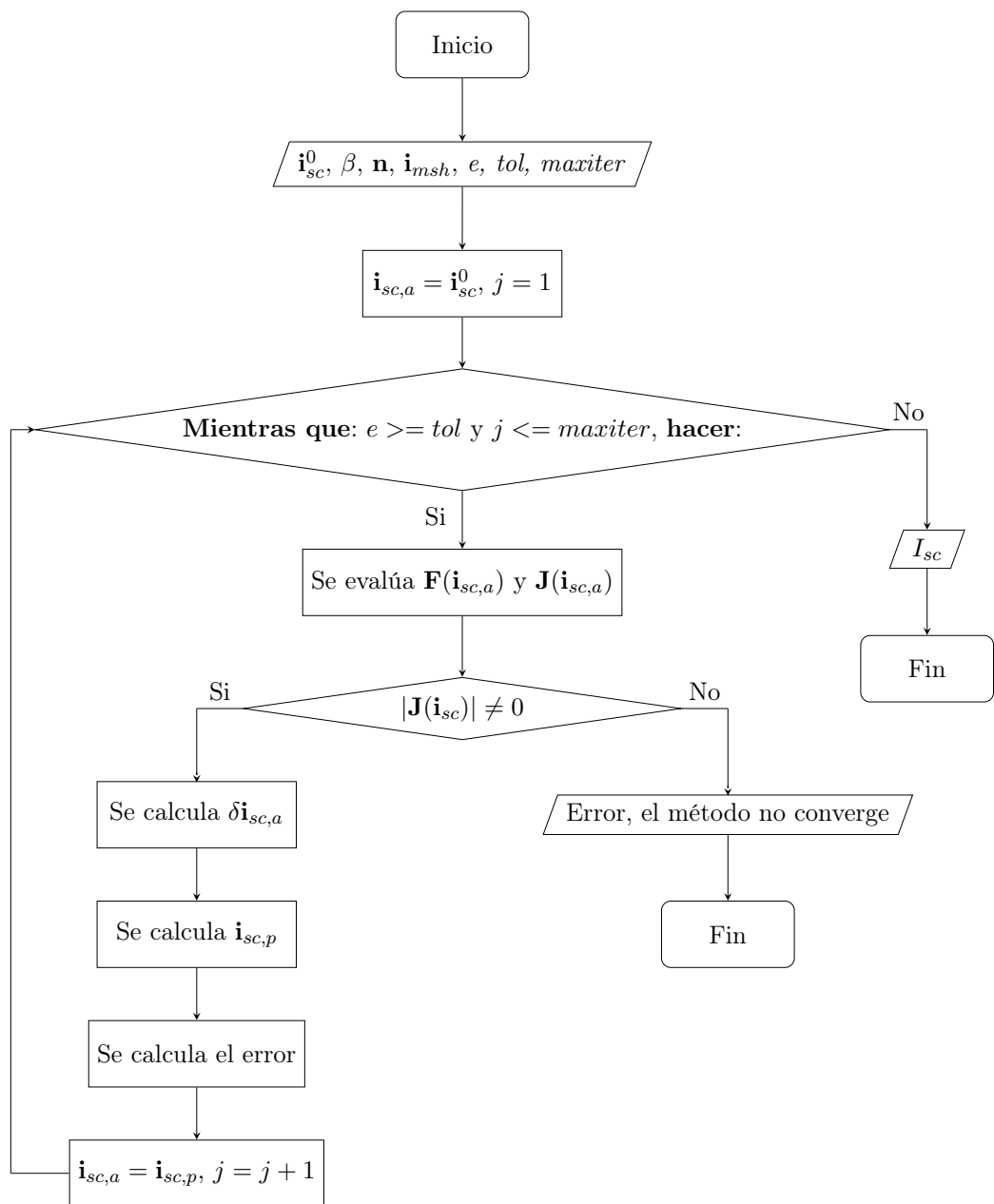


Figura 7.1: Diagrama de bloques del algoritmo de Newton-Raphson multivariable implementado, donde e = error, tol = tolerancia, $maxiter$ = máximo de iteraciones

Apéndice 2

Algoritmo 3 Algoritmo con notación de Matlab para la obtención de las variabilidades de corriente crítica I_c entre cintas del LCFS-R.

Entrada: N_{tp} , $I_{c_{inf}}$, $I_{c_{sup}}$

Salida: \mathbf{I}_c

- 1: **Se calcula:** $\mathbf{I}_c = \text{rng}(\text{semilla}, \text{generador})^*$
 - 2: **Se calcula:** $\Delta I_c = I_{c_{sup}} - I_{c_{inf}}$
 - 3: **Se calcula:** $\mathbf{I}_c = \Delta I_c \cdot \mathbf{I}_c$
 - 4: **Se calcula:** $\mathbf{I}_c = I_{c_{inf}} + \mathbf{I}_c$
 - 5: **devolver** \mathbf{I}_c
-

*La función `rng()` es un generador de números aleatorios. En Matlab los números aleatorios no son impredecibles en absoluto, sino que se generan mediante un algoritmo determinista. El algoritmo está diseñado para ser lo suficientemente complicado como para que su salida parezca una secuencia aleatoria independiente para alguien que no conozca el algoritmo y pueda pasar varias pruebas estadísticas de aleatoriedad. Los argumentos de entrada *semilla* y *generador* determinan el comportamiento de la función. Para mayor detalle sobre la función `rng()` consultar [37].

Bibliografía

- [1] A. Morandi, “State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 484, pp. 242–247, 2013, proceedings of the 24th International Symposium on Superconductivity (ISS2011). [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453412001037> 7, 8, 9
- [2] 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*, vol. 28, no. 2, pp. 978–984, 2013. 7, 11
- [3] G. dos Santos, A. Bitencourt, A. T. Queiroz, F. G. R. Martins, F. Sass, D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, and A. Polasek, “Tests and recovery under load simulations of a novel bifilar resistive SFCL having undulated shape configuration,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 34, no. 4, p. 045009, feb 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abd9b6> ix, 7, 11, 38, 41, 47, 48, 55
- [4] S. S. Kalsi, *Applications of High Temperature Superconductor to Electric Power Equipmet.* John Wiley and Sons, Inc., 2011. 7, 8, 16, 27, 28
- [5] M. Noe and M. Steurer, “High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. R15–R29, jan 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/20/3/r01> 8, 9, 23, 24
- [6] J. J. P. Chávez, “Diseño y simulación de un limitador de corriente de falla superconductor basado en superconductores,” Ph.D. dissertation, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Agosto 2019. x, 8, 9, 10, 15, 18, 20, 25, 27, 34, 35, 36, 38, 57, 58, 77
- [7] Y. Xin, W. Gong, X. Niu, Z. Cao, J. Zhang, B. Tian, H. Xi, Y. Wang, H. Hong, Y. Zhang, B. Hou, and X. Yang, “Development of saturated iron core hts fault current limiters,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 1760–1763, 2007. 9

- [8] V. Meerovich, V. Sokolovsky, S. Goren, A. Kozyrev, V. Osadchy, and E. Hollmann, “Operation of hybrid current limiter based on high-T_c superconducting thin film,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 7, no. 3, pp. 3783–3790, 1997. [10](#)
- [9] T. Yazawa, E. Yoneda, J. Matsuzaki, M. Shimada, T. Kuriyama, S. Nomura, T. Ohkuma, Y. Sato, and Y. Takahashi, “Design and test results of 6.6 kV high-T_c superconducting fault current limiter,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, pp. 2511–2514, 2001. [10](#)
- [10] W. T. B. de Sousa, F. N. F. Dicler, and F. G. d. R. Martins, “Simulations of the Recovery Process of an Air-Coil SFCL,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 1, pp. 1–6, 2016. [x](#), [x](#), [xi](#), [11](#), [41](#), [49](#), [51](#), [52](#), [54](#), [55](#)
- [11] 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*, vol. 25, no. 3, pp. 1–5, 2015. [11](#)
- [12] D. Czerwinski, L. Jaroszynski, T. Janowski, M. Majka, and J. Kozak, “Analysis of Alternating Overcurrent Response of 2G HTS Tape for SFCL,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 3, pp. 1–4, 2014. [12](#)
- [13] W. T. B. de Sousa, “Transient simulations of superconducting fault current limiters,” Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 03 2015. [12](#), [15](#), [16](#), [17](#), [18](#), [19](#), [20](#), [21](#), [22](#), [24](#), [28](#)
- [14] L. C. R. Sully Segura Peña, “Superconductividad,” *In Vestigium Ire*, vol. 1, no. 3, pp. 75–83, jan 2010. [15](#), [17](#)
- [15] A. Singh, “Meissner Effect (1933) Re-Explained by Gill’s Electronic Theory of Magnetism (1964),” *American Research Journal of Physics*, vol. 4, no. 1, pp. 1–14, jan 2018. [16](#)
- [16] M. Cyrot, “Ginzburg-Landau theory for superconductors,” */iop*, vol. 36, no. 2, pp. 103–158, feb 1973. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/36/2/001> [18](#), [19](#)
- [17] A. Hobl, S. Krämer, S. Elschner, C. Jänke, J. Bock, and J. Schramm, “Superconducting fault current limiters — a new tool for the “grid of the future”,” in *CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid*, 2012, pp. 1–4. [20](#)
- [18] 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,” *ArXiv*, vol. abs/1508.01162, 2015. [20](#), [21](#)

-
- [19] S. Nemdili and S. Belkhiat, “Modeling and simulation of resistive superconducting fault-current limiters,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 25, no. 10, 2012. 21
- [20] A. F. Robertson and D. Gross, “An electrical-analog method for transient heat-flow analysis,” *Journal of research of the national bureau of standards*, vol. 61, no. 2, pp. 105–115, 1958. 21, 36
- [21] W. P. Distribution. (2021, nov) Flexdgrid: Advanced fault level management (birmingham). [Online]. Available: https://www-westernpower-co-uk.translate.google/projects/flexdgrid?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es-419&_x_tr_pto=nui,sc 22
- [22] N. M. Daniel Hardman, *Installation and Open-Loop Tests of Fault Level Mitigation Equipment*, 0th ed., Western Power Distribution, WPDT2004 - FlexDGrid, dec 2016. ix, 22
- [23] S. Elschner, A. Kudymow, J. Brand, S. Fink, W. Goldacker, F. Grilli, M. Noe, M. Vojenciak, A. Hobl, M. Bludau, C. Jänke, S. Krämer, and J. Bock, “EnsyStrob – design, manufacturing and test of a 3-phase resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application,” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 482, pp. 98–104, 2012, 2011 Centennial superconductivity conference – EUCAS–ISEC–ICMC. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453412002134> ix, 22, 23
- [24] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, and A. Hobl, “Ampacity project — worldwide first superconducting cable and fault current limiter installation in a german city center,” in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4. 23
- [25] A. D. C. Ibarra Velazquez, “Investigación teórico experimental de los efectos de la superconductividad y sus aplicaciones en la industria,” Ph.D. dissertation, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Culhuacán, 2012. [Online]. Available: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/9971> 24
- [26] “Bi-2223 superconducting wire.” [Online]. Available: <https://sumitomoelectric.com/super/wire> ix, 24
- [27] “2G HTS Wire Specification.” [Online]. Available: <https://www.superpower-inc.com/specification.aspx> ix, 24, 58, 59
- [28] D. Kim, J. Cho, K. Shim, S. Lee, S. Choi, and K.-N. Lee, “Uncertainty evaluation for dc critical current determined by using power-law fit to current–voltage curve applicable to superconducting wires and power cables,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 24, pp. 969–974, 01 2011. 29
-

BIBLIOGRAFÍA

- [29] 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*, vol. 17, no. 2, pp. 1839–1842, 2007. 29
- [30] C. M. Rey, R. C. Duckworth, and Y. Zhang, “Splice resistance measurements on 2g ybco coated conductors,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 2317–2320, 2009. 31
- [31] V. M. Foresi, *Introducción a los Métodos numéricos*. Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea, Departamento de Matemática Aplicada y Estadística e Investigación Operativa, 2011. 33, 34
- [32] NIST. National Institute of Standard Cryogenic Technology Resources. [Online]. Available: <https://trc.nist.gov/cryogenics/> 36, 48, 54
- [33] S. Chapra, *Applied Numerical Methods with Matlab for Engineers and Scientists*. Mc Grw Hill, 2012. 36
- [34] B. Baudony, *Heat transfer and cooling techniques at low temperature*. CAS-CERN Accelerator School: Superconductivity for Accelerators - Proceedings, 2015. 38
- [35] O. Naeckel and M. Noe, “Design and Test of an Air Coil Superconducting Fault Current Limiter Demonstrator,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 3, pp. 1–5, 2014. 49
- [36] S. Hajdasz, A. Kempinski, and J. Rusinski, “Study of HTS 2G superconductor tapes properties for applications in SFCL,” in *2018 Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering (i-MITEL)*, 2018, pp. 1–6. 59
- [37] *MATLAB version 9.9.0.1718557 (R2020b) Update 6*, The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, 2020. 59, 83