



Filipe Miguel França Saldanha do Vale

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Desenvolvimento de um dispositivo de medida
para determinação dos esforços eletromecânicos
em limitadores de corrente supercondutores**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadora: Anabela Gonçalves Pronto, Professora Doutora,
FCT-UNL

Co-orientador: Nuno Vilhena, Mestre, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Desenvolvimento de um dispositivo de medida para determinação dos esforços eletromecânicos em limitadores de corrente supercondutores

Copyright © Filipe Miguel França Saldanha do Vale, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais, que merecem o mundo,

Aos meus familiares,

Aos meus amigos, que são a família que escolhi.

AGRADECIMENTOS

É nos agradecimentos, a única parte da dissertação mais informal e desprovida de rigor científico, que me reservo o direito de dizer tudo o que tenho vontade nesta fase final de uma etapa com tantos altos e baixos e que dou, com este documento, por encerrada.

Gostaria, primeiramente, de deixar um cálido agradecimento à minha orientadora, a Professora Doutora Anabela Pronto – não só pela eterna disponibilidade, como por todo o conhecimento compartilhado ao longo destes anos de licenciatura e mestrado. É notório que é uma pessoa que gosta de ensinar e isso transparece em todas as aulas que dá e em todas as dúvidas que, sempre que é necessário, tem todo o prazer em tirar.

Em seguida, importa agradecer ao Engenheiro Nuno Vilhena, meu co-orientador. Sem ele, todo este processo teria sido muito mais moroso e complicado. A sua inteligência e paciência para resolver todos os problemas que foram surgindo ao longo do processo, bem como a sua boa disposição e amizade fizeram com que esta tese fosse bastante mais fácil e agradável de desenvolver. Um verdadeiro obrigado.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia, pelo acolhimento, formação e por todas as condições disponibilizadas para a realização da presente dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica pelas condições de trabalho e, mais ainda, por ter sido o lugar onde conheci tantas pessoas incríveis ao longo destes anos.

Aos meus colegas do laboratório de supercondutividade, e em particular à Adriana, pelos momentos de descontração e boa disposição nas (raras, ou às vezes nem tanto) pausas do trabalho e pelo conhecimento partilhado.

Ao Pedro Leiria, eterno companheiro desta e de outras batalhas, a pessoa mais parecida comigo que conheço em muitas matérias e que sempre me apoiou durante esta etapa e em vários aspetos da minha vida. Que este seja, para nós, o final de uma etapa e o início de outra em que esta amizade se mantenha.

Ao João Duarte, Jodu, que me surpreendeu por ser uma pessoa surpreendentemente bem disposta e capaz de animar qualquer dia mais complicado. Pela amizade que construímos durante esta jornada e que espero que se mantenha durante longos e bons anos.

A todos os bons amigos que fiz nesta faculdade, pela convivência e cumplicidade que se criou durante todas as maratonas de estudo e em todas as festas e convívios. Gostaria de os nomear a todos, mas esquecer-me-ia sempre de alguém por serem tantos. A estes, um enorme agradecimento.

Ao meu grupo de amigos mais chegado, com quem sempre contei para todos os momentos de descontração, desabafo e muita diversão. Levo-vos comigo até ao final da vida pelas pessoas extraordinárias que são e por tudo o que já vivemos e ainda vamos viver juntos. Temos de ir celebrar isto, pessoal!

À Mary Jane, incansável na sua missão de ser consistentemente uma prima incrível. Pela amizade sólida que sempre tivemos e tem vindo a crescer ainda mais e por todas as ajudas, conselhos e pequenas cumplicidades.

Aos meus familiares, que sempre acreditaram no meu potencial e na minha capacidade de superar todos os obstáculos que me fossem impostos.

Por último, mas não menos importante, reservo um enorme agradecimento aos meus pais, que nunca deixaram que me faltasse nada e a quem devo tudo o que tenho e tudo o que sou. Foi graças a vocês que tive a oportunidade de tirar o curso superior que hoje termino. Por tudo o que me ensinaram e que me fez ser sempre uma pessoa melhor e um ser humano mais íntegro. Esta dissertação é-vos dedicada. Amo-vos.

A todos, e por tudo, um enorme obrigado.

RESUMO

O constante incremento da procura de energia elétrica obriga a uma mudança de paradigma no que à geração diz respeito. Por este motivo, verifica-se um aumento da geração distribuída, por oposição à geração centralizada. Maior procura traduz-se em mais dispositivos e maior consumo, o que acaba por poder originar maiores correntes de curto-circuito a precisar de serem limitadas.

A supercondutividade e, subseqüentemente, os limitadores de correntes de defeito supercondutores (LCDS), apresentam uma solução viável para minimizar as correntes de curto-circuito e os danos a dispositivos de potência que daí advêm. Porém, são escassos os estudos acerca dos esforços eletromecânicos que afetam os enrolamentos supercondutores destes equipamentos. É pertinente averiguar se as tensões mecânicas que atingem as fitas são, ou não, passíveis de as danificar ou comprometer a sua integridade estrutural.

Face ao exposto, pretende-se com esta dissertação construir um dispositivo de medida que, recorrendo a técnicas de extensometria e a algum pós-processamento, seja capaz de quantificar as tensões mecânicas radiais e axiais que se manifestam nos enrolamentos supercondutores de virtualmente qualquer dispositivo de potência do género.

Posteriormente, e utilizando o dispositivo construído, estudar-se-ão os efeitos destas forças em apenas dois limitadores de correntes de defeito supercondutores indutivos do tipo transformador: um trifásico e um monofásico, ambos em diversas configurações.

Palavras-chave: Supercondutores, Limitador de Correntes de Defeito Supercondutor, Extensometria, Esforços Eletromecânicos, Tensões Mecânicas, YBCO

ABSTRACT

The consistent increment in the demand for electric energy is forcing a paradigm change regarding power generation. For this reason, distributed generation – as opposed to centralized generation – is increasing. More demand means more devices and more consumption, which ends up originating larger fault currents needing limitation.

Superconductivity and, subsequently, superconducting fault-current limiters (SCFL), represent a viable solution to minimize these fault currents and the damages caused to power devices that accrue from them. Nevertheless, studies about electromechanical stresses in superconducting tapes in this type of limiter are scarce. Therefore, it is pertinent to ascertain if the mechanical stresses affecting the tapes are – or are not – capable of damaging them or compromising their structural integrity.

On the basis of the foregoing considerations, the idea of this thesis is to construct a measuring device that, invoking experimental analysis of strains by means of strain gauges and some post-processing, is capable of quantifying the mechanical stress – both axial and radial – that affect the superconducting tapes of virtually any power device of the kind.

Afterwards, and using the built device, we will study the consequences of these forces in only two inductive superconducting fault current limiters of the transformer type: one three-phase and one single-phase, both of them in several distinct configurations.

Keywords: Electromechanical Strain, Mechanical Stress, Strain Gauges, Superconducting Fault-Current Limiters, Superconductors, YBCO

ÍNDICE

Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxi
Notações	xxiii
Siglas e Abreviaturas	xxvii
1 Introdução	1
1.1 Introdução e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 Fundamentação Teórica	5
2.1 Supercondutividade	5
2.1.1 Enquadramento histórico	5
2.1.2 Propriedades macroscópicas dos materiais supercondutores	8
2.1.2.1 Resistividade Nula	8
2.1.2.2 Diamagnetismo Perfeito	9
2.1.3 Tipos de supercondutores	10
2.1.3.1 Supercondutores do tipo I	10
2.1.3.2 Supercondutores do tipo II	11
2.2 Limitadores de correntes de defeito supercondutores	12
2.2.1 Introdução	12
2.2.2 Características de um LCDS	13
2.2.3 Limitadores de correntes de defeito supercondutores indutivos do tipo transformador	15
2.3 Esforços eletromecânicos em LCDS e outros dispositivos de potência . . .	17
2.3.1 Esforços em enrolamentos	17
2.3.2 Tipos de falhas mecânicas nos enrolamentos	20
2.3.2.1 Falhas por ação de forças radiais	21
2.3.2.2 Falhas por ação de forças axiais	24
2.4 Extensometria	28

2.4.1	Conceitos teóricos	28
2.4.2	Escolha dos extensômetros a utilizar em função dos modelos existentes	32
3	Desenvolvimento do Medidor, Processamento de Sinais e Montagem Experimental	37
3.1	Aquisição de dados e condicionamento de sinal	38
3.1.1	Circuito oscilador	40
3.1.2	Bobinas de Rogowski e respetivo circuito de leitura	41
3.1.3	Circuito para condicionamento de sinal	42
3.1.3.1	Compensação de temperatura	42
3.1.3.2	Compensação de variação da resistência	43
3.1.3.3	Blocos 1 e 2 do circuito de condicionamento de sinal	44
3.2	Processo de fabrico das placas de circuito impresso (PCB)	47
3.3	Pós-processamento dos sinais correspondentes aos esforços mecânicos nas fitas supercondutoras	49
3.4	Preparação dos extensômetros e das fitas supercondutoras	50
3.5	Montagem para o ensaio do LCDS	51
3.5.1	Dimensionamento das resistências de carga	53
3.5.2	LCDS	53
4	Medições, análise e discussão de resultados	57
4.1	Simulações pelo Método dos Elementos Finitos	57
4.2	Procedimento experimental	59
4.3	Configurações utilizadas nos ensaios laboratoriais	60
4.4	Resultados e análise dos esforços eletromecânicos nas fitas supercondutoras	61
4.4.1	Limitador de correntes de defeito supercondutor trifásico	61
4.4.1.1	Curto-circuito da fase B à terra com ambos os núcleos	62
4.4.1.2	Curto-circuito das fases B e C à terra com ambos os núcleos	66
4.4.1.3	Curto-circuito das três fases à terra com ambos os núcleos	68
4.4.2	Limitador de correntes de defeito supercondutor monofásico	70
4.4.2.1	Curto-circuito fase-terra com uma espira supercondutora no secundário – configuração (a)	71
4.4.2.2	Curto-circuito fase-terra com duas espiras supercondutoras distribuídas axialmente no secundário – configuração (b)	73
4.4.2.3	Curto-circuito fase-terra com duas espiras supercondutoras concêntricas no secundário – configuração (c)	75
4.4.2.4	Estudo comparativo	77
4.5	Síntese de capítulo	78
5	Conclusões e Trabalho Futuro	81

5.1	Conclusões finais	81
5.2	Trabalho futuro	82
	Bibliografia	85

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Heike Kamerlingh Onnes e o seu mentor, Johannes Diderik van der Waals	6
2.2	Curva da temperatura em função da resistência elétrica (Hg)	6
2.3	Espaço de fases de um supercondutor	7
2.4	Diagrama temporal representativo dos feitos e descobertas mais importantes no âmbito da supercondutividade	8
2.5	Comparação entre supercondutor e condutor perfeito quando arrefecidos em campo nulo ou na presença de campo.	10
2.6	Diagrama H_c vs T para os supercondutores tipo I	11
2.7	Diagrama H_c vs T para os supercondutores tipo II	11
2.8	Classificação dos limitadores de corrente supercondutores	13
2.9	Comportamento da corrente na linha com LCDS	14
2.10	Localizações possíveis para um LCD num SEE	15
2.11	Campos de indução e forças radiais e axiais na janela de um transformador de enrolamentos concêntricos	18
2.12	Representação gráfica das densidades descritas na equação 2.7	19
2.13	Sentido das correntes nos enrolamentos e forças nos enrolamentos	19
2.14	Diversas forças exercidas num anel supercondutor	20
2.15	Secção transversal dos enrolamentos de um transformador, distribuição de campo de indução axial e forças radiais	21
2.16	Forças nos enrolamentos; esforços de tração no enrolamento externo e esforços compressivos no enrolamento interno	21
2.17	Forças radiais devido a campo axial	23
2.18	Exemplo de transformador danificado por ação de <i>forced buckling</i>	23
2.19	Exemplos de transformadores danificados por ação de <i>free buckling</i>	24
2.20	Distribuição de forças locais e cumulativas ao longo da altura do enrolamento	25
2.21	Deslocamento dos enrolamentos e forças induzidas	26
2.22	Flexão dos condutores entre os espaçadores radiais – <i>bending</i>	27
2.23	Situação real de flexão dos condutores entre os espaçadores radiais – <i>bending</i>	27
2.24	Deformação do tipo <i>tilting</i> por ação de forças axiais devido a campo radial	27
2.25	Situação real de inclinação dos condutores – <i>tilting</i>	28
2.26	Deformação mecânica quando aplicada uma força	29
2.27	Deformações mecânicas em caso de tração (a) ou compressão (b)	29

2.28	Característica mecânica de um material e suas regiões de funcionamento . . .	32
2.29	Figura ilustrativa da planta e do corte transversal de um extensómetro	33
2.30	Ponte de Wheatstone comum	34
2.31	Ponte de Wheatstone em configuração <i>Quarter-Bridge</i>	35
3.1	Conversor AC-DC da <i>TRACOPOWER</i>	38
3.2	Placa de aquisição de dados NI USB-6001	39
3.3	Esquema elétrico do circuito oscilador baseado numa Ponte de Wien	40
3.4	Bobina de Rogowski utilizada numa das fitas SAT	41
3.5	Montagem laboratorial para calibração das bobinas de Rogowski	41
3.6	Montagem utilizada para a calibração das bobinas de Rogowski	42
3.7	Ponte de Wheatstone em configuração Meia-Ponte	43
3.8	Bloco 1 do circuito de aquisição de dados	44
3.9	Esquema elétrico do circuito de ligação do AD8221	45
3.10	Formas de onda antes e depois da retificação de onda completa	46
3.11	Bloco 2 do circuito de aquisição de dados	46
3.12	Esquema elétrico do circuito de aquisição de dados completo	47
3.13	Várias fases da corrosão do cobre da PCB das pontes de Wheatstone	48
3.14	PCB de aquisição de dados depois do processo de <i>etching</i> e antes da colocação dos componentes	48
3.15	PCB's depois do processo de <i>etching</i> e após a colocação dos componentes . . .	49
3.16	Adesivo CC-33A utilizado para colar os extensómetros aos enrolamentos supercondutores	51
3.17	Montagem utilizada para o ensaio do LCDST	52
3.18	Limitador de correntes de defeito supercondutor trifásico indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios	54
3.19	Limitador de correntes de defeito supercondutor monofásico indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios	55
4.1	Modelo de simulação do LCDS indutivo monofásico do tipo transformador em regime de operação normal	57
4.2	Modelo de simulação do LCDS indutivo monofásico em regime de falha	58
4.3	Topologias dos núcleos utilizados nos ensaios do LCDST	60
4.4	Travessas do LCDST	60
4.5	Configurações utilizadas nos ensaios do LCDS monofásico	61
4.6	Esquema elétrico do ensaio de um curto-circuito fase-terra no LCDST	62
4.7	Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fase B - Terra com o núcleo tradicional	64
4.8	Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fase B - Terra com o núcleo <i>shell</i>	64
4.9	Esquema elétrico do ensaio de um curto-circuito fase-fase-terra no LCDST . .	66

4.10	Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fases B e C - Terra com o núcleo tradicional	66
4.11	Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fases B e C - Terra com o núcleo <i>shell</i>	67
4.12	Esquema elétrico do ensaio de um curto-circuito das três fases à terra no LCDST	68
4.13	Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito das três fases à terra com o núcleo tradicional	69
4.14	Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito trifásico com o núcleo <i>shell</i>	69
4.15	Esquema elétrico do ensaio do LCDS monofásico	71
4.16	Diagrama ilustrativo da configuração (a) utilizada nos ensaios do LCDS monofásico	71
4.17	Corrente e tensões mecânicas na fita supercondutora durante um curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com uma espira SAT (configuração (a))	72
4.18	Corrente de linha durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com uma só espira SAT (configuração (a))	72
4.19	Diagrama ilustrativo da configuração (b) utilizada nos ensaios do LCDS monofásico	73
4.20	Corrente e tensões mecânicas na fita supercondutora durante um curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT distribuídas axialmente (configuração (b))	74
4.21	Corrente de linha durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT distribuídas axialmente (configuração (b))	74
4.22	Forças de Lorentz no eixo axial das espiras SAT 1 e 2 (configuração (b))	75
4.23	Diagrama ilustrativo da configuração (c) utilizada nos ensaios do LCDS monofásico	76
4.24	Corrente e tensões mecânicas na fita supercondutora durante um curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT dispostas de maneira concêntrica (configuração (c))	76
4.25	Corrente de linha durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT distribuídas axialmente (configuração (c))	77

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Comparação de algumas propriedades das fitas supercondutoras 1G e 2G . . .	12
2.2	Vantagens e desvantagens de um LCDS indutivo do tipo transformador . . .	16
3.1	Grandezas adquiridas pela placa de aquisição de dados	39
4.1	Valores utilizados nas simulações pelo método dos elementos finitos	58
4.2	Valores recolhidos em ambos os núcleos durante o curto-circuito da fase B à terra no LCDST	65
4.3	Valores recolhidos em ambos os núcleos durante o curto-circuito das fases B e C à terra no LCDST	67
4.4	Valores recolhidos em ambos os núcleos durante o curto-circuito das três fases à terra no LCDST	70
4.5	Valores recolhidos durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico nas três configurações ensaiadas	78

NOTAÇÕES

χ_m	Susceptibilidade magnética
ε	Deformação mecânica
σ	Tensão mecânica [Pa]
ΔL	Alongamento de um material [m]
μ_0	Permeabilidade magnética do vázio ($4\pi \times 10^{-7}$ [H·m ⁻¹])
ε_1	Deformação mecânica longitudinal
ε_2	Deformação mecânica transversal
σ_{forced}	Valor crítico de uma deformação do tipo <i>forced buckling</i> [N·m ⁻²]
σ_{free}	Valor crítico de uma deformação do tipo <i>free buckling</i> [N·m ⁻²]
σ_{med}	Tensão mecânica média imposta num enrolamento [N·m ⁻²]
σ_x	Tensão mecânica axial [Pa]
ε_x	Deformação mecânica no eixo axial
σ_y	Tensão mecânica radial [Pa]
ε_y	Deformação mecânica no eixo radial
B	Densidade de fluxo magnético ou campo de indução [T]
B_a	Campo de indução axial [T]
B_c	Densidade de fluxo magnético crítica ou campo de indução crítica [T]
B_r	Campo de indução radial [T]
D_m	Diâmetro médio de uma espira [m]
$E(\delta)$	Módulo de elasticidade incremental no valor crítico [N·m ⁻²]
E_y	Coefficiente de elasticidade de um material ou Módulo de Young [Pa]
$E_{sp_{axial}}$	Módulo de elasticidade incremental no valor crítico [Pa]
F	Vetor força [N]
F_a	Força axial [N]
F_r	Força radial [N]
G_1	Ganho do amplificador do bloco 1
G_2	Ganho do amplificador do bloco 2
G_{osc}	Ganho do amplificador operacional do circuito oscilador
H	Campo magnético [A·m ⁻¹]

NOTAÇÕES

H_c	Campo magnético crítico [$A \cdot m^{-1}$]
H_{c1}	Campo magnético crítico inferior [$A \cdot m^{-1}$]
H_{c2}	Campo magnético crítico superior [$A \cdot m^{-1}$]
I	Corrente elétrica [A]
I_N	Corrente nominal [A]
I_p	Corrente no enrolamento primário [A]
I_s	Corrente no enrolamento secundário [A]
J	Densidade de corrente [$A \cdot m^{-2}$]
J_c	Densidade de corrente crítica [$A \cdot m^{-2}$]
K	Fator de sensibilidade de um extensómetro
L	Comprimento original de um material [m]
L_a	Distância entre separadores axiais [m]
M	Vetor magnetização [$A \cdot m^{-1}$]
N_3	Número de espiras do enrolamento para leitura do fluxo no LCDS
N_p	Número de espiras do enrolamento primário
N_s	Número de espiras do enrolamento secundário
R	Resistência elétrica [Ω]
R_{AUX}	Resistência auxiliar para acerto da ponte de Wheatstone [Ω]
R_C	Resistência de carga [Ω]
R_{EXT1}	Resistência representativa do extensómetro ativo [Ω]
R_{EXT2}	Resistência representativa do extensómetro passivo de compensação de temperatura [Ω]
R_G	Resistência de ganho do AD8221 [Ω]
R_{POT}	Potenciómetro para acerto da ponte de Wheatstone [Ω]
S_e	Secção transversal de um condutor [m^2]
T	Temperatura [K]
T_c	Temperatura crítica de um material supercondutor [K]
U_{in}	Tensão imposta pelo autotransformador [V]
V_A	Nó positivo da ponte de Wheatstone [V]
V_B	Nó negativo da ponte de Wheatstone [V]
V_{ef}	Tensão eficaz [V]
V_{in}	Tensão de excitação da ponte de Wheatstone [V]
V_o	Tensão de saída da ponte de Wheatstone [V]
V_p	Tensão de pico antes da retificação de onda completa [V]
V_{rect}	Tensão após a retificação de onda completa [V]
c	Módulo de elasticidade do material isolante [Pa]
f	Densidade volumétrica de força magnética [$N \cdot m^{-3}$]

f_{osc}	Frequência de oscilação do circuito oscilador [Hz]
h	Altura de um enrolamento [m]
l	Comprimento de um fio condutor [m]
m	Número de cunhas num transformador
r	Raio de um enrolamento [m]
s	Número de espaçadores num transformador
ν	Coefficiente de Poisson [Pa]

SIGLAS E ABREVIATURAS

1G	Fita supercondutora de primeira geração
2G	Fita supercondutora de segunda geração
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
AC	<i>Alternating Current</i> ou corrente alternada
ACN	Arrefecido em campo nulo
APC	Arrefecido em presença de campo
AT	Alta tensão (tensão composta de valor superior a 45 kV e inferior a 110 kV)
BSCCO	Designação genérica dos supercondutores de composição química $Bi_2Sr_2Ca_nCu_{n+1}O_{6+2n}$
CMRR	<i>Common-mode rejection ratio</i>
DC	<i>Direct Current</i> ou corrente contínua
f.m.m.	Força magnetomotriz [A.e]
FEM	<i>Finite element method</i> ou método dos elementos finitos
LCDS	Limitador de correntes de defeito supercondutor
LCDST	Limitador de correntes de defeito supercondutor trifásico
MAT	Alta tensão (tensão composta de valor superior a 115 kV)
MT	Média tensão (tensão composta de valor superior a 1 kV e inferior a 45 kV)
PCB	<i>Printed circuit board</i> ou placa de circuito impresso
SAT	Supercondutor de alta temperatura

SIGLAS E ABREVIATURAS

SBT	Supercondutor de baixa temperatura
SC	Supercondutor(es)
SEE	Sistema de energia elétrica
SSR	<i>Solid state relay</i> ou relé de estado sólido
T.M.	Tensão mecânica [Pa]
YBCO	Designação genérica dos supercondutores de composição química $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, onde δ é o conteúdo de oxigénio

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e Motivação

O paradigma da sociedade atual aponta para uma dependência cada vez maior da energia elétrica, pelo que tanto a geração como o consumo têm vindo a aumentar substancialmente, sem perspectivas de uma inversão nesta tendência. Este crescimento acarreta algumas preocupações, tais como garantir que tanto a produção como a distribuição continuam a operar ininterruptamente sem elevar o preço da eletricidade. Foram implementadas as mais diversas soluções, como é o caso das fontes de energia renovável. Por sua vez, estas e outras soluções originam redes mais complexas; assim, surge a necessidade de reforçar o sistema de energia elétrica de modo a garantir segurança e fiabilidade.

Estas redes, cujo cariz cada vez mais complexo se deve à introdução de novos equipamentos de geração e dispositivos de potência, vêm os seus equipamentos sujeitos a falhas e às correntes de curto-circuito que as acompanham. Assim, é importante garantir a limitação das mesmas para evitar danos ou a total destruição desses componentes.

Com a descoberta dos supercondutores, surgiu uma solução viável para eliminar estas correntes de defeito e minimizar os seus impactos no sistema energético: o limitador de correntes de defeito supercondutor – LCDS. No caso da presente dissertação, serão ensaiados dois limitadores de corrente indutivos do tipo transformador. Os LCDS apresentam, em regime normal, um valor de impedância virtualmente nulo, pelo que são "invisíveis" para a rede. Por outro lado, em situação de falha, a corrente na linha excede o valor crítico da corrente no material, as fitas supercondutoras saturam e passa a existir fluxo magnético no núcleo do LCDS, o que resulta na adição de uma impedância à rede e consequente limitação das correntes de defeito.

Os enrolamentos supercondutores dos limitadores de correntes de defeito estão sujeitos a esforços eletromecânicos passíveis de os deteriorar e/ou danificar; são esses esforços

que se pretende caracterizar e quantificar ao longo desta dissertação, com o objetivo de aperfeiçoar estes dispositivos de potência. Assim, e recorrendo a técnicas de extensometria, pretende estudar-se os impactos destes esforços eletromecânicos em LCDS trifásicos – visto que estes são de maior relevância em aplicações de energia, possibilitando previsões fundamentais do desempenho dinâmico destes equipamentos quando instalados em redes elétricas.

1.2 Objetivos

Pretende-se, no decurso desta dissertação, atingir um conjunto de objetivos que se vai passar a enumerar:

- Construir um dispositivo de medida para determinação dos esforços eletromecânicos em limitadores de corrente supercondutores que seja preciso, consistente e viável;
- Realizar ensaios laboratoriais para quantificar os esforços, tanto axiais como radiais, a que as fitas supercondutoras estão sujeitas em situação de falha;
- Efetuar o estudo comparativo entre os vários ensaios realizados em laboratório;
- Analisar os resultados e formular todas as conclusões pertinentes;

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação compõe-se de cinco capítulos, todos eles essenciais à compreensão dos conceitos aqui tratados e do trabalho desenvolvido.

O capítulo introdutório pretende sumarizar os objetivos e a motivação deste trabalho. Descreve-se as razões que levam esta dissertação a ser pertinente e quais os problemas que a mesma vem resolver, bem como os principais objetivos que se pretende atingir.

De seguida tem-se um segundo capítulo, a fundamentação teórica, ao longo do qual se disserta acerca de todos os conceitos teóricos relevantes para o correto entendimento do trabalho a realizar.

Por sua vez, o terceiro remete para o desenvolvimento do medidor, o processamento de sinais e a montagem experimental. É neste capítulo que se aborda a metodologia utilizada com o intuito de desenvolver a componente prática deste trabalho. É detalhado todo o processo teórico e laboratorial que conduziu à obtenção dos resultados.

O quarto capítulo contempla as medições, análise e discussão de resultados – é aqui que se faz as comparações que se considerou oportunas entre todos os valores obtidos a partir dos diversos ensaios realizados em laboratório. Numa fase posterior, tira-se as respetivas ilações.

Por fim, apresentam-se no quinto e último capítulo todas as conclusões e considerações finais que se considerou relevantes, além de algumas propostas de trabalhos futuros que seria interessante desenvolver.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Efetuar-se-á, no decurso desta fundamentação teórica, um levantamento bibliográfico dos seguintes temas: propriedades dos materiais supercondutores, esforços electromecânicos em enrolamentos, diferentes tipos de deformações que lhes são inerentes e, finalmente, a componente de extensometria. Será ainda apresentado um sumário das metodologias de cálculo das forças electrodinâmicas em enrolamentos.

2.1 Supercondutividade

2.1.1 Enquadramento histórico

Foi em 1911 que se verificou pela primeira vez aquilo que hoje em dia se conhece como sendo o fenómeno da supercondutividade. A publicação em que se refere o comportamento supercondutor – conceito desconhecido até então – é da autoria de Heike Kamerlingh Onnes, um professor holandês de Física experimental na Universidade de Leiden (Figura 2.1). Onnes relatou a passagem do mercúrio a um estado em que o seu valor de resistividade decrescia repentinamente até zero, quando mantido abaixo de uma determinada temperatura (4,2 K, ver Figura 2.2).

A supercondutividade é o fenómeno físico que consiste na redução da resistividade elétrica de um material condutor para valores desprezáveis, próximos do zero, quando sujeito a temperaturas muito reduzidas. Isto permite a circulação e conservação de corrente num condutor sem a existência de perdas por efeito de Joule.



Figura 2.1: Onnes (à esquerda) e o seu mentor, Johannes Diderik van der Waals, com o dispositivo utilizado para liquefazer hélio (retirado de [1])

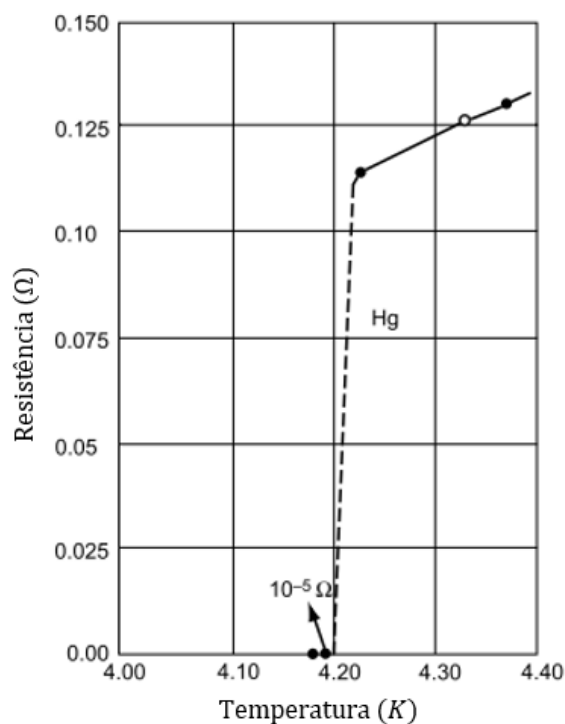


Figura 2.2: Curva da temperatura (K) em função da resistência (Ω) para uma amostra de mercúrio, segundo Heike Kamerlingh Onnes (adaptado de [2])

A temperatura crítica T_c é o ponto de separação que divide a zona em que um material possui propriedades supercondutoras da zona em que apresenta caráter resistivo – caso $T < T_c$, a resistência do material desaparece de maneira abrupta; caso contrário, o material está no seu estado normal (ou resistivo). A constatação, por parte de Onnes, de que a resistência do mercúrio desaparecia abruptamente abaixo de uma temperatura crítica, T_c , foi um feito notável.

Nos anos que se seguiram, Kamerlingh Onnes descobriu ainda dois outros parâmetros passíveis de influenciar o estado supercondutor de um material. São eles a densidade de corrente crítica, J_c , que aumenta com a diminuição valor de temperatura a que se opera; e o campo crítico H_c . A densidade de corrente crítica designa o valor máximo de corrente que o material supercondutor é capaz de suportar sem entrar no estado normal ou no estado misto – conceito que será abordado no decorrer deste capítulo, apesar de não existir no mercúrio. Por sua vez, o campo crítico H_c é o valor de campo magnético que anula as propriedades supercondutoras de um material. A zona de operação dos materiais SC está descrita na Figura 2.3 abaixo.

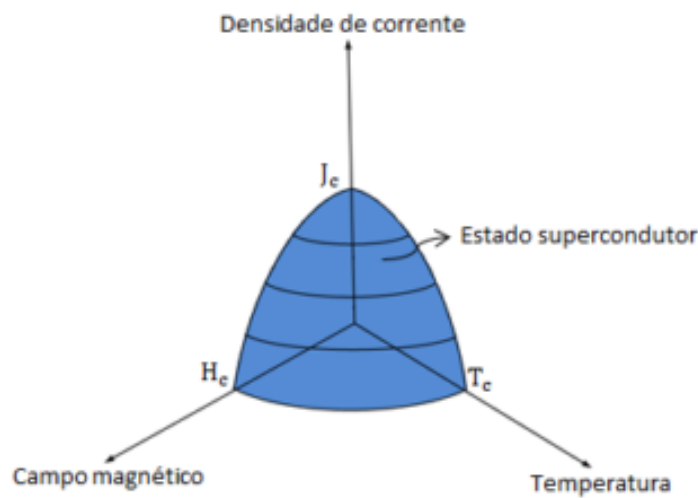


Figura 2.3: Espaço de fases de um supercondutor (retirado de [3])

De notar que qualquer uma destas grandezas, uma vez ultrapassado o seu valor crítico, é passível de gerar energia suficiente para fazer com que o material perca o seu estado supercondutor – entrando no estado normal ou no estado misto, que será caracterizado mais adiante. Assim, basta que uma das condições descritas no sistema (2.1) não se verifique para que o material perca as suas propriedades supercondutoras.

$$\begin{cases} J < J_c \\ H < H_c \\ T < T_c \end{cases} \quad (2.1)$$

Apresenta-se na Figura 2.4 uma cronologia que ilustra os feitos e descobertas mais importantes no âmbito da supercondutividade.

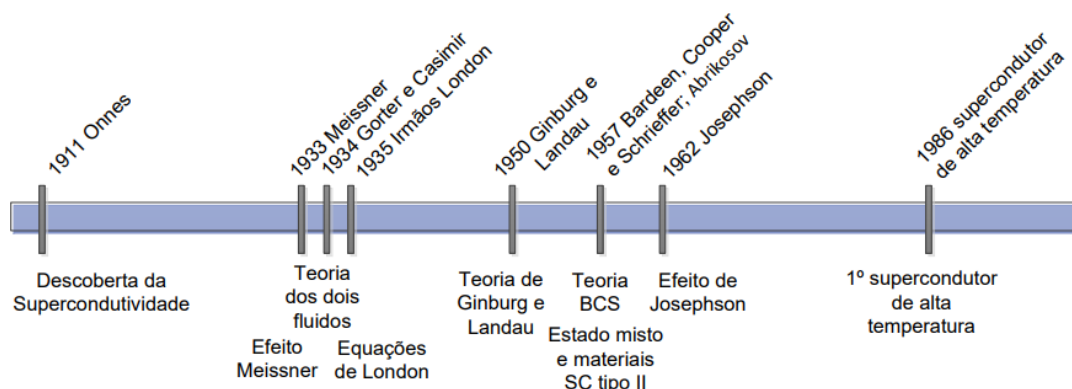


Figura 2.4: Diagrama temporal representativo dos feitos e descobertas mais importantes no âmbito da supercondutividade (retirado de [4])

2.1.2 Propriedades macroscópicas dos materiais supercondutores

A supercondutividade tem algumas propriedades macroscópicas que lhe são intrínsecas e caracterizam o estado, nomeadamente a ausência de resistividade (propriedade elétrica) e o diamagnetismo perfeito (propriedade magnética, também designada por efeito Meissner em homenagem a um dos cientistas que verificaram esta característica pela primeira vez). Ambas estas propriedades serão exploradas mais detalhadamente em seguida.

2.1.2.1 Resistividade Nula

Como se referiu anteriormente, uma das propriedades que caracteriza um supercondutor é a resistividade nula. Esta ausência de resistividade faz com que não haja energia dissipada no material SC, o que por sua vez resulta na eliminação das perdas em regime DC. Por outro lado, em regime AC registam-se valores residuais de perdas e resistividade no material supercondutor [3].

Qualquer corrente AC ou campo magnético variável aplicados a um supercondutor resultam inevitavelmente em perdas por efeito de Joule no mesmo. À temperatura de 4,2 K (temperatura do hélio liquefeito), e segundo a teoria do ciclo de Carnot, 1 W de calor dissipado requereria pelo menos 70 W de potência de refrigeração para a sua remoção. Este valor acaba muitas vezes por, na prática, se traduzir em centenas de Watt. Isto deve-se ao facto de as máquinas térmicas não serem, na prática, tão eficientes como a máquina de Carnot por ação de fugas de calor, ou por via da transformação de energia cinética em calor devido ao atrito [5].

Por outro lado, à temperatura do azoto líquido (77 K), a potência de refrigeração necessária decresce por um fator superior a 20. Esta é uma das razões que motiva a utilização dos materiais supercondutores de alta temperatura (SAT) a 77 K ou a temperaturas intermédias (20 – 60 K) [6].

De notar que o rendimento do ciclo de Carnot é dado pela equação 2.2, pelo que se conclui que este depende da temperatura.

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}} \quad (2.2)$$

A teoria BCS (cujo nome advém das iniciais dos seus criadores, Bardeen, Cooper e Schrieffer), que dita que os elétrons se agrupam em pares de Cooper, explica o porquê de os materiais supercondutores apresentarem valores de resistência virtualmente nulos. Esta teoria é descrita de maneira pormenorizada em [7].

2.1.2.2 Diamagnetismo Perfeito

Em 1933, tal como está representado na Figura 2.4, foi a vez de dois físicos alemães darem o seu contributo para o progresso da supercondutividade. Walter Meissner e Robert Ochsenfeld constataram que um material supercondutor – uma esfera de estanho, no caso – expelia o fluxo magnético do seu interior quando estava no estado supercondutor e lhe era aplicado um campo magnético. A este fenómeno deu-se o nome de efeito Meissner ou diamagnetismo perfeito.

Um campo magnético externo ($< H_c$) cria, no interior de um supercondutor, correntes persistentes que anulam o campo magnético aplicado. Assim, o fluxo magnético mantém-se igual a zero no interior do SC – pelo que considerando a expressão:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.3)$$

e visto que não existe densidade de fluxo magnético no interior do material supercondutor ($\vec{B} = 0$), resulta:

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (2.4)$$

Uma vez que a expressão do vetor magnetização \vec{M} é dada por:

$$\vec{M} = \chi_m \times \vec{H} \quad (2.5)$$

resulta então o valor de susceptibilidade $\chi_m = -1$, o que indica que o material apresenta diamagnetismo perfeito.

O diamagnetismo perfeito não pode ser explicado exclusivamente pela perda de resistividade, pelo que veio impor a distinção entre supercondutor e condutor perfeito – ver a Figura 2.5, que ilustra a comparação entre o comportamento do fluxo num supercondutor e num condutor perfeito quando arrefecidos em campo nulo (ACN) ou na presença de campo (APC).

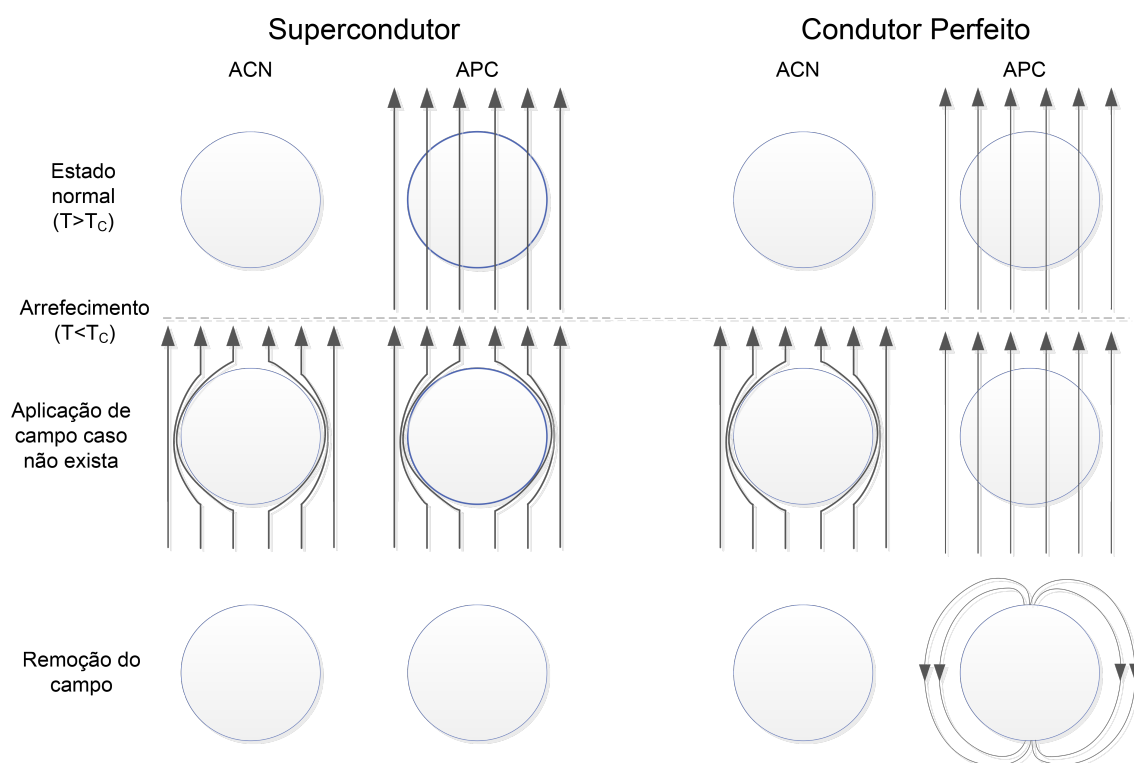


Figura 2.5: Comparação entre supercondutor e condutor perfeito quando arrefecidos em campo nulo (ACN) ou na presença de campo (APC). Caso não exista campo, aplica-se um para o remover em seguida (retirado de [4])

2.1.3 Tipos de supercondutores

Até ao ano de 1957, apenas se conhecia um tipo de supercondutores. A esses, hoje em dia dá-se o nome de supercondutores macios, ou do tipo I. Porém, esse ano ficou marcado pela descoberta de um novo tipo de supercondutores, que foram classificados como sendo do tipo II (ou supercondutores duros). O que os distingue é o seu comportamento na presença de um campo magnético externo.

2.1.3.1 Supercondutores do tipo I

Este tipo de materiais supercondutores é caracterizado por expelir integralmente o fluxo magnético do seu interior para valores de campo $H < H_c$. Este valor de campo crítico, H_c , corresponde normalmente a campos de indução B_c na ordem de 0,01 a 0,1 T [8]. De referir ainda que os supercondutores do tipo I são, geralmente, metais puros e ligas binárias e pertencem ao grupo dos supercondutores de baixa temperatura (que serão doravante referidos como SBT). Representa-se esquematicamente, na Figura 2.6, a variação do campo crítico com a temperatura.

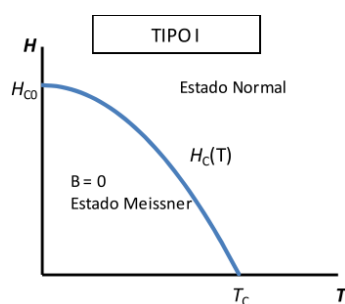


Figura 2.6: Diagrama H_c vs T para os supercondutores tipo I (retirado de [8])

2.1.3.2 Supercondutores do tipo II

A diferença fundamental entre os supercondutores macios e os duros – tipo I e tipo II, respetivamente – reside no facto de os segundos permitirem a penetração de fluxo magnético no seu interior, entrando numa nova fase, denominada estado misto (ver Figura 2.7). Os supercondutores do tipo II, ao contrário dos de tipo I, apresentam dois estados distintos: um primeiro, até ao valor de campo H_{c1} , que é o estado Meissner – em tudo semelhante àquele que ocorre nos SC macios – e um outro, denominado estado misto, em que zonas supercondutoras e zonas normais coexistem. O estado misto ocorre entre dois valores de campo magnético H_{c1} e H_{c2} , como se pode verificar na Figura 2.7. As propriedades de ambos os tipos de supercondutores são descritas em pormenor em [8, 9].

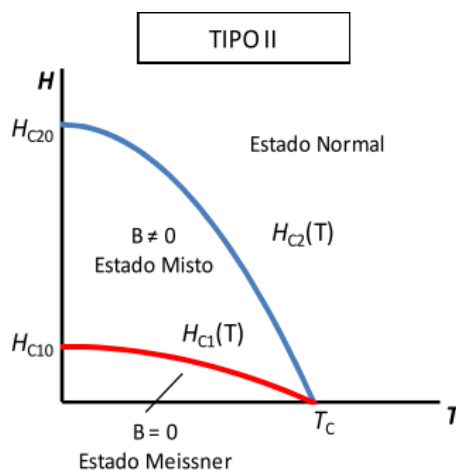


Figura 2.7: Diagrama H_c vs T para os supercondutores tipo II (retirado de [8])

Em aplicações de potência, utilizam-se essencialmente materiais do tipo II na forma de fitas. As fitas são designadas normalmente por fitas 1G, que foram as primeiras a ser utilizadas e são constituídas por BSCCO (fórmula química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$), e por fitas 2G, mais recentes e constituídas por $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (a sua designação abreviada é YBCO). A Tabela 2.1 pretende sintetizar algumas das propriedades das fitas supercondutoras de primeira e segunda gerações – fita supercondutora 1G de BSCCO da *InnoST* e fita supercondutora 2G de YBCO da *SuperPower* (SCS4050), respetivamente.

Tabela 2.1: Comparação de algumas propriedades das fitas supercondutoras 1G e 2G

	BSCCO (1G)	YBCO (2G)
Fórmula Química	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$
Corrente Crítica Mínima (A)	90	80
Densidade de Corrente Crítica (A/mm^2)	93	250
Temperatura Crítica (K)	105	92
Espessura (mm)	0,23 ($\pm 0,2$)	0,1 ($\pm 0,1$)
Largura (mm)	4,2 ($\pm 0,2$)	4 ($\pm 0,1$)
Módulo de Young (GPa)	77	116.7

2.2 Limitadores de correntes de defeito supercondutores

2.2.1 Introdução

O aumento da procura de energia elétrica que se tem vindo a verificar nos últimos anos impacta, naturalmente, a topologia das redes de energia. A necessidade de reforçar a oferta energética, que passa pela adição de novas centrais de geração aos sistemas, torna-se então basilar. Por outro lado, é expectável que a interligação de redes (mesmo entre países e continentes diferentes) seja uma solução cada vez mais comum para garantir flexibilidade e fiabilidade. Esta interconexão permite o trânsito de energia nos dois sentidos, colmatando assim falhas de segurança e abastecimento energético que possam afetar qualquer um dos usufrutuários da mesma.

No entanto, estas alterações à morfologia de um sistema de energia elétrica (SEE) resultam no aumento das correntes de curto-circuito para valores que não haviam sido previstos aquando do seu dimensionamento; isto acontece com particular ênfase nas imediações das novas centrais e dos pontos de interconexão com outras redes.

Existem várias medidas passíveis de solucionar esta adversidade, que se dividem em dois grupos fundamentais: as soluções de carácter provisório e as de carácter definitivo. As primeiras consistem em restrições operacionais, bem como modificações na topologia das redes que permitem um ajuste temporário das capacidades dos equipamentos instalados. Estas medidas implicam, na sua generalidade, perdas de fiabilidade e flexibilidade nas operações do sistema elétrico [11]. Porém, é nas soluções de carácter definitivo que se insere a temática deste capítulo; estas compreendem tanto a substituição de equipamentos obsoletos ou inoperacionais como a introdução de limitadores de correntes de curto-circuito na rede.

Uma vez que o dispositivo de potência utilizado durante os ensaios laboratoriais foi um LCDS (limitador de correntes de defeito supercondutor), apresenta-se, ao longo desta secção, uma breve descrição dos tipos e conceitos de limitadores existentes – com especial foco nos limitadores de correntes de defeito indutivos baseados em materiais supercondutores. Além disso, ilustrar-se-ão algumas das suas principais aplicações e enunciar-se-ão as vantagens inerentes a este tipo de equipamento.

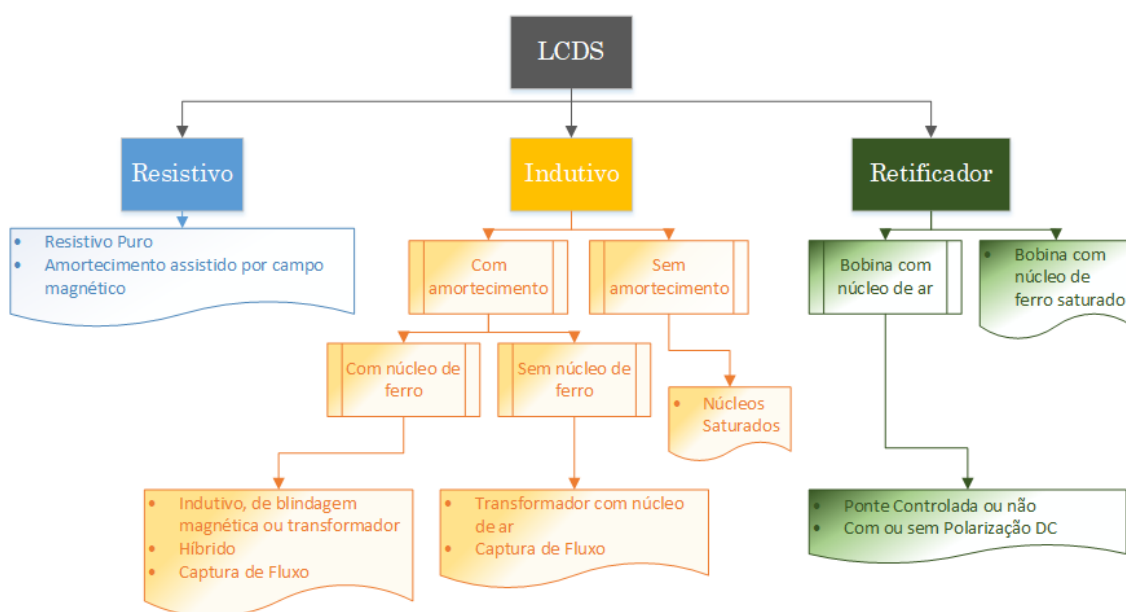


Figura 2.8: Classificação dos limitadores de corrente supercondutores

2.2.2 Características de um LCDS

A Figura 2.8 ilustra a classificação usual dada aos LCDS. Estes, tratando-se de equipamentos com uma finalidade bastante específica, deverão apresentar um determinado conjunto de características. Enunciar-se-ão as mais relevantes em seguida [3, 9, 12]:

- **Seletividade** → capacidade de identificar a fração da rede afetada pela falha, retirando-a de serviço sem afetar os demais componentes do SEE no momento da limitação de corrente;
- **Estabilidade** → garantia de que os equipamentos que não integram a falha continuam o seu funcionamento normal;
- **Tempos reduzidos de detecção e resposta a falhas** → qualquer falha deverá ser detetada o mais rapidamente possível e a limitação subsequente terá de ocorrer imediatamente a seguir para garantir a segurança do sistema e dos equipamentos;
- O limitador deverá ainda apresentar um **tempo de recuperação** relativamente curto após a falha, uma vez que basta aguardar que o material recupere o seu estado supercondutor → capacidade de suprimir **duas falhas em menos de 15 segundos**;
- **Sensibilidade** → simplicidade de alteração da capacidade de limitação do dispositivo LCDS;
- O LCDS deverá ainda apresentar um valor de **impedância variável** conforme se encontre em regime de funcionamento normal ou de falha e ser **invisível para a rede** em situação de operação normal.

O dispositivo LCDS, quando submetido a uma corrente de valor superior ao da sua corrente crítica, aumenta a sua impedância. Assim, limita a corrente que passa no circuito quando este perde as suas propriedades supercondutoras com uma resposta rápida e automática [13]. Estão ilustradas, na Figura 2.9, as formas de onda que a corrente de linha pode tomar durante uma situação de curto-circuito com e sem limitador. No momento da falha existe um pico de corrente que é limitado por ação do LCDS. A linha tracejada representa aquela que seria a forma de onda numa situação em que não existe um limitador de correntes de defeito na linha e pode verificar-se que tem maior amplitude quer no momento da falha, quer nos instantes que a pospõem.

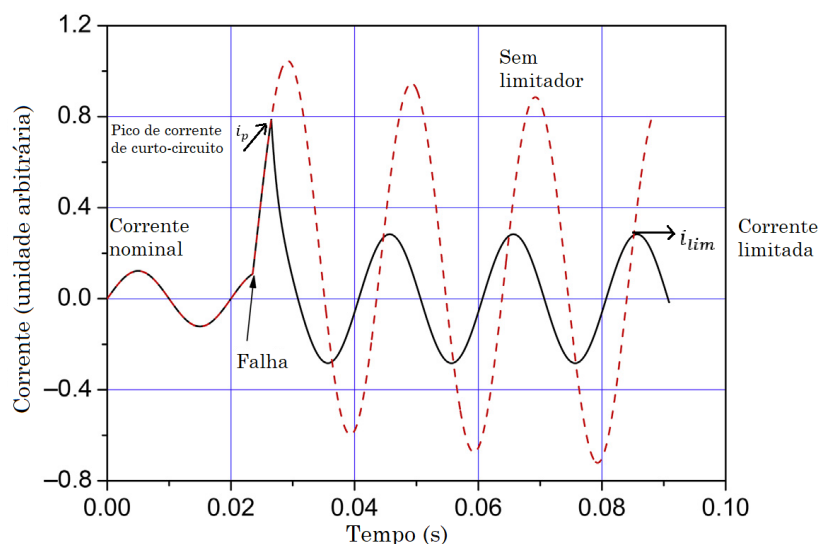


Figura 2.9: Comportamento da corrente na linha com LCDS (adaptado de [12])

Faz-se, na figura 2.10, uma síntese das localizações possíveis para um limitador de correntes de defeito num SEE. De notar que a rede de transporte funciona em muito alta tensão (MAT, superior a 115 kV) e que as redes de distribuição operam em média tensão (MT, por exemplo, 30 kV) ou em alta tensão (AT, por exemplo, 60 kV).

É ainda pertinente salientar que um dispositivo LCDS apresenta algumas propriedades que o distinguem do seu homólogo convencional. Em situação de falha, o LCDS aumenta a impedância do circuito. Assim, consegue-se uma maior limitação das correntes de curto-circuito ao mesmo tempo que se diminui significativamente os impactos negativos que essas mesmas correntes têm no material.

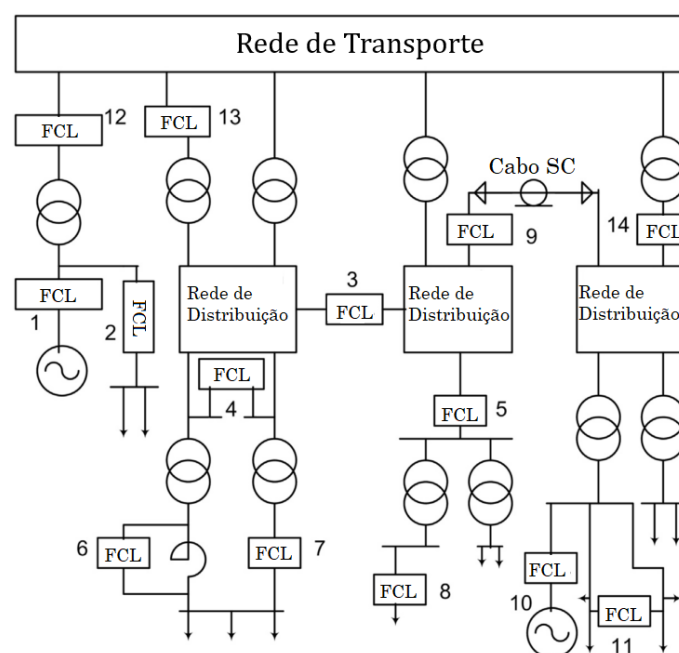


Figura 2.10: Localizações possíveis para um LCD num SEE (adaptado de [12])

Em adição, os limitadores de correntes de defeito supercondutores são mais rápidos a atuar que os seus homólogos convencionais e não afetam o desempenho dos dispositivos metálicos circundantes com o seu campo magnético [14, 15]. Todas estas propriedades contribuem para a segurança e segurança do SEE.

Uma vez que se pretende, com esta dissertação, analisar as deformações eletromecânicas desenvolvidas em dois LCDS indutivos do tipo transformador, considerou-se que seria pertinente abordar esta topologia com mais detalhe. Pode consultar-se as referências [9, 10, 16] para obter mais informação acerca do funcionamento dos LCDS dos tipos resistivo e retificador.

2.2.3 Limitadores de correntes de defeito supercondutores indutivos do tipo transformador

O LCDS do tipo indutivo foi caracterizado pela primeira vez por Helmut Dersch e a sua patente pode ser consultada em [17]. Os LCDS deste tipo apresentam núcleos de ferro ou de ar e os materiais SAT que o integram podem, ou não, realizar a mudança de estado – *quench*. O primário de um LCDS deste tipo é composto por enrolamentos de cobre, ao passo que o secundário se compõe de uma fita supercondutora curto-circuitada. Sumarize-se então o seu processo de operação: em condições normais de funcionamento, a impedância do limitador é próxima de zero, uma vez que a bobina supercondutora blinda o fluxo magnético no núcleo. Em contrapartida, no caso de uma falha, o LCDS passa a adicionar uma impedância ao circuito, uma vez que o material supercondutor deixa de conseguir blindar completamente o fluxo no ferro, induzindo portanto uma impedância e limitando desta forma as correntes de falha [18].

O limitador de corrente supercondutor indutivo do tipo transformador (também conhecido como LCDS indutivo de núcleo blindado ou de blindagem magnética) funciona, na sua essência, como se de um transformador se tratasse. O enrolamento primário é ligado em série com a rede ou o sistema a ser protegido. O enrolamento secundário, por sua vez, é composto por fita supercondutora. No caso desta dissertação, foram utilizadas configurações com uma e com duas espiras SAT no secundário do LCDS.

O limitador indutivo só se encontra conectado magneticamente ao circuito a ser protegido. Sob condições normais de funcionamento, o campo magnético gerado pela bobina de cobre é blindado pelo enrolamento supercondutor (ver efeito Meissner, descrito na secção 2.1.2.2) e não atinge o núcleo ferromagnético do limitador. Devido a essa blindagem, a impedância do LCDS indutivo em regime de operação normal é muito baixa ou virtualmente nula. Por outro lado, em caso de falha, a corrente no primário aumenta substancialmente, o que resulta num aumento do fluxo magnético que o enrolamento supercondutor deixa de ter capacidade de blindar completamente. Isto resulta num aumento da impedância do sistema – o que acaba por se traduzir na redução dos valores da corrente de curto-circuito. Em comparação com os LCDS do tipo resistivo, este apresenta maiores dimensões e peso devido ao volume de ferro utilizado na construção do núcleo magnético do limitador.

Tabela 2.2: Vantagens e desvantagens de um LCDS indutivo do tipo transformador

Vantagens	Desvantagens
⊕ Pontas de terminais de corrente dispensáveis, com exceção das topologias de núcleos saturados e de captura de fluxo (embora nesta não se encontrem aplicações de potência);	⊖ Peso e volume consideráveis por intermédio dos núcleos ferromagnéticos;
⊕ Impedância de limitação ajustável a partir do número de espiras nos enrolamentos do primário;	⊖ Incapazes de operar em redes DC;
⊕ Pontos quentes mais fáceis de suprimir relativamente ao modelo resistivo, o que aumenta a segurança do material supercondutor (o LCS indutivo está somente ligado magneticamente à linha a proteger);	⊖ Difíceis de operar em redes de AT quando são utilizados supercondutores maciços, devido às dificuldades existentes em produzir um bloco SAT maciço homogéneo de dimensões tão elevadas.
⊕ Na topologia de núcleos saturados, o SAT está sempre no estado supercondutor, logo, não apresenta perdas AC nem é submetido a amortecimentos, pelo que também não se coloca a questão da recuperação do estado supercondutor após a falha.	

Apresenta-se a Tabela 2.2, elaborada com base em informação obtida em [9], e que tem como objetivo sumarizar as vantagens e desvantagens de um LCDS indutivo do tipo

transformador quando comparado com outros limitadores de correntes de defeito.

2.3 Esforços eletromecânicos em LCDS e outros dispositivos de potência

A maioria dos danos nos enrolamentos em aplicações de potência não se devem a esforços puramente mecânicos, mas sim ao efeito de forças eletromagnéticas impostas por determinadas falhas e resultantes da coexistência de correntes e campos magnéticos. Estas forças originam, por sua vez, tensões mecânicas e forças de expansão e compressão que podem danificar ou destruir os equipamentos. É importante referir que estas forças vêm a sua magnitude e consequências influenciadas pelas propriedades e desgaste do material.

Pretende-se, no âmbito desta dissertação, analisar os esforços eletromecânicos tanto num LCDS trifásico (LCDST) como num monofásico. Como tal, considerou-se que seria pertinente apresentar, ao longo deste capítulo, alguns fundamentos teóricos que permitam um melhor entendimento dos esforços supracitados em dispositivos de potência.

No entanto, apenas uma reduzida fração da bibliografia referente a esforços mecânicos remete para os LCDS. Atribui-se isto ao facto de ser uma tecnologia em desenvolvimento e acerca da qual existe, por ora, menos informação.

2.3.1 Esforços em enrolamentos

Os esforços eletromecânicos desenvolvidos num dispositivo de potência têm particular incidência nos seus enrolamentos, quer por ação das correntes de defeito, quer devido às vibrações a que estes equipamentos estão sujeitos durante o seu funcionamento. Por isto, decidiu particularizar-se e abordar este tema em detalhe.

Estes esforços, de origem eletromagnética, são descritos pela eletrodinâmica. Sabe-se que um material condutor, quando é percorrido por uma corrente e está sob a ação de um campo magnético, vê ser exercida sobre si uma força. Um fio condutor de comprimento l , que transporte uma corrente I no seio de um campo de indução B , fica sujeito a uma força F , como descrito na expressão 2.6.

$$\vec{F} = I \int_L \vec{dl} \times \vec{B} \quad (2.6)$$

As equações da Força de Lorentz resultam na expressão 2.7, que dita que a densidade de força num dado volume de um enrolamento é igual ao produto vetorial da densidade de corrente no enrolamento pela densidade de fluxo magnético de dispersão.

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2.7)$$

onde \vec{f} é a densidade volumétrica de força magnética [N/m^3]; \vec{j} representa a densidade superficial de corrente [A/m^2] e \vec{B} é a densidade de fluxo magnético de dispersão [T].

A topologia e configuração dos enrolamentos influenciam a distribuição do fluxo de dispersão, da mesma forma que a amplitude e sentido da corrente o fazem. Diferentes configurações provocam diferentes tipos de falhas, sendo que o caso de um transformador de bobinas concêntricas está representado na Figura 2.11. Conforme se pode verificar na mesma, esta densidade de fluxo de dispersão é quase exclusivamente axial ao longo de praticamente toda a altura dos enrolamentos. Nas extremidades, inclina-se com o intuito de se fechar. Essa inclinação resulta na decomposição do campo de dispersão em duas componentes – axial, B_a , e radial, B_r – nas extremidades superior e inferior do enrolamento.

A densidade de fluxo magnético de dispersão axial interage com a corrente do enrolamento, resultando numa força radial, F_r . Este fenómeno dá origem à repulsão entre o enrolamento interior e exterior. Analogamente, a interação entre o campo de dispersão radial e a corrente origina uma força axial, F_a , responsável pelos esforços de compressão axial, que por sua vez resultam na expansão ou compressão das espiras das bobinas [19].

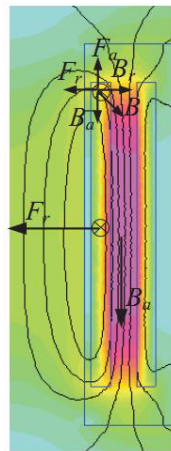


Figura 2.11: Campos de indução e forças radiais e axiais na janela de um transformador de enrolamentos concêntricos (retirado de [20])

A densidade de força \vec{f} da equação 2.7, por sua vez, terá direção perpendicular à do plano formado pelo campo e corrente, como se pode verificar no produto externo representado na Figura 2.12.

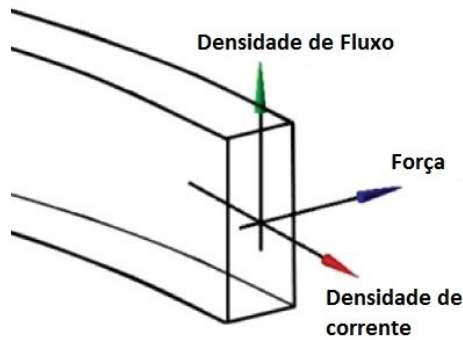


Figura 2.12: Representaˆo gráfica das densidades de fluxo, força e corrente descritas na equaˆo 2.7 (adaptado de [10])

Importa ainda referir que as forças presentes nas espiras dos enrolamentos sˆo, usualmente, de atraˆo – isto porque todas essas espiras sˆo percorridas por uma corrente que circula no mesmo sentido. Contudo, no caso dos dispositivos de potˆncia de enrolamentos concˆntricos, as correntes que os percorrem tˆm sentidos inversos. Conseqˆentemente, as forças nos enrolamentos destas bobinas passam a ser repulsivas. A Figura 2.13 ilustra o sentido das correntes nos enrolamentos interno e externo de um transformador, bem como as forças radiais que os afetam.

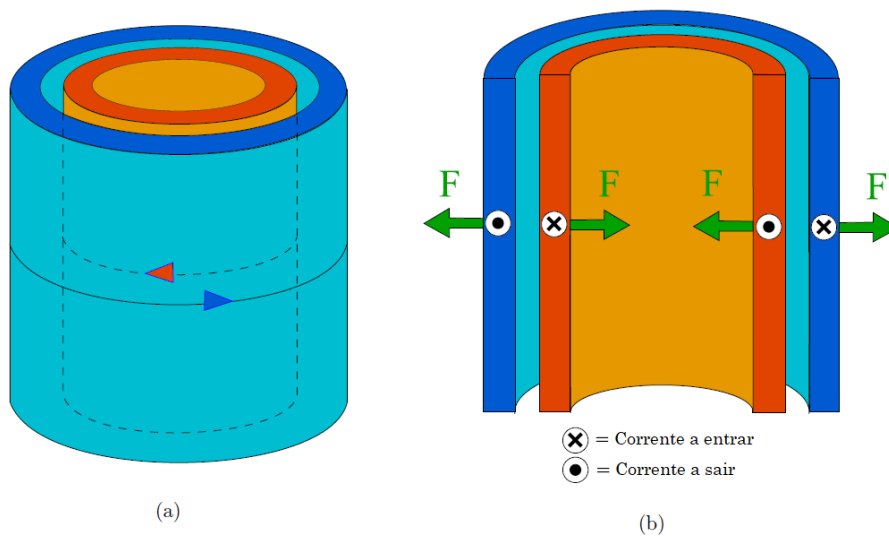


Figura 2.13: (a) Sentido das correntes nos enrolamentos; (b) Forças nos enrolamentos (retirado de [21])

As correntes que percorrem os enrolamentos em regime de funcionamento normal nˆo tˆm valores passıveis de os danificar. Todavia, em situaˆo de falha, estas correntes podem apresentar valores significativamente superiores. Sabe-se que o valor da corrente de curto-circuito influencia diretamente a magnitude das forças eletromagnéticas, pelo que em condiˆo de falha estas podem resultar em danos (mais, ou menos, graves) no

equipamento.

Para outras configurações dos enrolamentos em dispositivos de potência, não existem estudos tão detalhados acerca das características, direção, sentidos e efeitos das forças axiais e radiais.

Testes de esforço em fitas supercondutoras YBCO mostram que estas apresentam excelentes valores de resistência mecânica devido à sua robustez axial; assim, a fita mantém o seu desempenho enquanto material supercondutor mesmo sob o efeito destas forças [22].

Por outro lado, estudou-se os efeitos que os esforços transversais têm no desempenho das fitas YBCO e concluiu-se que a corrente crítica das mesmas baixa substancialmente antes da delaminação, resultando num baixo valor de tensão de delaminação inferior a 15 MPa [23, 24]. Uma vez que as juntas nas fitas são cruciais para aplicações de potência com supercondutores, também se estudou a reação destas juntas em fita YBCO; estas apresentaram bons valores de robustez e resistência elétrica [25].

Sendo que as deformações nos enrolamentos de um dispositivo de potência (seja ele um LCDS ou não) são causadas, na sua maioria, por estas forças radiais e axiais, vai falar-se com mais detalhe sobre ambas em seguida. É, no entanto, de referir que as consequências destas forças podem ser particularmente expressivas no caso de o enrolamento ser constituído por material SAT, que é menos robusto mecanicamente do que o cobre [26].

2.3.2 Tipos de falhas mecânicas nos enrolamentos

A Figura 2.14 pretende ilustrar os vários tipos de força a que um enrolamento – no caso, um anel supercondutor – está sujeito. Estas podem ser radiais ou axiais, sendo que as radiais provocam no anel um esforço adicional que é conhecido como *hoop stress* e que é também representado.

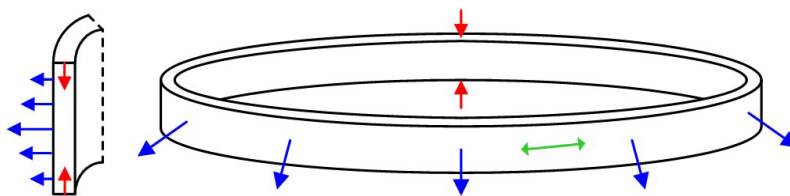


Figura 2.14: Diversas forças exercidas num anel supercondutor (radiais a azul, axiais a vermelho; o esforço no anel causado pelas forças radiais (*hoop stress*) está representado a verde) (retirado de [27])

Tanto as forças radiais como as axiais podem dar origem a falhas, pelo que tanto a origem como o cálculo de cada um desses tipos de força serão discutidos em detalhe adiante.

2.3.2.1 Falhas por aˆcao de forˆcas radiais

A Figura 2.15, da qual se vai partir para analisar e calcular os esforˆcos radiais num enrolamento, pretende representar de outra forma as forˆcas radiais apresentadas na Figura 2.13. Estˆ representada uma secˆcao transversal de duas bobinas concˆntricas, juntamente com os esforˆcos radiais (e as respetivas consequˆncias) em cada um dos enrolamentos.

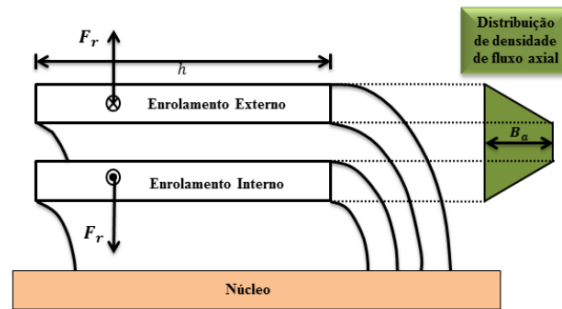


Figura 2.15: Secˆcao transversal dos enrolamentos de um transformador, distribui˜ao de campo de indu˜ao axial e forˆcas radiais (retirado de [16])

ˆE relevante mencionar que a obten˜ao do valor destas forˆcas nˆo inclui as componentes que surgem nos extremos dos enrolamentos, onde ocorre a decomposi˜ao das linhas de fluxo de dispers˜ao (ver Figura 2.11). Isto ˆ devido ao facto de o valor destes esforˆcos ser diminuto nesses pontos; o valor mais significativo de forˆca radial encontra-se situado a meio do enrolamento.

De notar que o campo de indu˜ao de dispers˜ao axial foi aproximado a um trapˆzıo pelo facto de o seu valor ser maior nas faces interna do enrolamento externo e externa do enrolamento interno. O seu valor mˆximo ˆ constante na regi˜o entre os enrolamentos. Assim sendo, assumir-se-˜ao estas condi˜oes nos cˆlculos que se seguem.

A Figura 2.16 representa tambˆm as forˆcas radiais presentes em enrolamentos concˆntricos, mas desta feita a partir de uma vista em planta superior para melhor visualiza˜ao.

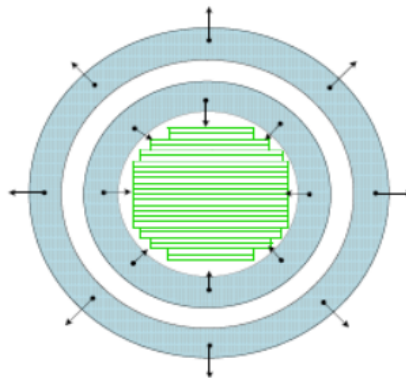


Figura 2.16: Forˆcas nos enrolamentos; esforˆcos de tra˜ao no enrolamento externo e esforˆcos compressivos no enrolamento interno (retirado de [19])

O raciocínio que se segue e as expressões que dele advêm são descritos em [19]. Pode reescrever-se a expressão 2.6, na qual se assume $l = \pi \cdot D_m$ (em que D_m representa o diâmetro médio de uma espira), de forma a calcular a força exercida num enrolamento de n espiras:

$$F = B.n.I.\pi.D_m \text{ [N]} \quad (2.8)$$

Pretende, a partir da Figura 2.15, obter-se o valor do campo de indução de dispersão axial, B_a , existente no ponto que medeia os enrolamentos. Com esse intuito, admite-se um campo uniforme ao longo da maioria dos enrolamentos. Tem-se então a expressão:

$$B_a = \mu_0 \cdot \frac{n.I}{h} \text{ [T]} \quad (2.9)$$

em que μ_0 é a permeabilidade magnética do meio, h representa a altura do enrolamento e $n.I$ denota a força magnetomotriz (f.m.m.).

Por outro lado, e já que ambos os enrolamentos estão sujeitos ao valor médio da densidade de fluxo ($\frac{1}{2}.B_a$), surge a expressão da força radial presente em cada um dos enrolamentos, F_r :

$$F_r = \frac{1}{2}\mu_0 \frac{(n.I)^2}{h} \cdot \pi.D_m = \frac{2\pi(nI)^2 D_m}{h} \cdot 10^{-7} \text{ [N]} \quad (2.10)$$

Uma vez que as correntes que percorrem os enrolamentos circulam em sentidos opostos (ver Figura 2.13 (a)), também as forças terão sentidos contrários. Sabe-se então que o enrolamento externo estará sujeito a esforços de expansão e que o interno, por sua vez, será submetido a forças de compressão (ver Figuras 2.13 (b), 2.15 e 2.16). Existe, em ambos os casos, *hoop stress*.

Com base na expressão 2.10, e sabendo o número n de espiras e a respetiva secção transversal S_e , vem a expressão que permite determinar a tensão mecânica média imposta num enrolamento (σ_{med}):

$$\sigma_{med} = \frac{F_r}{2.n.S_e} = \frac{\pi.(nI)^2.D_m}{h.n.S_e} \cdot 10^{-7} \text{ [N.m}^{-2}\text{]} \quad (2.11)$$

Ao passo que o enrolamento externo estará sujeito a *hoop stress* por conta dos esforços de expansão que o impactam, os efeitos das forças de compressão no enrolamento interno podem manifestar-se de duas maneiras: *forced buckling* ou *free buckling* (Figura 2.17 (a) e (b), respetivamente).

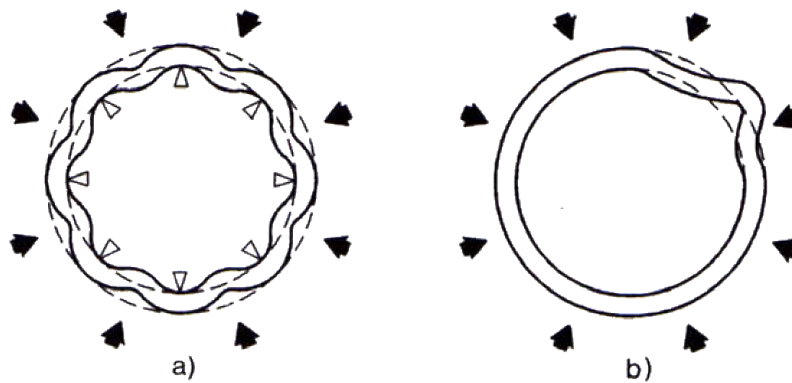


Figura 2.17: Forças radiais devido a campo axial: (a) *Forced buckling*; (b) *Free buckling* (adaptado de [28])

Forced buckling denota um tipo de deformação que ocorre quando existem espaçadores de sustentação axial de maior rigidez mecânica do que o enrolamento em si, e o seu valor crítico σ_{forced} é dado por:

$$\sigma_{forced} = \frac{E(\delta).(x.e^2).Esp_{axial}^2}{12.D_m^2} \text{ [N.m}^{-2}\text{]} \quad (2.12)$$

em que $E(\delta)$ é o módulo de elasticidade incremental no valor crítico, x representa uma constante fornecida pelo fabricante, e é a espessura do condutor e Esp_{axial} denota o número de espaçadores de sustentação axial do modelo a ensaiar.

Os efeitos que uma deformação do tipo *forced buckling* provoca num transformador são apresentados na Figura 2.18.

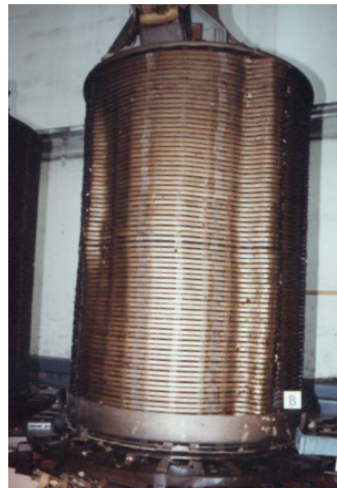


Figura 2.18: Exemplo de transformador danificado por ação de *forced buckling* (retirado de [28])

O termo *free buckling*, por sua vez, designa as deformações que ocorrem quando não existem espaçadores de sustentação distribuídos axialmente. Calcula-se o valor crítico

deste tipo de deformação, σ_{free} , através da expressão:

$$\sigma_{free} = \frac{E_y \cdot e^2}{D_m^2} \text{ [N.m}^{-2}\text{]} \quad (2.13)$$

em que E_y é representativo do módulo da elasticidade do material.

Os efeitos deste tipo de deformação em transformadores reais são retratados na Figura 2.19.



Figura 2.19: Exemplos de transformadores danificados por ação de *free buckling* (retirado de [19])

As deformações por ação de forças radiais acabam então, em última análise, por ter alguns efeitos indesejáveis em dispositivos de potência com enrolamentos concêntricos [10]:

1. Dilatação do material que reveste os condutores dos enrolamentos, o que reduz dramaticamente a vida útil do dispositivo de potência;
2. Aumento da distância entre o enrolamento interno e o núcleo, o que minimiza a capacidade de suportar esforços mecânicos por parte do dispositivo de potência;
3. Alargamento dos enrolamentos, causando instabilidade e provocado vibrações que acabam por danificar o dispositivo de potência, afetando a sua robustez face a correntes de defeito.

2.3.2.2 Falhas por ação de forças axiais

Quando se aborda o tema dos esforços axiais, é importante referir três tipos de falha que daí advêm. Em primeira instância, tem-se a deformação das fixações das extremidades dos enrolamentos – *clamping*; seguidamente, há que mencionar o *bending*, que denota a inclinação entre os espaçadores radiais; por último, a inclinação dos condutores é designada por *tilting*. Todas estas falhas têm a sua génese nas vibrações devido a forças axiais

compressivas ou na falta de critério e/ou solidez aquando do processo de enrolamento da bobina.

Como já se referiu e é possível observar na Figura 2.11, o campo de indução de dispersão radial B_r aparece nas extremidades superior e inferior do enrolamento por via da curvatura das linhas de fluxo. De salientar que esta densidade de fluxo de dispersão radial origina forças axiais nos enrolamentos (no eixo longitudinal dos mesmos, portanto), que irão fazer com que estes comprimam ou expandam.

Estas forças axiais acumulam em direção ao centro dos enrolamentos, pelo que o valor máximo de força está concentrado a meio da altura dos mesmos. A Figura 2.20 é uma representação diagramática da distribuição da força axial num enrolamento de um dispositivo de potência. Esta força é compressiva no sentido do centro do enrolamento devido à direção em que o campo de indução de dispersão circula, que acaba por resultar em forças opostas nas extremidades do enrolamento.

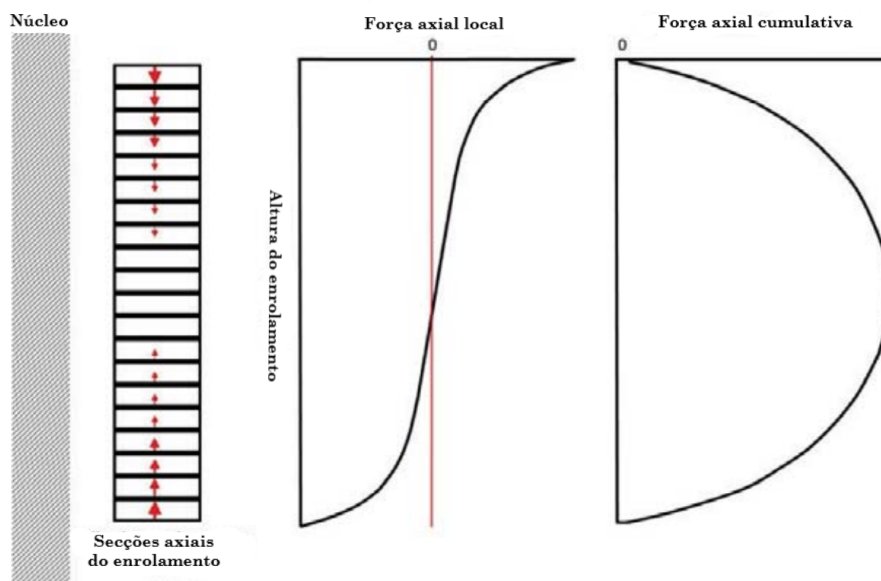


Figura 2.20: Distribuição de forças locais e cumulativas ao longo da altura do enrolamento (adaptado de [29])

O deslocamento de um enrolamento em relação ao eixo central (representado na Figura 2.21) resulta em forças axiais excessivas e difíceis de suportar por parte do material, pelo que é necessário acautelar devidamente esta situação. Tais providências são necessárias devido à diferença na distribuição da força magnetomotriz ao longo da altura dos enrolamentos, que por sua vez resulta em linhas de campo mais curvadas no local em que este deslocamento ocorre. Como consequência, os enrolamentos são (por ação das forças axiais) cada vez mais afastados, o que resulta em deslocamentos iterativamente maiores e, por sua vez, forças de maior magnitude [30].

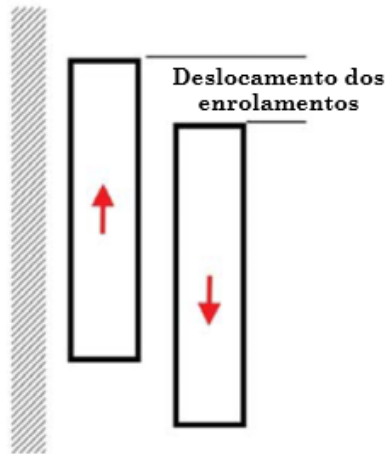


Figura 2.21: Deslocamento dos enrolamentos e forças induzidas (adaptado de [29])

Forças de compressão axial de grande magnitude nas extremidades dos enrolamentos são passíveis de danificar as fixações dos mesmos. Isto põe em causa a principal função destas estruturas de fixação, que passa por exercer pressão sobre os enrolamentos, dotando-os de resistência às forças axiais aquando do aparecimento de correntes de curto-circuito. De forma análoga ao que sucede com as forças radiais, também neste caso se deve considerar as vibrações provocadas por estas forças. O isolamento dos condutores poderá ficar danificado por ação do movimento relativo que existe entre os enrolamentos e os espaçadores localizados axialmente [10].

Recuperando o que se disse no início desta secção, é pertinente discorrer com mais critério acerca do *bending*, que designa a inclinação entre os espaçadores radiais, e do *tilting*, que denota a inclinação entre condutores em si. São apresentadas abaixo, nas equações (2.14) e (2.15), as expressões que permitem aproximar o valor de cada um destes tipos de deformações mecânicas (*bending* e *tilting*, respetivamente).

$$\sigma_{bending} = \frac{F_a \cdot L_a^2}{2 \cdot e \cdot h^2} \text{ [N.m}^{-2}\text{]} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{tilting} = \frac{E_y \cdot h^2}{14 \cdot R^2} + \frac{m \cdot s \cdot c \cdot e}{12 \cdot \pi \cdot r \cdot h^2} \text{ [N.m}^{-2}\text{]} \quad (2.15)$$

onde F_a representa a força axial, L_a denota a distância entre os separadores axiais, e designa a espessura do condutor e h remete para a dimensão axial do condutor. Por sua vez, E_y representa o coeficiente de elasticidade do material, m o número de cunhas, s é o número de espaçadores, c caracteriza o módulo de elasticidade do isolante e r designa o raio do enrolamento.

As Figuras 2.22 e 2.23 pretendem ilustrar o fenómeno da flexão dos condutores entre os espaçadores radiais – *bending*. Estas correspondem, por esta ordem, a uma representação diagramática e a uma ocorrência efetiva do fenómeno.

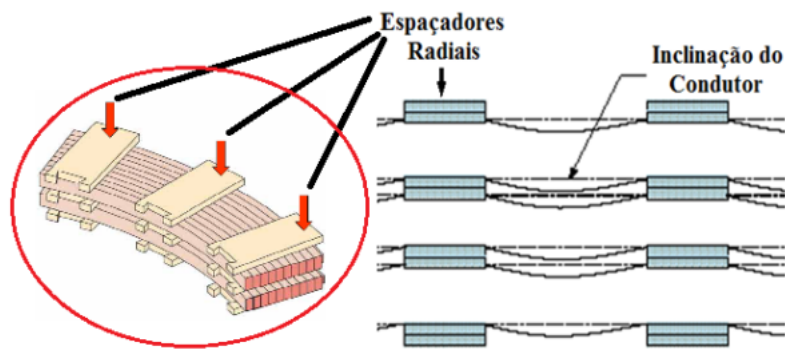


Figura 2.22: Flexão dos condutores entre os espaçadores radiais – *bending* (retirado de [19])

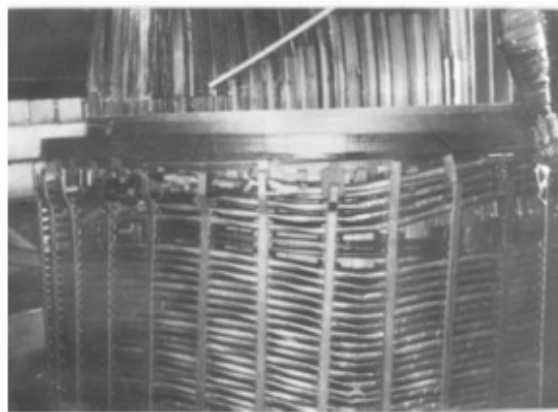


Figura 2.23: Situação real de *bending* (retirado de [19])

Analogamente, as Figuras 2.24 e 2.25 ilustram o fenômeno da inclinação nos condutores por ação de forças axiais – *tilting*.

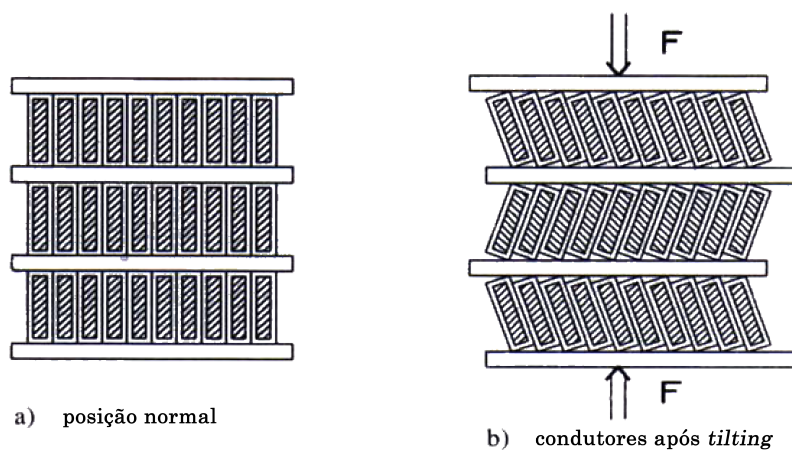


Figura 2.24: Deformação do tipo *tilting* por ação de forças axiais devido a campo radial (retirado de [31])



Figura 2.25: Situação real de *tilting* (retirado de [19])

Sintetizem-se então as consequências deste tipo de deformações [21]:

1. Curvatura dos enrolamentos, passível de danificar o isolante, reduzindo a vida útil do transformador;
2. Alargamento dos suportes dos enrolamentos, tornando o dispositivo mais vulnerável a correntes de defeito;
3. Decréscimo na rigidez mecânica no disco de compressão, que se poderá traduzir no deslocamento dos enrolamentos que, por sua vez, afetam o desempenho do dispositivo em situação de falha.

2.4 Extensometria

Uma vez que o foco deste trabalho assenta na medição de deformações e tensões mecânicas, importa explicar o método que se vai utilizar para efetuar tais medições.

Todos os corpos que estão sujeitos a ações mecânicas exteriores (ou variações de temperatura) podem apresentar níveis de degradação mais ou menos acentuados conforme a intensidade das forças envolvidas e as condições às quais foram submetidos. Vai desenvolver-se um dispositivo de medida que permita quantificar o esforço mecânico a que cada um dos enrolamentos supercondutores de um LCDST está sujeito em condição de falha. Para isso, e uma vez que não se consegue medir diretamente este esforço, recorrer-se-á a sensores capazes de relacionar duas grandezas importantes – a tensão mecânica e a subsequente deformação. Estes sensores são designados por extensómetros.

2.4.1 Conceitos teóricos

O esforço mecânico é, por definição, a quantidade da deformação (quer seja ela uma tração ou uma compressão) de um material em relação à força externa que lhe é aplicada.

Deformação, por sua vez, é a designação que se dá à alteração física experimentada por um material devido à aplicação de uma força. A deformação define-se como sendo a relação entre a variação de comprimento de um material e o seu comprimento original, sem ter sido alterado, como mostrado na Figura 2.26.



Figura 2.26: Deformação mecânica quando aplicada uma força (adaptado de [32])

Esta deformação pode ser positiva (tração) ou negativa (compressão) – ver Figuras 2.27a e 2.27b, respetivamente. Quando se comprime um material numa direção, este tem a tendência de expandir no eixo perpendicular ao da força de compressão. Esta particularidade tem o nome de efeito de Poisson e o coeficiente de Poisson (ν), definido como a relação entre as deformações longitudinal e transversal, é a medida desse efeito.

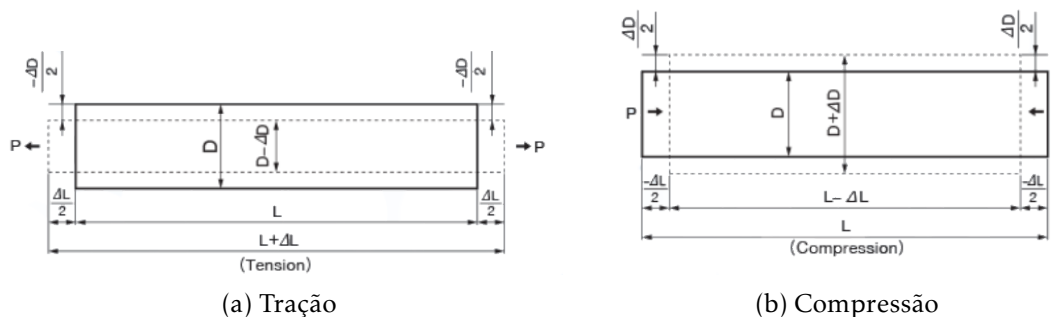


Figura 2.27: Deformações mecânicas em caso de tração (a) ou compressão (b)

O que o extensómetro faz é detetar uma deformação mecânica como um sinal elétrico; já que a resistência dos metais altera o seu valor com essa deformação, tira-se partido desta propriedade. O valor da resistência elétrica é proporcional ao comprimento do material e inversamente proporcional à área da secção do mesmo. Assim, se um fio metálico for tracionado, o valor da resistência aumenta – porque a área da secção diminui e o comprimento do fio aumenta. Analogamente, se o mesmo fio for comprimido, o valor da sua resistência elétrica diminui. Assim sendo, se este fio metálico estiver colado à superfície que se pretende estudar, vai distender ou comprimir com a mesma. Desta forma, medir a alteração na resistência elétrica do fio metálico permite detetar a deformação a que determinado material está sujeito em determinado cenário [33]. Através do estudo das

deformações que afetam um corpo – neste caso, uma fita supercondutora –, consegue determinar-se a distribuição das tensões mecânicas no mesmo [10].

Considere-se agora as Figuras 2.27a e 2.27b. Em ambas estão presentes os parâmetros L e ΔL , que representam o comprimento inicial e a variação do mesmo após aplicação de uma força, respetivamente. À relação entre o alongamento e o comprimento original dá-se o nome de deformação mecânica. Esta é expressa através da seguinte igualdade:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.16)$$

Analogamente, se a força aplicada ao material em estudo for compressiva, vem a expressão:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta L}{L} \quad (2.17)$$

Para exemplificar, suponha-se que um material com 200 mm de comprimento sofre uma força de tensão que o alonga em 0.02 mm. A deformação ε criada no material é então dada por:

$$\varepsilon = \frac{0,02}{200} = 0,0001 = 100 \mu\text{m}/\text{m} = 100 \mu\varepsilon \quad (2.18)$$

Apesar de se tratar de uma grandeza adimensional, a magnitude da deformação medida tem valores muito pequenos, pelo que o seu valor é normalmente expresso em *microstrain* ($\mu\varepsilon$), equivalente a $\varepsilon \times 10^{-6}$ [32].

Com base na Lei de Hooke, a relação entre a tensão mecânica σ e a deformação ε criada num material por uma força é dada por:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_y \quad (2.19)$$

onde E_y representa o coeficiente de elasticidade, também denominado de módulo de Young – uma característica própria de cada material.

Deste modo, o valor da tensão mecânica obtém-se multiplicando a deformação mecânica pelo módulo de Young. Quando um material é submetido a uma força F , este estende na direção axial (diz respeito a eixo) ao mesmo tempo que contrai na direção transversal. À dilatação axial dá-se o nome de deformação longitudinal, ao passo que a contração radial (diz respeito a raio) é denominada de deformação transversal. O valor absoluto da relação entre as deformações longitudinal e transversal tem o nome de coeficiente de Poisson, ν , e é expresso da seguinte forma:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right| \quad (2.20)$$

onde ε_1 representa a deformação longitudinal ($\frac{\Delta L}{L}$) e ε_2 a deformação transversal ($\frac{\Delta D}{D}$) – ver Figuras 2.27a e 2.27b. O coeficiente de Poisson depende do material em estudo.

O motivo pelo qual é importante quantificar estas deformações passa por saber se o material será irreversivelmente danificado por ação do esforço mecânico e se terá ou não

capacidade de voltar à sua condição inicial. Como se ilustra na Figura 2.28, existem duas regiões de funcionamento:

- **Zona de deformação elástica** → As deformações elásticas não são permanentes, isto é, quando os esforços que atuam sobre o corpo são removidos, este volta ao seu formato original. Quando uma tensão mecânica é aplicada, a deformação elástica mantém-se constante enquanto a tensão mecânica aplicada também o for. Após a remoção da tensão supracitada, a deformação volta imediatamente ao valor nulo.
- **Zona de deformação plástica** → Acima de uma certa tensão, os materiais começam a deformar-se plasticamente, ou seja, ocorrem deformações permanentes. O ponto a partir do qual estas deformações permanentes se começam a tornar significativas é chamado limite de escoamento. Criou-se uma convenção na qual é construída uma linha reta paralela à zona de deformação elástica, passando pelo valor de 0,2% da deformação total [34, 35]. A tensão correspondente à intersecção desta linha com a curva tensão-deformação é o limite de escoamento.

A magnitude do limite de escoamento é a medida da resistência de um material à deformação plástica e pode variar muito, como por exemplo, entre 35 MPa para uma liga de alumínio de baixa resistência até 1400 MPa para um aço de alta resistência [35]. Durante a deformação plástica, a tensão necessária para continuar a deformar um material aumenta até um ponto máximo, chamado tensão de rotura – a maior tensão a que o material consegue resistir; se esta tensão for aplicada e se mantiver, o resultado será a fratura.

De notar que, ainda com base na Lei de Hooke, a deformação em objetos ou materiais é proporcional à tensão mecânica que lhes é aplicada – isto na zona de deformação elástica. Por outras palavras, a deformação num sólido é diretamente proporcional à força que provoca a tensão mecânica no mesmo. Assim sendo, utiliza-se a medição de tensão e deformação mecânicas de maneira sinónima.

O gráfico típico da deformação em função da tensão mecânica numa liga metálica está representado na Figura 2.28.

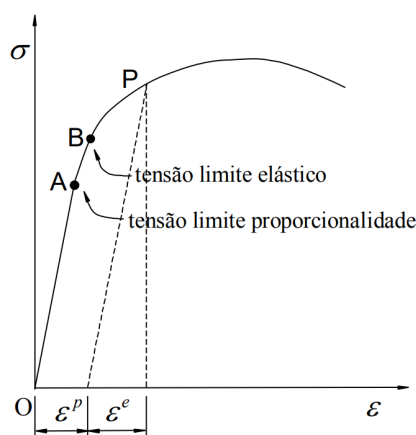


Figura 2.28: Característica mecânica de um material e suas regiões de funcionamento (retirado de [36])

No ponto A atinge-se o limite do comportamento linear, sendo a tensão mecânica correspondente designada por tensão limite de proporcionalidade, a partir da qual não é, regra geral, aplicável a lei de Hooke.

Entendendo-se como comportamento elástico o fenómeno associado à ausência de deformações após o término das tensões mecânicas a atuar na fita, o limite de comportamento elástico do material ocorre no ponto B, correspondendo-lhe a tensão mecânica conhecida como tensão de limite elástico, tensão limite de elasticidade ou tensão mecânica crítica [36].

2.4.2 Escolha dos extensómetros a utilizar em função dos modelos existentes

Dos três tipos de extensómetros existentes – mecânicos, óticos e elétricos –, vamos utilizar o resistivo elétrico, que é o mais comum. Como referido, este compõe-se de um material metálico que possui um determinado valor de resistência que irá variar com a deformação. De notar que a presente dissertação vem no seguimento daquela apresentada em [10], pelo que muitas das escolhas aqui efetuadas têm como base esse mesmo documento.

São vários os parâmetros que condicionam a escolha dos extensómetros a utilizar em cada tipo de aplicação, entre eles:

- **Resistência;**
- **Geometria;**
- **Fator de sensibilidade;**
- **Temperatura de trabalho.**

Os extensómetros têm, tipicamente, valores de resistência de 120 Ω , 350 Ω e 1000 Ω [37], sendo que os primeiros são os mais utilizados em medições de esforços como a que aqui

se apresenta. Os restantes, com os valores de resistência elétrica mais elevados, são normalmente utilizados em aplicações com transdutores. Existem ainda extensómetros com resistência de 60Ω cujo propósito é, no caso, compensar os efeitos do *bending* – inclinação entre os espaçadores radiais.

Quanto à geometria, estão disponíveis extensómetros com vários valores de comprimento e largura (tanto do extensómetro em si como da grelha que efetivamente mede a deformação) consoante as dimensões da superfície cuja deformação se pretende quantificar – é importante referir que a área da grelha deverá ficar completamente posicionada sobre o material em estudo. Para além disso, e ainda relativamente à geometria, existem extensómetros capazes de medir, simultaneamente, deformações em dois ou mais eixos. São também utilizados para medir torções e dá-se-lhes o nome de rosetas.

Por sua vez, o fator de sensibilidade é uma grandeza adimensional e característica intrínseca do material que constitui a grelha do extensómetro. Como se verifica na equação 2.21, o fator de sensibilidade K é dado pela relação entre a variação relativa da resistência e a variação relativa do comprimento do material. De notar ainda que este quociente pode ser relacionado com a deformação medida através da equação 2.16. Este fator de sensibilidade assume, regra geral, o valor de ≈ 2 .

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \Leftrightarrow \frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (2.21)$$

Finalmente, importa referir que a temperatura de operação tem influência direta nos valores a medir, pelo que o modelo do extensómetro tem de ser escolhido tendo este parâmetro em consideração.

A Figura 2.29 é um diagrama ilustrativo do tipo de extensómetro que mais se adequa a esta aplicação em particular. Neste caso, escolheu-se um extensómetro resistivo elétrico simples de 120Ω e de medição uniaxial.

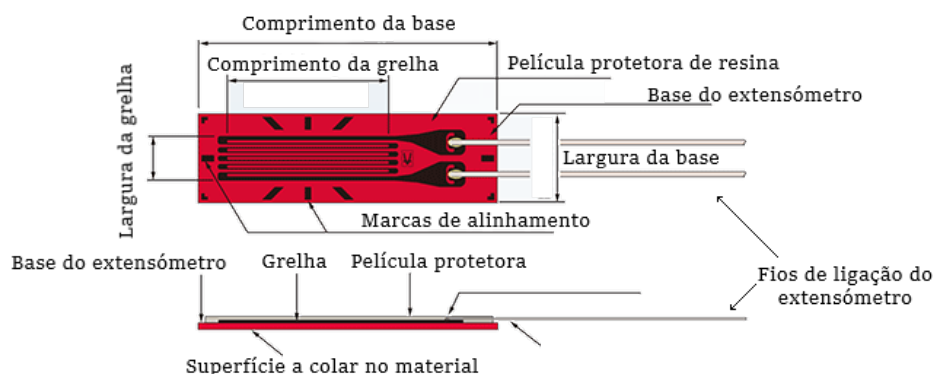


Figura 2.29: Figura ilustrativa da planta e do corte transversal de um extensómetro (em cima e em baixo, respetivamente) (adaptado de [37])

Os extensómetros utilizados são do modelo KFL-2-120-C1-11 e fabricados pela *Kyowa*

Electronic Instruments. A sigla KFL denota o tipo de extensômetro adequado a temperaturas criogênicas. Depois, e em sequência, a referência indica que o extensômetro tem uma grelha com 2 mm de comprimento, com valor de resistência igual a 120Ω , adequado para medidas uniaxiais e com um coeficiente de expansão linear igual a 11×10^{-6} .

Como já se referiu, o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação vem na sequência do efetuado em [10], pelo que algumas das decisões aqui tomadas têm como base esse documento. O circuito ali desenvolvido para a aquisição de dados num LCDS monofásico foi aqui replicado e aperfeiçoado para um sistema trifásico, sendo que se pode consultar a dissertação supracitada para mais detalhe acerca de algumas das escolhas efetuadas no âmbito deste circuito. Não obstante, importa sumarizar aqui o funcionamento desta montagem. Já que as deformações a medir se irão traduzir em variações de tensão na ordem dos μV , a melhor forma de as quantificar será – como exposto em seguida – introduzir cada extensômetro numa ponte de Wheatstone – ver Figura 2.30.

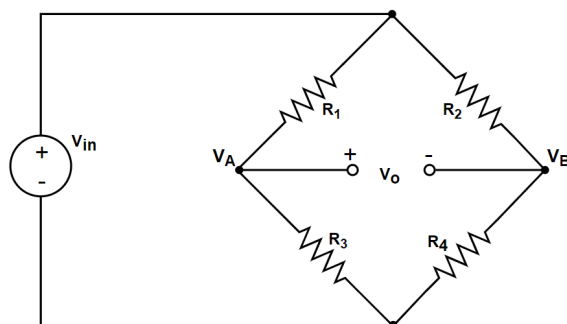


Figura 2.30: Ponte de Wheatstone comum

Na prática, e como já foi referido aquando da explicação dos conceitos básicos de extensometria, as medições de deformação têm valores bastante reduzidos e são, por isso, geralmente expressas em *microstrain* ($\epsilon \times 10^{-6}$). Dessa forma, para medir a deformação, é necessário medir variações de resistência muito pequenas com bastante precisão. Por exemplo, se o material a testar sofrer uma deformação de $500 \mu\epsilon$, um extensômetro com um fator de sensibilidade $K = 2$ fornecerá uma variação de resistência elétrica de meramente $2 \times (500 \times 10^{-6}) = 0,1\%$. Para um extensômetro de 120Ω , isso corresponderá a uma variação de apenas $0,12 \Omega$ [33].

Para medir variações tão pequenas de resistência como estas, a montagem utilizada baseia-se numa ponte de Wheatstone. Uma ponte Wheatstone, como a mostrada na Figura 2.31, é uma rede formada por quatro braços resistivos e uma tensão de excitação, V_i , que lhe é aplicada. Neste caso, um dos braços resistivos da ponte é composto pelo extensômetro R_{EXT1} – esta é uma configuração *Quarter-Bridge*.

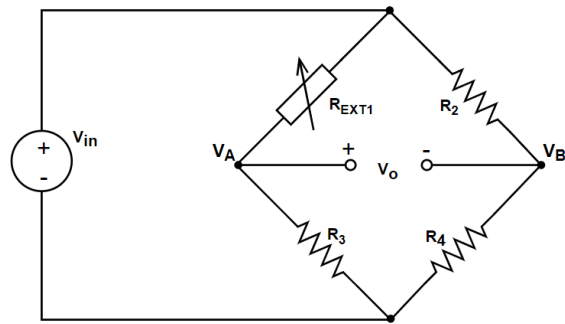


Figura 2.31: Ponte de Wheatstone em configuração *Quarter-Bridge*, onde R_{EXT1} representa um extensômetro

DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR, PROCESSAMENTO DE SINAIS E MONTAGEM EXPERIMENTAL

Já se mencionou, ao longo da secção 2.3, os vários tipos de tensões mecânicas a que os limitadores de correntes de defeito supercondutores estão sujeitos e, ainda que algumas possam ser mais danosas que outras, todas estas forças são prejudiciais para estes equipamentos e para o seu funcionamento. As correntes de curto-circuito resultam em forças eletromecânicas que, por sua vez, dão origem a vibrações que desgastam e danificam os enrolamentos destes equipamentos.

Daí surge a importância deste trabalho, que almeja estudar e quantificar os esforços eletromecânicos a que dois LCDS indutivos do tipo transformador estão sujeitos – em situação de falha – e, subsequentemente, determinar se estes esforços são ou não passíveis de danificar ou comprometer a integridade do dispositivo limitador de corrente.

Neste capítulo estão descritos todos os circuitos necessários para obter os resultados supracitados: em primeiro lugar, os circuitos eletrónicos desenvolvidos para o condicionamento de sinal e subsequente aquisição de dados referente às tensões eletromecânicas propriamente ditas; seguidamente, a montagem laboratorial para o ensaio do LCDS. Ao longo das secções seguintes, serão apresentadas as diversas montagens e entrar-se-á em mais detalhe no que às suas características, funções específicas e componentes utilizados diz respeito.

3.1 Aquisição de dados e condicionamento de sinal

O medidor desenvolvido para adquirir os esforços eletromecânicos a que os enrolamentos supercondutores do limitador estão sujeitos é composto por diversos módulos. Desenvolveu-se um circuito para a leitura das bobinas de Rogowski, uma placa com todas as pontes de Wheatstone e outra com os seis circuitos eletrônicos de aquisição de dados. Utilizou-se o conversor AC-DC do modelo TMP 10215 da TRACOPOWER (ver Figura 3.1), que recebe a tensão da rede e devolve, à sua saída, uma tensão DC de ± 15 V, para alimentar os circuitos supramencionados. Ainda com intuito de assegurar a independência do medidor de outros equipamentos externos, desenvolveu-se um oscilador que produz uma onda sinusoidal com as características pretendidas para alimentar os circuitos de aquisição de dados propriamente ditos. Não obstante, garantiu-se com um comutador a possibilidade de alternar entre esse oscilador e um gerador de sinais externo.



Figura 3.1: Conversor AC-DC da TRACOPOWER

A saída de cada um dos seis circuitos de condicionamento de sinal é ligada a um dos canais analógicos da placa de aquisição de dados NI USB-6001 da *National Instruments*. Esta dispõe de 8 entradas analógicas *single-ended* e 4 diferenciais, todas elas com resolução de 14 bits. Lê uma gama de tensões de ± 10 V e a sua sensibilidade é de ≈ 6 mV, possibilitando a obtenção e análise de todos os sinais com relativa precisão.



Figura 3.2: Placa de aquisição de dados NI USB-6001

Foram utilizadas duas placas idênticas à da Figura 3.2, sincronizadas entre si, para proceder à leitura de todos os sinais.

Todos os dezasseis canais de entrada analógica das placas foram utilizados de forma a adquirir as grandezas que se considerou pertinentes no âmbito desta dissertação. Foram, todos eles, utilizados em configuração *single-ended*. Pode consultar-se na Tabela 3.1 quais os sinais recebidos pela placa de aquisição de dados. Para os visualizar e gravar, no computador, utilizou-se o NI DAQExpress. Este *software* tem várias funcionalidades úteis, tanto para a fase de aquisição de sinais como para o pós-processamento dos dados. Não obstante, este último é efetuado em Matlab.

Tabela 3.1: Grandezas adquiridas pela placa de aquisição de dados

Canais	Grandeza a adquirir
Placa 1, Canal AI0	Corrente na fita supercondutora da fase B
Placa 1, Canal AI1	Esforços radiais da fase C
Placa 1, Canal AI2	Esforços axiais da fase C
Placa 1, Canal AI3	Esforços radiais da fase B
Placa 1, Canal AI4	Esforços axiais da fase B
Placa 1, Canal AI5	Esforços radiais da fase A
Placa 1, Canal AI6	Esforços axiais da fase A
Placa 1, Canal AI7	Corrente na fita supercondutora da fase C
Placa 2, Canal AI0	Fluxo magnético na fase A
Placa 2, Canal AI1	Fluxo magnético na fase B
Placa 2, Canal AI2	Fluxo magnético na fase C
Placa 2, Canal AI3	Corrente de linha na fase A
Placa 2, Canal AI4	Corrente de linha na fase B
Placa 2, Canal AI5	Corrente de linha na fase C
Placa 2, Canal AI6	Corrente na fita supercondutora da fase A
Placa 2, Canal AI7	Sinal de controlo do <i>Arduino</i>

As correntes nas três linhas são obtidas com recurso a três sondas de corrente da *Tektronix*.

3.1.1 Circuito oscilador

O circuito oscilador testado e desenvolvido consiste, em primeira instância, no amplificador operacional THS3001CD da *Texas Instruments*, ligado em montagem não-inversora, com um ganho $G_{osc} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx 3$. Este ganho deve, na realidade, ser um pouco maior do que 3 para que se iniciem as oscilações. Na malha de realimentação positiva do amplificador liga-se um circuito RC, cujos valores irão determinar a frequência de oscilação do circuito – no caso, foram escolhidos os valores de $0,01 \mu\text{F}$ para os condensadores C_1 e C_2 e de $39 \text{ k}\Omega$ para as resistências R_3 e R_4 . Garante-se assim uma frequência de oscilação $f_{osc} \approx 400 \text{ Hz}$.

Para o controlo e estabilização da amplitude de saída do oscilador, colocou-se a resistência R_5 em série com o paralelo de dois díodos ligados em sentidos opostos (*diode clamp*) – tudo isto em paralelo com a resistência R_2 . Com isto, assegurou-se que a amplitude da onda gerada pelo oscilador tem $\approx 4 \text{ V}$ pico-a-pico, cumprindo assim os requisitos inicialmente estipulados. A montagem utilizada encontra-se representada na Figura 3.3.

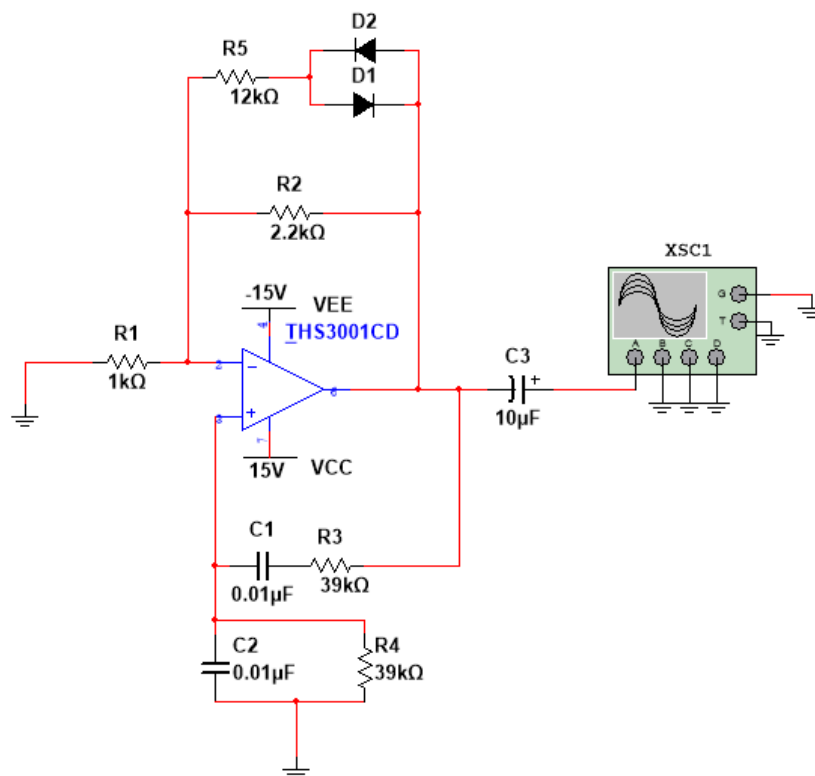


Figura 3.3: Esquema elétrico do circuito oscilador baseado numa Ponte de Wien

3.1.2 Bobinas de Rogowski e respetivo circuito de leitura

Para ler a corrente em cada uma das fitas supercondutoras, foi necessário conceber e calibrar três bobinas de Rogowski idênticas com 75 espiras cada uma e com as dimensões necessárias para que se ajustassem às fitas SAT (ver Figura 3.4).

Estas bobinas foram previamente calibradas recorrendo à montagem representada na Figura 3.5. Para isto, foi necessário colocá-las ao redor de uma fita supercondutora percorrida por vários valores de corrente conhecidos e registar qual a tensão de saída do circuito da Figura 3.6 para cada corrente.

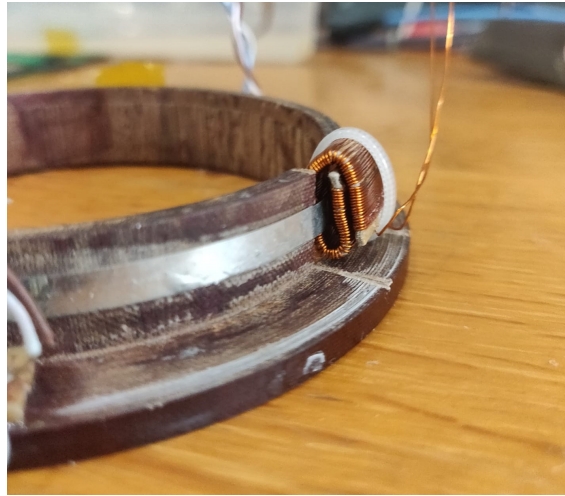
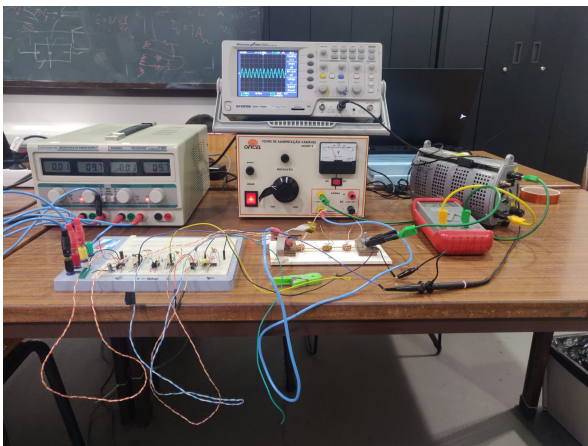
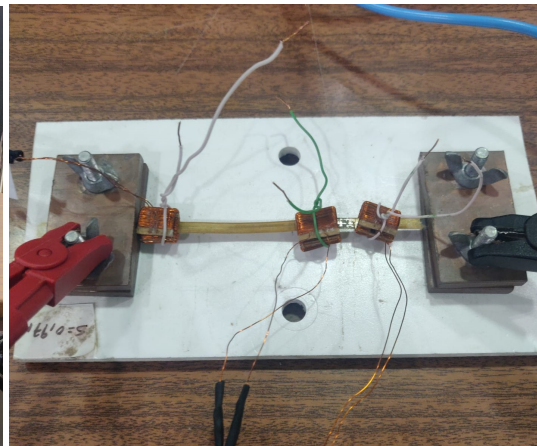


Figura 3.4: Bobina de Rogowski utilizada numa das fitas SAT

Ao verificar que a relação entre a corrente na fita SAT e a tensão de saída do circuito é aproximadamente linear, pôde definir-se um fator multiplicativo a utilizar no pós-processamento para obter a corrente em cada uma das fitas supercondutoras dos limitadores ensaiados.



(a) Montagem laboratorial



(b) Grande plano das bobinas ao redor de uma fita supercondutora

Figura 3.5: Montagem laboratorial para calibração das bobinas de Rogowski

Para a leitura das bobinas de Rogowski, e após consultar o documento [40], decidi utilizar-se o circuito cujo esquema elétrico está representado na figura 3.6.

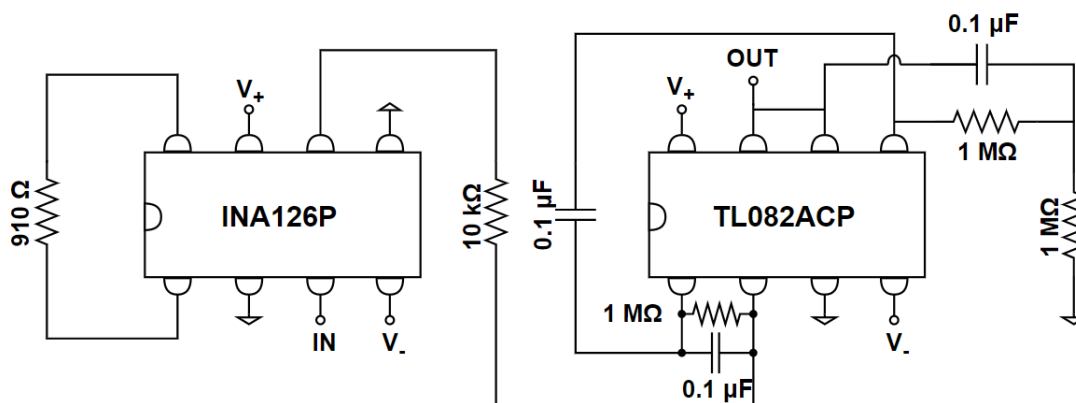


Figura 3.6: Montagem utilizada para a calibração das bobinas de Rogowski

Trata-se de um amplificador de instrumentação à entrada, cujo ganho foi dimensionado para ≈ 90 com a escolha da resistência de 910Ω . Segue-se um circuito integrador ativo com constante de tempo $RC = 1 \text{ ms}$ e um *buffer* à saída. Os detalhes técnicos do circuito podem ser consultados em mais detalhe em [40].

3.1.3 Circuito para condicionamento de sinal

O circuito utilizado para efetuar o condicionamento do sinal tem como base aquele apresentado em [10], à data desenvolvido para um limitador de correntes de defeito monofásico e agora aperfeiçoado e adaptado para um LCDS trifásico (LCDST).

Por cada sinal que se deseja adquirir, tem-se uma ponte de Wheatstone em configuração *Half-Bridge* (ver Figura 3.7) alimentada pelo oscilador acima referido – ver Figura 3.8. De notar que as pontes são excitadas com uma tensão AC por diversas razões que podem ser consultadas em [10], das quais se destacam as seguintes: a excitação AC, para além de eliminar o *offset* associado a um sinal DC, é mais vantajosa no que toca à rejeição de ruído. É ainda pertinente referir que, pelo exposto em [39], a capacidade de dissipação de energia dos extensómetros não permite que a tensão de entrada exceda os 3 V , razão pela qual se utilizou um sinal de 2 V de amplitude. Falar-se-á primeiro dos métodos utilizados para compensar as variações de temperatura e resistência, passando então aos restantes elementos do circuito de condicionamento de sinal.

3.1.3.1 Compensação de temperatura

Os extensómetros são, como referido anteriormente, constituídos por uma malha de um material metálico caracterizado por um coeficiente de expansão linear. Sendo assim, uma

das principais fontes de erro na extensometria tem que ver com as variações de temperatura. Idealmente, a resistência de um extensômetro deveria variar apenas como resultado da deformação. No entanto, os valores de resistividade e sensibilidade do extensômetro também variam com a temperatura – os fios do próprio extensômetro dilatam ou contraem devido às variações de temperatura –, o que provoca erros de medição.

Para minimizar os efeitos desta ocorrência, utiliza-se um extensômetro passivo – *dummy gauge*. Como se ilustra na Figura 3.7, substituiu-se uma das resistências fixas (ver Figura 2.31) por um extensômetro idêntico a R_{EXT1} , de seu nome R_{EXT2} . Este estará, como R_{EXT1} , mergulhado em azoto líquido. No entanto, estará colocado de forma a que não sofra nenhuma deformação mecânica. Com esta configuração, de seu nome *Half-Bridge* ou Meia-Ponte, ambos os extensômetros irão sofrer as mesmas variações de temperatura, mantendo a ponte equilibrada na ausência de deformações.

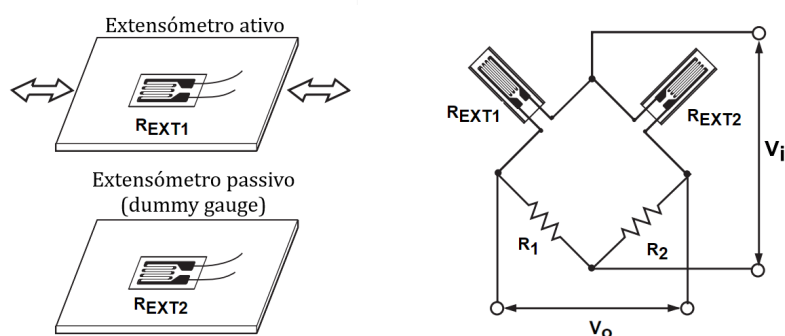


Figura 3.7: Ponte de Wheatstone em configuração Meia-Ponte, em que R_{EXT1} e R_{EXT2} representam os extensômetros ativo e passivo, respectivamente (adaptado de [38])

Com esta configuração, a tensão de saída, V_o , varia de acordo com a expressão:

$$V_o = \frac{U_i}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \text{ [V]} \quad (3.1)$$

onde V_i representa a tensão de excitação, K é o fator de sensibilidade do extensômetro e ε é a deformação sentida.

3.1.3.2 Compensação de variação da resistência

Na montagem utilizada nesta dissertação, a resistência nominal (sem deformação) dos extensômetros utilizados é de 120Ω . Assim sendo, e para montar uma ponte de Wheatstone equilibrada, foram utilizadas resistências de valor idêntico. Não obstante, a resistência do extensômetro pode variar aquando do processo de fixação na fita supercondutora. Assim, mesmo não havendo nenhuma deformação no corpo de prova, a tensão de saída será diferente de zero. Para compensar esta variação de tensão, pode adicionar-se à ponte um potenciômetro R_{POT} (que nos permitirá variar o seu valor até que a tensão aos terminais da ponte seja nula), bem como uma resistência auxiliar R_{AUX} em série com o extensômetro passivo da ponte para facilitar este acerto (ver Figura 3.8).

3.1.3.3 Blocos 1 e 2 do circuito de condicionamento de sinal

O primeiro bloco do circuito de condicionamento de sinal está representado na Figura 3.8.

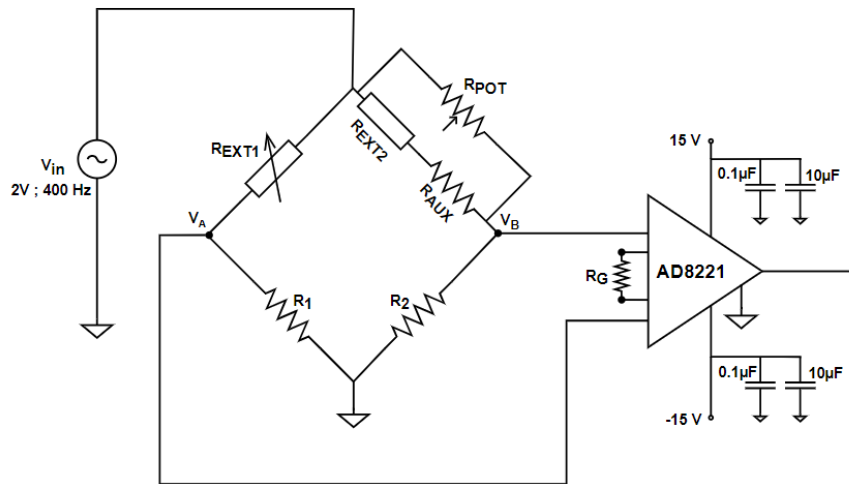


Figura 3.8: Bloco 1 do circuito – ponte de Wheatstone em configuração *half-bridge* com uma *dummy-gauge* ligada ao amplificador AD8221

A saída da ponte, descrita pela diferença entre os seus nós positivo e negativo – V_A e V_B , respetivamente – dá entrada num amplificador de instrumentação de ganho ajustável que devolve a diferença entre os dois sinais que recebe, sendo que V_A e V_B são dados por:

$$\begin{cases} V_A = V_i \cdot \frac{R_2}{R_{EXT1} + R_2} \\ V_B = V_i \cdot \frac{R_{EXT2}}{R_3 + R_{EXT2}} \end{cases} \quad (3.2)$$

A condição para o equilíbrio da ponte é, no caso, a seguinte:

$$R_{EXT1} = (R_{EXT2} + R_{AUX}) // R_{POT} \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

De notar que tanto a resistência R_{AUX} de 30Ω como o potenciómetro R_{POT} (no caso, um potenciómetro de precisão multivolta de $1 \text{ k}\Omega$) têm como finalidade permitir o acerto da ponte.

A verificar-se a igualdade da equação (3.3), medir-se-á tensão nula à saída da ponte, dada por $V_o = V_A - V_B$. Não obstante, o valor de resistência do extensómetro R_{EXT1} irá sofrer uma variação aquando do curto-circuito. Caso sofra uma compressão, a sua resistência irá diminuir. Analogamente, caso a fita supercondutora sofra uma expansão, o valor de resistência de R_{EXT1} aumentará. Assim sendo, uma força compressiva resulta numa saída negativa em que $V_A < V_B$ e uma força de expansão provocará um sinal de saída positivo em que $V_A > V_B$.

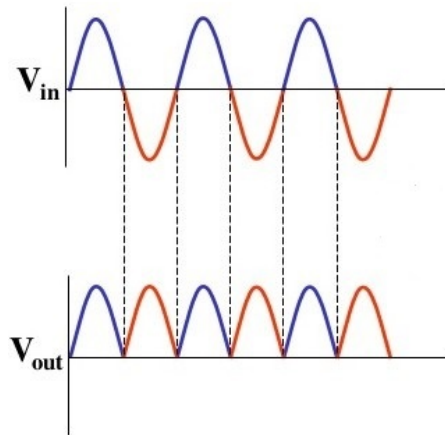


Figura 3.10: Formas de onda antes e depois da retificação de onda completa

Importa, numa fase posterior, filtrar o sinal. O objetivo é converter a deformação sentida por cada extensómetro numa tensão DC que lhe seja proporcional. Para isso, recorreu-se a um filtro RC passa-baixo de terceira ordem dimensionado de acordo com o sinal de entrada, cuja frequência de corte é de $\approx 15 \text{ Hz}$ [39].

Por fim, e após o filtro RC, utilizou-se um *buffer* (também denominado seguidor de tensão), que pretende manter um ganho de potência estável e isolar as várias gamas de impedância do circuito. Atinge-se este objetivo recorrendo ao amplificador operacional duplo OP270 da *Analog Devices*, cujos *offset* e consumo de potência são desprezáveis [10]. Pode consultar-se o esquema elétrico deste segundo bloco do circuito, composto pelo modulador/desmodulador, filtro e *buffer* na Figura 3.11.

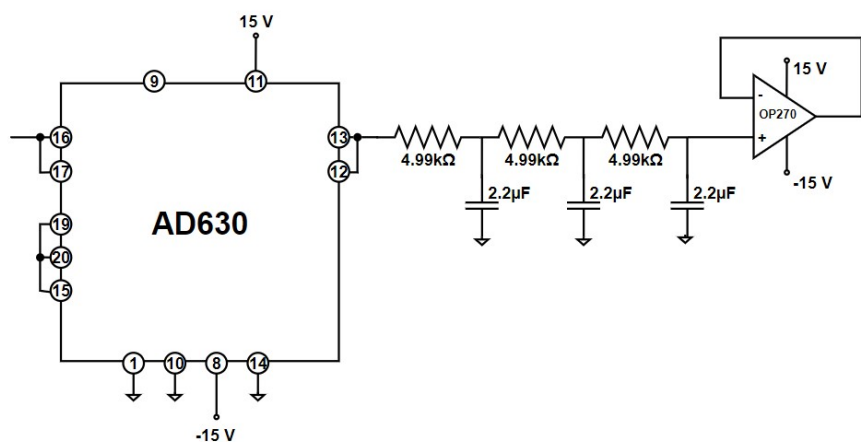


Figura 3.11: Bloco 2 do circuito – modulador/desmodulador, filtro passa-baixo e *buffer*

Como se deseja medir uma deformação axial e uma radial por cada fase, tem-se um total de seis circuitos de aquisição de dados iguais àquele representado em baixo, na Figura 3.12.

3.2. PROCESSO DE FABRICO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCB)

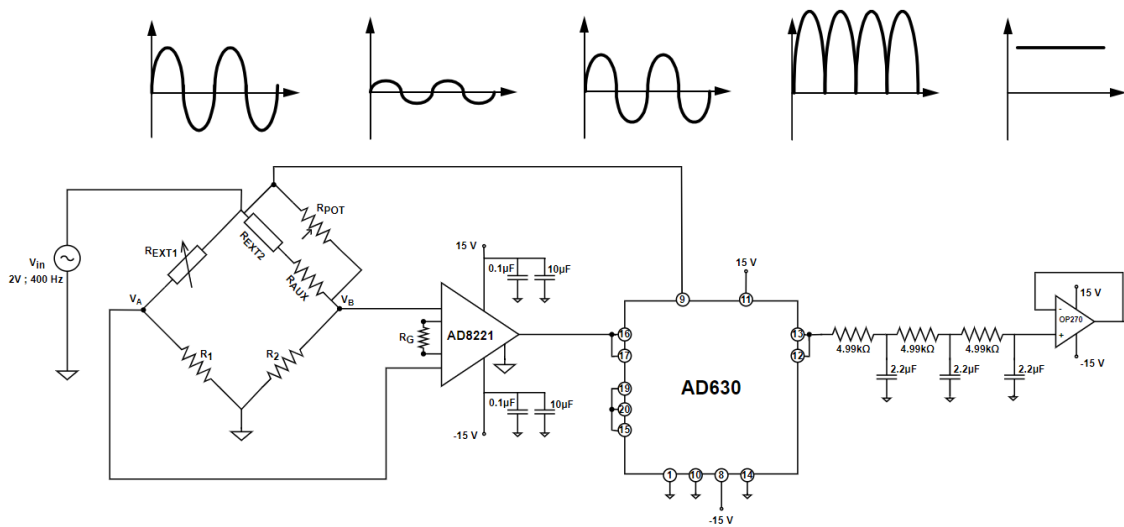


Figura 3.12: Esquema elétrico do circuito utilizado para processamento do sinal referente à deformação medida numa das fases e formas de onda resultantes de cada passo (adaptado de [10])

3.2 Processo de fabrico das placas de circuito impresso (PCB)

De seguida explicar-se-á o processo de fabrico das PCB's dos circuitos anteriormente descritos.

O processo foi semelhante para todas as PCB's:

1. *Design* do circuito em EAGLE, um *software* de projeto de PCB's;
2. Impressão do esquema elétrico numa impressora a laser;
3. Passagem do esquema elétrico do circuito para a PCB;
 - Alinhamento da impressão com a PCB;
 - Passagem da tinta do *toner* para a PCB recorrendo a uma mistura de álcool isopropílico e acetona (≈ 8 unidades de álcool para 3 de acetona);
 - Remoção da folha da impressora;
4. Corrosão do cobre com cloreto de ferro (ver Figura 3.13);
5. Furação das vias com um berbequim de pequena dimensão;
6. Soldadura dos componentes.

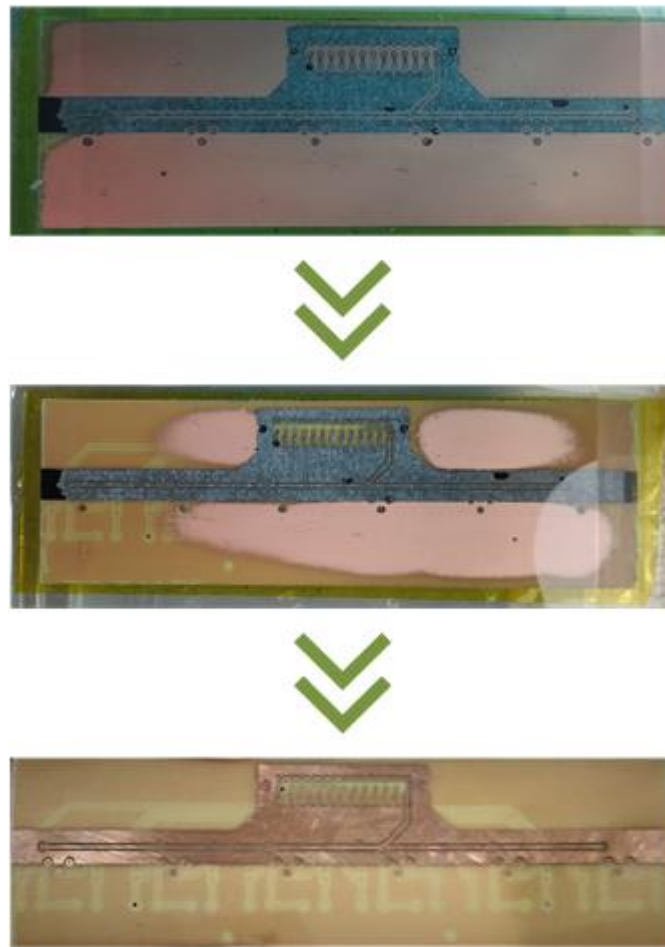


Figura 3.13: Várias fases da corrosão do cobre da PCB das pontes de Wheatstone

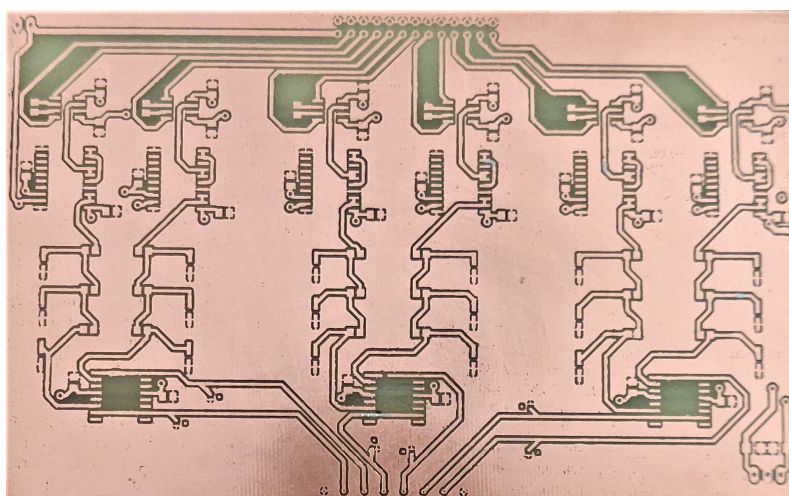


Figura 3.14: PCB de aquisição de dados depois do processo de *etching* e antes da colocação dos componentes

3.3. PÓS-PROCESSAMENTO DOS SINAIS CORRESPONDENTES AOS ESFORÇOS MECÂNICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

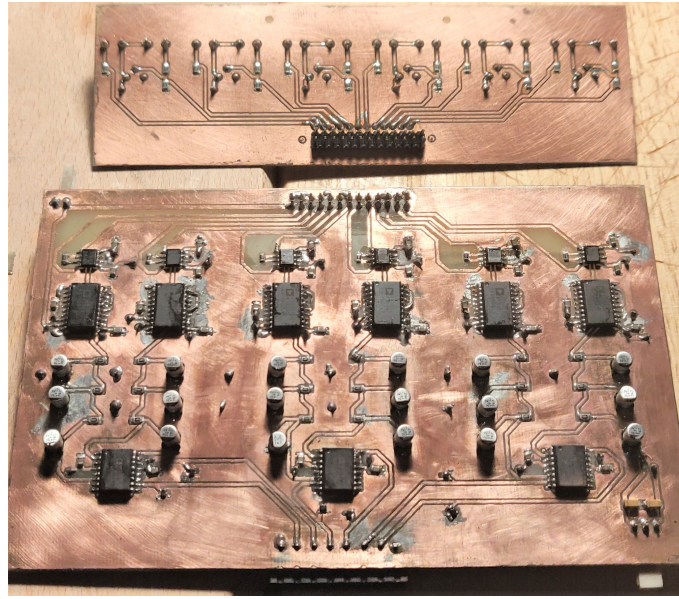


Figura 3.15: PCB's depois do processo de *etching* e após a colocação dos componentes (placa das pontes em cima, placa dos circuitos de aquisição de dados em baixo)

3.3 Pós-processamento dos sinais correspondentes aos esforços mecânicos nas fitas supercondutoras

As tensões referentes aos esforços eletromecânicos nas fitas supercondutoras adquiridas pela placa de aquisição de dados refletem a variação de resistência dos extensômetros. Recupera-se aqui, por uma questão de conveniência, a equação da tensão de saída da ponte de Wheatstone (3.1):

$$V_o = \frac{V_i}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \text{ [V]} \quad (3.6)$$

Uma vez que a saída de cada ponte é manipulada por vários componentes antes da saída do circuito final lida pela placa, é importante alterar a equação anterior para que contemple a influência de todos estes elementos. Os circuitos integrados AD8221 e AD630 têm ganhos $G_1 = 989$ e $G_2 = 2$, respetivamente. Também a retificação de onda completa é tida em consideração, motivo pelo qual se adiciona um fator de $\frac{2}{\pi}$ à expressão anterior e se utiliza a tensão de pico V_p – ver equação (3.5). Resulta então:

$$V_{out} = \frac{V_p}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{2}{\pi} \text{ [V]} \quad (3.7)$$

Resolvendo a equação anterior em ordem a ε , vem o valor da deformação em função da tensão de saída do circuito:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot V_{out}}{V_p \cdot K \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{2}{\pi}} \text{ [V]} \quad (3.8)$$

Uma vez calculado o valor das deformações em ambos os eixos, ε_x e ε_y , pode proceder-se ao cálculo da tensão mecânica a que as fitas supercondutoras estão sujeitas axial e radialmente. No entanto, e como se pode verificar nas Figuras 2.27a e 2.27b, a deformação axial irá influenciar o valor medido no eixo radial e vice-versa. Posto isto, e dado que cada fita é submetida a um estado biaxial de tensões, é necessário recorrer ao sistema de equações (3.9) para calcular as tensões mecânicas em ambos os eixos:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E_y}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \text{ [Pa]} \\ \sigma_y = \frac{E_y}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x) \text{ [Pa]} \end{cases} \quad (3.9)$$

Recorde-se que E_y representa o módulo de Young (ou coeficiente de elasticidade) e ν o coeficiente de Poisson (equação 2.20).

3.4 Preparação dos extensómetros e das fitas supercondutoras

Importa, nesta fase, explanar as metodologias de colagem dos extensómetros e de soldadura das fitas aqui seguidas.

Colagem dos extensómetros

- Passar uma lixa de grão fino com movimentos circulares na área onde se deseja colar o extensómetro e ao seu redor;
- Numa só direção, espalhar um solvente como álcool isopropílico ou acetona na mesma área para remover todos os óleos e gorduras da superfície da fita;
- Colocar uma folha de polietileno entre a fita SAT e o suporte de *Celeron* de forma a evitar que estes fiquem colados um ao outro;
- Colocar o adesivo CC-33A na parte traseira da base do extensómetro e, com uma pinça, aproximá-lo da fita supercondutora, assegurando que se encontra alinhado com a mesma;
- Colar o extensómetro, cobri-lo com uma folha de polietileno e pressionar fortemente durante um minuto e meio;
- Retirar as folhas de polietileno.

Para que o extensómetro sofra a mesma deformação do que a fita supercondutora em estudo, há que o unir à mesma com recurso a um adesivo específico – neste caso, utilizou-se o CC-33A da *Kyowa Electronic Instruments*, que funciona corretamente mesmo a temperaturas criogénicas e está representado na Figura 3.16.



Figura 3.16: Adesivo CC-33A utilizado para colar os extensômetros aos enrolamentos supercondutores (retirado de [43])

A melhor maneira de medir as variações na resistência elétrica de um extensômetro passa por integrar o mesmo numa ponte de Wheatstone, que pretende converter a variação do valor da resistência para uma variação de tensão.

Soldadura das fitas SAT

- Cortar as fitas com o comprimento desejado, tendo em conta as dimensões do suporte;
- Colocar a fita ao redor do suporte e fixá-la com fita de *Kapton*;
- Espalhar um pouco de pasta de soldar com adição de prata (Sn96Ag4) na área em que a fita se irá sobrepor a si mesma;
- Respeitando as temperaturas indicadas pelo fabricante, passar o ferro de soldar na fita até que esta esteja soldada de maneira uniforme.

De salientar que as fitas foram soldadas em configuração *lap joint*, por oposição à *bridge joint*.

3.5 Montagem para o ensaio do LCDS

Como é sabido, as correntes de curto-circuito constituem uma das principais razões que motivam avarias em equipamentos e máquinas elétricas. Assim sendo, e visto que o tema desta dissertação passa pela análise dos esforços eletromecânicos em enrolamentos supercondutores, recorreu-se à montagem apresentada na Figura 3.17 para simular várias tipologias de curto-circuito, quantificar as correntes de defeito que daí advêm e, finalmente, calcular quais as tensões mecânicas a que os enrolamentos supercondutores estarão sujeitos em cada uma das situações apresentadas. De notar que esta montagem em particular remete para o LCDS trifásico apresentado, mais adiante, na Figura 3.18.

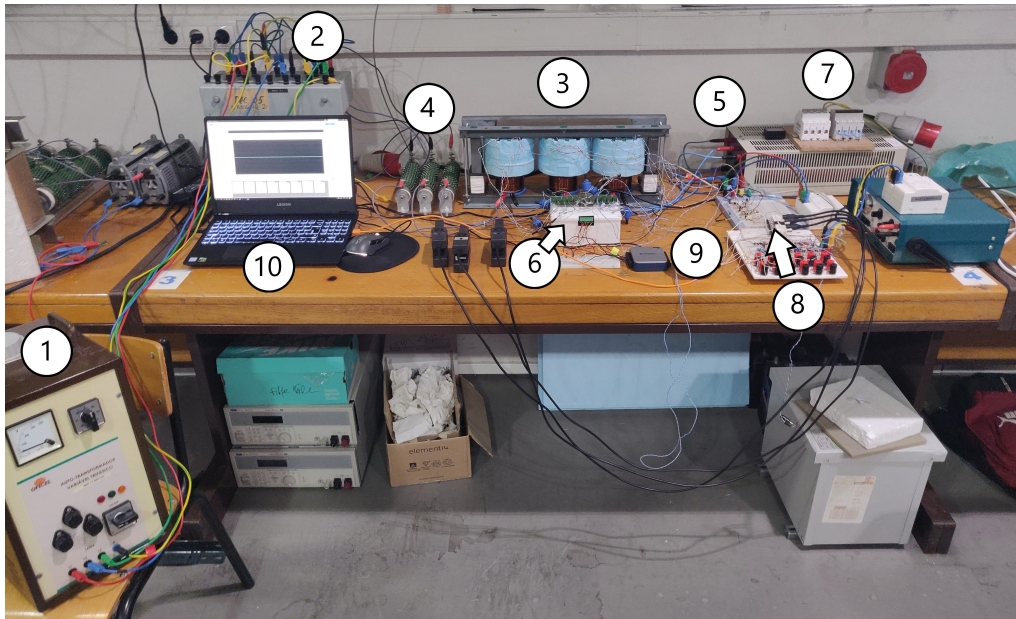


Figura 3.17: Montagem utilizada para o ensaio do LCDST

1. **Auto-transformador variável** → Reduz a tensão de entrada para o valor pretendido nos ensaios;
2. **Transformador de isolamento** → Colocado a seguir ao auto-transformador, isola galvanicamente a montagem experimental, minimizando as correntes de fuga na mesma;
3. **LCDS indutivo do tipo transformador** → Dispositivo de potência em estudo. Para informações detalhadas acerca dos aspetos construtivos deste limitador, consultar [44];
4. **Resistência de linha R_L** → Resistência de 1Ω ;
5. **Resistência de carga R_C** → Resistência de 58Ω ;
6. **Circuito para condicionamento de sinal** → Circuito eletrónico desenvolvido em PCB para condicionamento dos sinais referentes às deformações a medir;
7. **Interruptores** → Dispositivos utilizados para curto-circuitar a carga e, assim, simular uma situação de falha na rede;
8. **Integrador ativo** → Circuito responsável por integrar a tensão aos terminais do secundário do limitador de forma a medir o fluxo em cada fase do mesmo;
9. **Placa de aquisição de dados NI USB-6001** → Adquire diversas grandezas que serão analisadas em *software* apropriado para o efeito;
10. **Computador** → Recebe, grava e processa os dados adquiridos pela placa da NI.

Nalguns dos ensaios, que serão oportunamente referenciados, foi utilizado um relé de estado sólido como interruptor. Recorreu-se um *Arduino Uno* para controlar o SSR (*solid state relay*) e, assim, provocar curto-circuitos de 700 ms.

3.5.1 Dimensionamento das resistências de carga

Uma vez que o autotransformador está equilibrado, ter-se-á a mesma tensão em cada uma das fases. Logo, o dimensionamento para uma delas poderá ser reproduzido nas restantes.

Primeiramente, importa calcular qual a corrente máxima suportada pelo primário do LCDST. Para isto, recorreu-se à equação da força magnetomotriz e da relação entre as correntes do primário e do secundário num transformador, dada por:

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \quad (3.10)$$

Sabe-se que o número de espiras do primário e do secundário é $N_p = 52$ e $N_s = 1$, respetivamente. É ainda sabido que a corrente crítica da fita é de $I_s = 100$ A.

Como tal, a corrente máxima admitida no primário é dada por:

$$52 \cdot I_p = 1 \cdot 100 \Leftrightarrow I_p \approx 1.923 \text{ A} \quad (3.11)$$

Utilizou-se 75% desse valor nos restantes cálculos para que a corrente induzida nas espiras supercondutoras esteja longe da corrente crítica das mesmas, garantindo assim a blindagem do núcleo e evitando que as fitas saturem.

Fixou-se então o valor da corrente nominal em $I_N = 1.44$ A. Assumindo uma tensão de alimentação $V_p = 85$ V (ou seja, $V_{ef} \approx 60$ V), vem, pela Lei de Ohm, o valor da resistência a utilizar em cada uma das fases da montagem:

$$R_L + R_C = \frac{U_{in}}{I_p} \Leftrightarrow R_C = \frac{85}{1.44} - 1 \approx 58 \Omega \quad (3.12)$$

Estabeleceu-se, desta forma, o valor da resistência de carga R_C a utilizar nos ensaios para garantir a corrente nominal supracitada.

3.5.2 LCDS

O limitador de correntes de defeito supercondutor indutivo do tipo transformador (ou de núcleo blindado) exhibe, como o nome indica, comportamento semelhante ao de um transformador. Porém, o LCDST tem o seu secundário curto-circuitado. Este compõe-se, em cada fase, de uma só espira de fita supercondutora de segunda geração de YBCO (SCS4050 da *SuperPower*). As fitas têm 0,1 mm de espessura, 4 mm de largura e corrente crítica de ≈ 100 A. As três fitas supercondutoras, curto-circuitadas, foram colocadas em suportes de *Celeron*. Escolheu-se este material pelas suas propriedades térmicas e mecânicas – nomeadamente o seu baixo coeficiente de expansão térmica –, tendo em conta as baixas temperaturas a que será submetido [10].

Por seu turno, o primário é composto por uma bobina de cobre com 52 espiras em cada uma das fases. Esta está enrolada num suporte de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), um material dielétrico de custo reduzido [44].

Em regime de funcionamento normal, o núcleo ferromagnético vê o seu fluxo blindado por ação das fitas supercondutoras – a força magnetomotriz do secundário curto-circuitado reproduz-se no primário. Desta forma, já que não existe fluxo no núcleo magnético do LCDST, não haverá tensão aos terminais do limitador.

Por outro lado, em regime de curto-circuito, o fluxo magnético no núcleo sobe acima da capacidade de blindagem da fita e isso faz com que esta deixe de ser capaz de blindar completamente o núcleo. Por este motivo, passa a existir uma queda de tensão aos terminais do LCDS. Impõe-se assim uma impedância na linha, o que faz com que as elevadas correntes de curto-circuito sejam fortemente mitigadas.

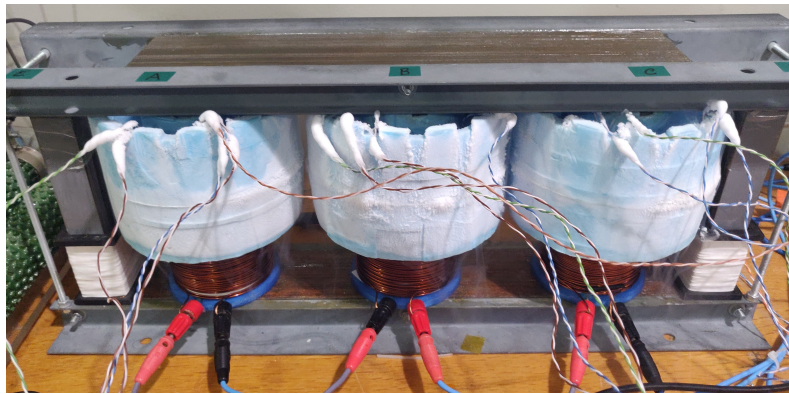


Figura 3.18: Limitador de correntes de defeito supercondutor trifásico indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios

As colunas centrais do LCDST têm degraus. Não obstante, o formato da sua secção assemelha-se ao de um círculo. As colunas exteriores, por outro lado, têm uma secção retangular que tem metade do valor da área da secção das colunas centrais [44]. As colunas centrais têm 65 mm de diâmetro e a chapa magnética de grão não-orientado que compõe o núcleo tem 0,50 mm de espessura. Como se pode verificar mais adiante, na Figura 4.3, as colunas exteriores só fazem parte do circuito magnético quando é colocada a travessa mais comprida – topologia *shell*. Em contrapartida, na topologia tradicional é utilizada a travessa mais curta (como na Figura 3.18). Na configuração *shell* adiciona-se dois caminhos magnéticos para que o fluxo se possa fechar pelas extremidades, evitando assim que se tente fechar pelos caminhos magnéticos das outras fases e para que, por exemplo, no caso de um c.c. fase-terra, este fluxo não influencie as fases sãs.

Ensaiou-se também o LCDS monofásico desenvolvido em [45] e apresentado na Figura 3.19 para estabelecer um termo comparativo. Foram ensaiadas três configurações, a primeira com uma e a segunda e a terceira com duas fitas supercondutoras no secundário. O primário é, em todos os ensaios, constituído por uma bobina de cobre de 50 espiras.

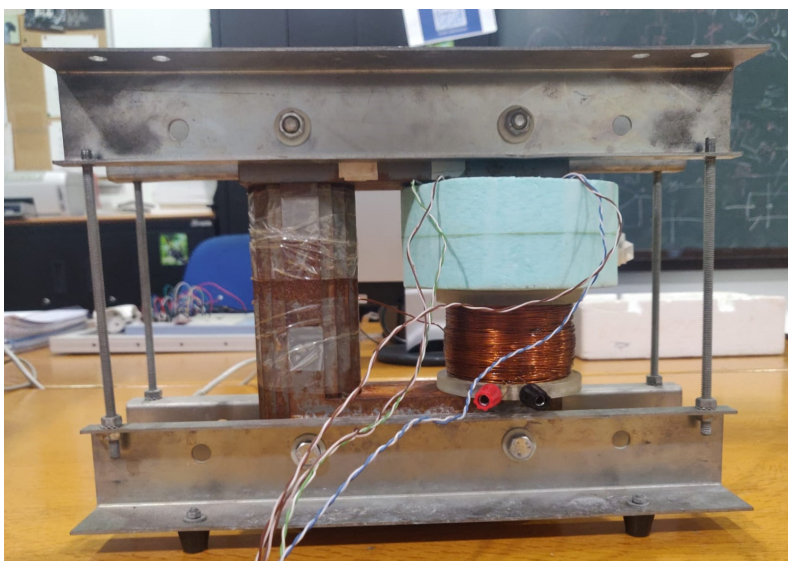


Figura 3.19: Limitador de correntes de defeito supercondutor monofásico indutivo do tipo transformador utilizado nos ensaios

MEDIÇÕES, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Simulações pelo Método dos Elementos Finitos

Com o intuito de validar, ou não, os resultados experimentais, fez-se um conjunto de simulações computacionais pelo método dos elementos finitos. Para isso, recorreu-se ao *Flux2D*, um *software* de simulação numérica que utiliza o método dos elementos finitos (FEM) e que permitiu modelizar o LCDS. Posteriormente, avaliou-se o desempenho do LCDS em regime de operação normal e em situação de curto-circuito para, assim, estabelecer um termo comparativo entre a simulação e os ensaios físicos. Elaborou-se o modelo axissimétrico do LCDS indutivo monofásico do tipo transformador representado nas Figuras 4.1 e 4.2 e utilizou-se o conjunto de valores apresentado na Tabela 4.1 para as simulações.

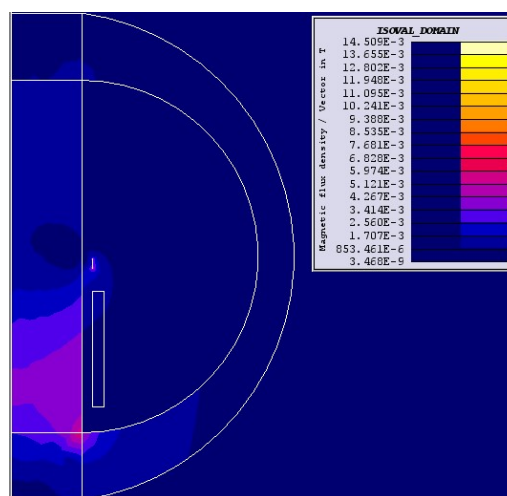


Figura 4.1: Modelo de simulação do LCDS indutivo monofásico do tipo transformador em regime de operação normal

Uma vez que se efetuou uma simulação 2D, utilizou-se esta geometria porque acaba por ser a que mais se aproxima de um modelo tridimensional. Este tipo de modelo axissimétrico com o núcleo fechado já havia sido desenvolvido em [3].

Representa-se na Figura 4.1 a densidade de fluxo no limitador simulado antes da falha. Como se pode observar, o núcleo encontra-se blindado e o seu valor de densidade de fluxo magnético é bastante reduzido (entre $1,7 \times 10^{-3}$ T e $5,97 \times 10^{-3}$ T).

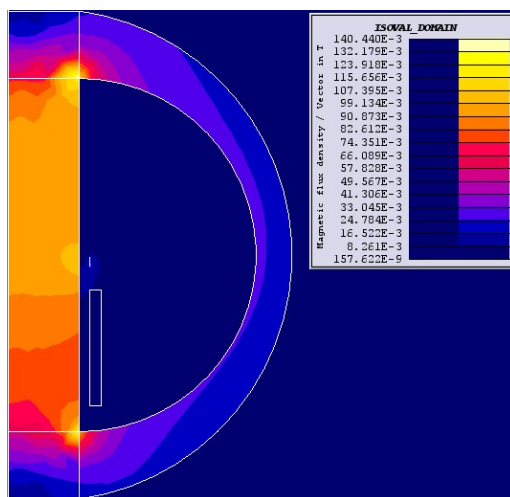


Figura 4.2: Modelo de simulação do LCDS indutivo monofásico em regime de falha

Analogamente, pode verificar-se na Figura 4.2 que, depois do curto-circuito da carga, a fita satura e o núcleo deixa de estar blindado. Inverte-se então o cenário anterior e existe, nesta altura, um valor de densidade de fluxo magnético no núcleo superior ao que se registou no caso anterior, atingindo o seu máximo em 0,14 T. Seria neste momento que, numa situação real, o limitador passaria a impor uma impedância na rede pelo facto de o núcleo já não estar blindado magneticamente. Apresenta-se na Tabela 4.1 o conjunto de valores utilizados nas simulações pelo método dos elementos finitos:

Tabela 4.1: Valores utilizados nas simulações pelo método dos elementos finitos

Grandeza	Valor
Tensão de alimentação	$60 V_{ef}$
Frequência	50 Hz
Resistência de linha	1Ω
Resistência de carga	58Ω
Resistência infinita	$40 \times 10^9 \Omega$
Resistência nula	$0,1 \times 10^{-6} \Omega$

Simulou-se ainda, para estabelecer um termo comparativo, o mesmo limitador com duas espiras supercondutoras distribuídas axialmente e retiraram-se as curvas da densidade de força vs largura da fita que podem ser vistas na Figura 4.22, na secção 4.4.2.2.

De notar que as simulações foram efetuadas para se ter uma previsão de onde as forças são mais intensas, pelo que a relação comparativa entre as Figuras 4.1 e 4.2 é mais

relevante do que os valores de densidade de fluxo em si.

4.2 Procedimento experimental

Para assegurar que se obtêm resultados rigorosos ao mesmo tempo que se garante a segurança de todas as pessoas e equipamentos envolvidos nos ensaios, há que respeitar o procedimento experimental que se vai passar a descrever.

Numa primeira fase, e ainda com o autotransformador desligado, verifica-se todas as ligações presentes na Figura 3.17 com o intuito de asseverar o seu rigor. Ainda antes de colocar azoto líquido nos crióstatos do LCDST, procede-se ao acerto das seis pontes através dos potenciômetros de precisão multivolta de resistência máxima de $1\text{ k}\Omega$, R_{POT} . Quer com isto assegurar-se que todos os extensómetros estão bem colados e que todas as ligações entre o medidor (que já deve, nesta fase, estar alimentado) e a placa de aquisição de dados foram corretamente efetuadas. Concluídos estes despistes, coloca-se o azoto líquido nos três crióstatos do limitador.

Procede-se, nesta fase, ao acerto efetivo das seis pontes de Wheatstone; os extensómetros são constituídos por uma malha metálica que possui um determinado coeficiente de expansão linear, pelo que a baixa temperatura do azoto líquido faz variar os valores de resistência R_{EXT1} e R_{EXT2} e obriga a novo acerto das pontes antes do início do ensaio propriamente dito. Pode ainda dar-se o caso de os extensómetros estarem colados na fita com algum ângulo de desvio, o que acaba por resultar numa variação de tensão aos terminais da ponte que precisa de ser compensada.

Estabelecidas estas condições iniciais de equilíbrio, liga-se o autotransformador e alimenta-se o circuito com a tensão utilizada nos dimensionamentos efetuados em 3.5.1 ($V_{ef} = 60\text{ V}$). Garante-se assim que o valor da corrente crítica das fitas supercondutoras não é ultrapassado.

É neste momento que se dá início à gravação dos dados no *DAQExpress* – sensivelmente dois segundos antes do curto-circuito, ainda que este valor não seja exatamente igual ao longo dos ensaios. Esta recolha só é interrompida quando todos os sinais das distensões estabilizam depois da falha, numa situação em que já não existem esforços nas fitas e a corrente já estabilizou. Esta janela de tempo permite que se analisem todos os dados pertinentes, tanto no momento do curto-circuito como na recuperação do limitador após o mesmo.

Utilizou-se dois métodos distintos para curto-circuitar a carga. Nas situações em que a intenção era provocar um curto-circuito fase-terra, utilizou-se o relé de estado sólido. Nas restantes situações, e devido ao facto de existir apenas um SSR no laboratório, recorreu-se ao disjuntor representado na Figura 3.17. Este foi ligado e desligado manualmente, sendo que a duração das falhas não é tão constante ao longo dos vários ensaios como no primeiro método, que permitiu definir uma duração fixa para todos os curto-circuitos – no caso, 700 ms.

Obtidas todas as ondas, e após a sua estabilização, suspende-se a gravação dos dados. Por fim, é neste estágio que se procede à análise e tratamento dos dados adquiridos ao longo de todos os ensaios. É importante ter em conta que existem vários fatores que podem influenciar os resultados obtidos nos diversos ensaios, tais como as variações de temperatura, pressão e de humidade, a existência de campos eléctricos e/ou magnéticos, o envelhecimento do material e alguma imprecisão de leitura que possa advir dos instrumentos de medida.

4.3 Configurações utilizadas nos ensaios laboratoriais

O limitador de corrente utilizado, cujos aspetos construtivos podem ser consultados em mais detalhe em [44], tem duas travessas superiores distintas – uma delas é mais longa do que a outra, completando o caminho que inclui as duas colunas exteriores do núcleo ferromagnético; esta topologia é denominada *shell* (ver Figura 4.3 a)). A outra travessa, sendo mais curta, não engloba estas colunas e isso faz com que o caminho magnético do núcleo se resuma às três colunas centrais – esta é a topologia trifásica tradicional (Figura 4.3 b)). Pode ver-se a morfologia de ambas as travessas na Figura 4.4.

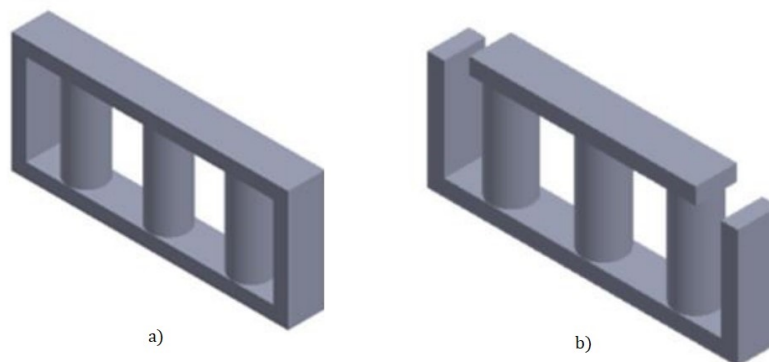


Figura 4.3: Topologias dos núcleos utilizados nos ensaios do LCDST; a) Topologia trifásica do tipo *shell*; b) Topologia trifásica tradicional (retirado de [44])

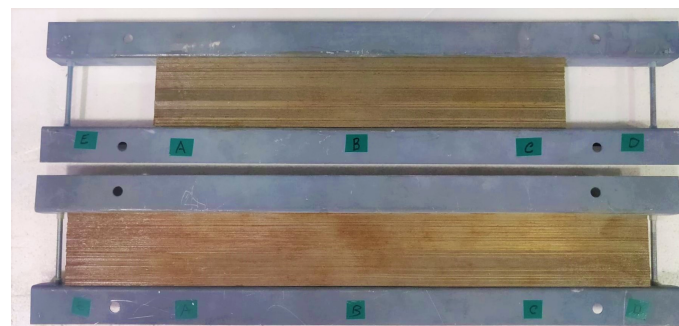


Figura 4.4: Travessas do LCDST: em cima, a do núcleo tradicional; em baixo, a do núcleo *shell*

Para o ensaio do limitador monofásico, foram utilizadas três configurações distintas – a primeira com apenas uma espira SAT de YBCO, a segunda com duas espiras distribuídas axialmente e a terceira com as mesmas duas espiras, mas desta feita dispostas de maneira concêntrica. Pode observar-se uma representação gráfica destas três configurações na Figura 4.5.

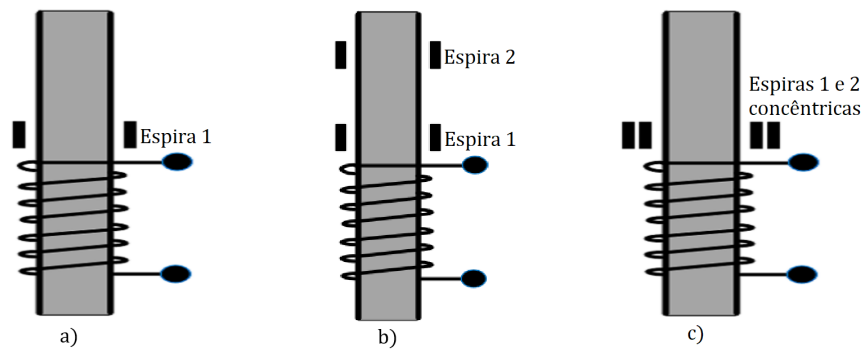


Figura 4.5: Configurações utilizadas nos ensaios do LCDS monofásico; a) Com uma espira supercondutora; b) Com duas espiras supercondutoras distribuídas axialmente; c) Com duas espiras supercondutoras concêntricas (adaptado de [10])

Ao longo das secções que se seguem irá fazer-se a análise e comparação dos esforços eletromecânicos a que as fitas SAT foram submetidas ao longo dos vários ensaios com as configurações aqui mencionadas.

4.4 Resultados e análise dos esforços eletromecânicos nas fitas supercondutoras

Com o intuito de aferir a validade – ou não – do método utilizado, foram realizados vários ensaios em cada uma das topologias e configurações supramencionadas; uma vez que os resultados se mostraram coerentes entre si, irá apresentar-se apenas a representação gráfica de um dos ensaios por cada configuração em cada um dos LCDS.

4.4.1 Limitador de correntes de defeito supercondutor trifásico

Expor-se-á, ao longo desta secção, os resultados obtidos na sequência do ensaio de vários curto-circuitos em ambos os núcleos do LCDST. Ensaiou-se as falhas mais comuns passíveis de suceder nas redes de transporte e distribuição de energia elétrica. São elas:

- Fase-Terra
- Fase-Fase-Terra
- Trifásico-Terra

Como exposto na secção 3.5.1, as resistências de linha e de carga têm 1Ω e 58Ω , respetivamente. As resistências de carga, colocadas depois do limitador de corrente, serão curto-circuitadas com o intuito de fazer com que a corrente na linha aumente substancialmente. Consequentemente, será possível obter o valor dos esforços eletromecânicos a que estas estão sujeitas em cada uma das situações de curto-circuito. É importante apontar as diversas condições comuns a todos os ensaios. São elas:

- Frequência de 50 Hz em regime alternado sinusoidal;
- Tensão de alimentação de 85 V ($V_{ef} = 60$ V);
- Resistências de linha $R_L = 1 \Omega$;
- Resistências de carga $R_C = 58 \Omega$;
- Enrolamentos primários do LCDST com $N_p = 52$ espiras de cobre e secção de $1,5 \text{ mm}^2$;
- Enrolamentos secundários do LCDST com $N_s = 1$ espira de YBCO;
- Enrolamentos para a leitura de fluxo no primário do LCDST com $N_3 = 100$ espiras de cobre e secção de $0,5 \text{ mm}^2$.

4.4.1.1 Curto-circuito da fase B à terra com ambos os núcleos

A primeira situação de falha provocada nos ensaios foi o curto-circuito da fase B à terra, cujo esquema elétrico pode ser consultado na Figura 4.6. Como se expôs na secção 4.3, tanto esta como as restantes falhas foram ensaiadas nos dois núcleos do LCDST e os gráficos relativos aos esforços eletromecânicos nas fitas em ambas as topologias estão retratados nas Figuras 4.7 e 4.8.

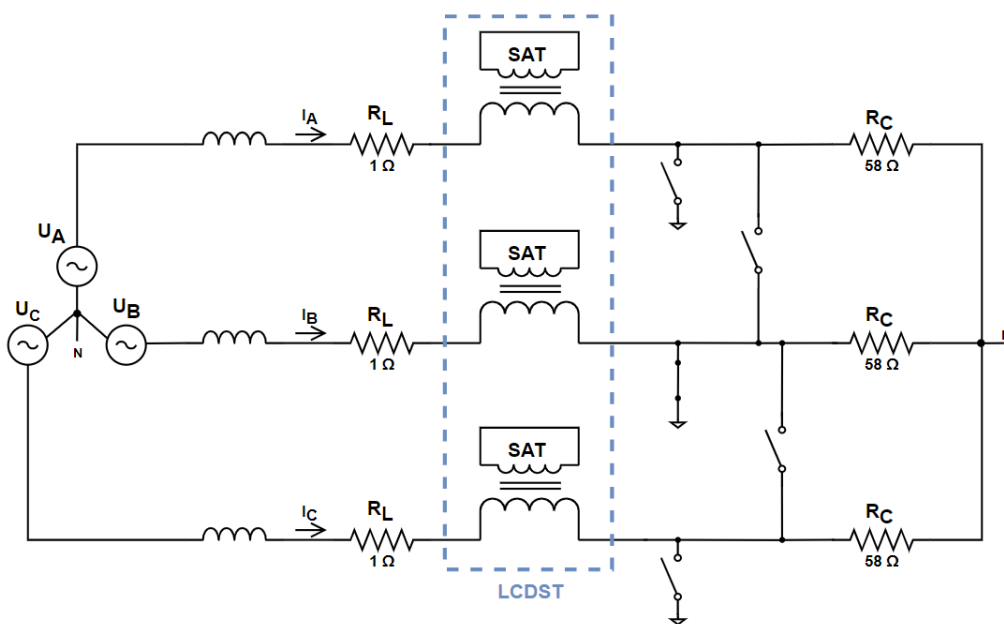


Figura 4.6: Esquema elétrico do ensaio de um curto-circuito fase-terra no LCDST

4.4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ELETROMECHANICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

Alguns dos curto-circuitos foram provocados, tal como se afirmou no capítulo do procedimento experimental, com recurso a um SSR controlado por um *Arduino*. O objetivo desta metodologia é garantir que todos os curto-circuitos assim provocados têm exatamente a mesma duração – no caso, de 700 ms. No núcleo tradicional, e como se pode ver na Figura 4.7, o curto-circuito começa cerca dos 2,1 segundos e termina perto dos 2,8 segundos de ensaio. O núcleo *shell*, por outro lado, vê a sua falha compreendida aproximadamente entre os 1,8 e os 2,5 segundos.

Houve diversos comportamentos que se mantiveram constantes ao longo dos vários ensaios e que se irá passar a enunciar: nos momentos que precedem e pospõem o curto-circuito, é notório ao longo de todos os gráficos das tensões mecânicas que não existem esforços significativos nas fitas SAT – isto apesar dos campos magnéticos e correntes que lá existem. Antes do curto-circuito, as tensões mecânicas sentidas nas fitas são nulas devido ao facto de o núcleo estar blindado. Por outro lado, no instante em que se aplica o curto-circuito na carga, as resistências dos extensómetros variam quase instantaneamente por ação das deformações sentidas nas fitas. As deformações axiais atingem o seu pico e começam imediatamente a decrescer em valor, ao passo que as radiais mantêm o seu valor máximo durante mais tempo antes da descida. Regra geral, e salvo alguma exceção pontual, as tensões radiais apresentam maiores valores de magnitude e duração do que as axiais relativas à mesma fase. De notar que os valores de tensão mecânica apresentados nos gráficos resultam do pós-processamento dos sinais de saída dos circuitos feito em *Matlab* com recurso às equações (3.8) e (3.9).

É ainda pertinente referir que, para que a comparação entre as forças axiais e radiais que atuam numa fita seja válida, apenas deve ser feita se os valores forem adquiridos durante o mesmo ensaio e nas mesmas condições.

Por fim, e antes da análise deste ensaio em particular, importa justificar o facto de os sinais das tensões mecânicas não atingirem o seu pico com tanta rapidez como, por exemplo, a corrente de curto-circuito. Atribui-se este ligeiro atraso ao tempo de resposta mais lento das deformações presentes no limitador ou, em alternativa, ao facto de a fita supercondutora aquecer durante o curto-circuito. Nesta situação, o extensómetro de compensação de temperatura não sofre o mesmo aquecimento do que o extensómetro ativo, o que é passível de desequilibrar a ponte.

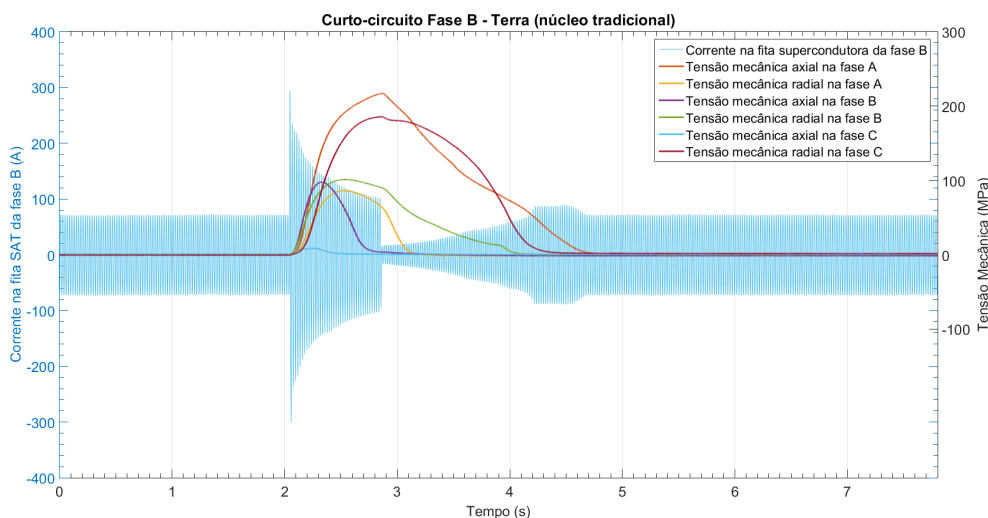


Figura 4.7: Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fase B - Terra com o núcleo tradicional

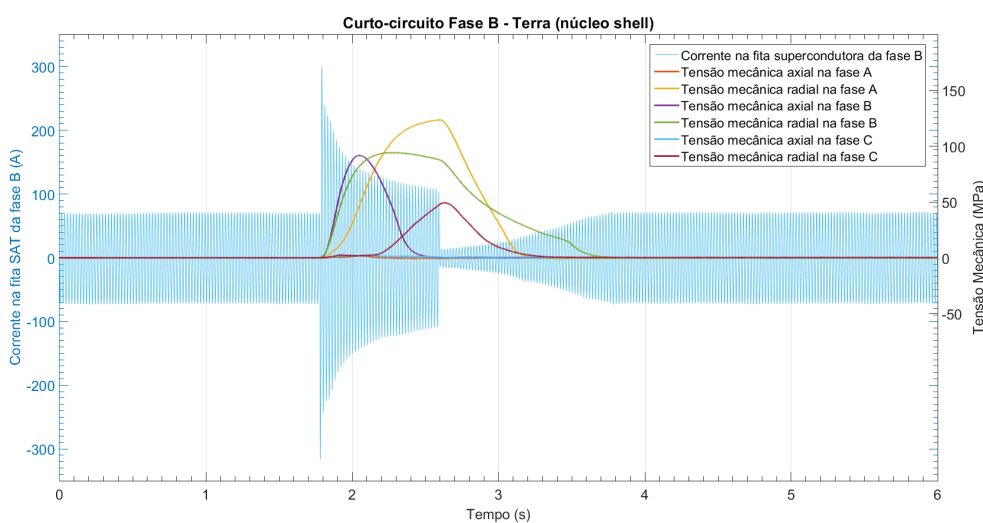


Figura 4.8: Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fase B - Terra com o núcleo *shell*

Como se pode observar nos gráficos das Figuras 4.7 e 4.8, o núcleo *shell* mitiga fortemente os efeitos das forças eletromecânicas nas fitas supercondutoras das fases A e C. A tensão mecânica axial na fase A, que com o núcleo tradicional é de ≈ 217 MPa, foi completamente anulada aquando da utilização do núcleo *shell*. Não obstante, o valor da tensão mecânica radial na fase A apresenta um ligeiro aumento com esta topologia. Tanto a tensão mecânica axial como a radial na fase B apresentam valores semelhantes em ambas as topologias, todos eles entre 91,81 MPa e 101,25 MPa. Isto era expectável, já que esta é a fase em que se provocou o defeito. A fase C, por seu turno, sofre apenas 26% das tensões mecânicas axial e radial no núcleo *shell*, em comparação com o núcleo tradicional.

4.4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

Tabela 4.2: Valores recolhidos em ambos os núcleos durante o curto-circuito da fase B à terra no LCDST

Grandeza	Núcleo Tradicional	Núcleo Shell
T. M. axial máxima na fase A [MPa]	217,31	1,73
T. M. radial máxima na fase A [MPa]	86,23	123,68
T. M. axial máxima na fase B [MPa]	97,75	91,81
T. M. radial máxima na fase B [MPa]	101,25	94,2
T. M. axial máxima na fase C [MPa]	8,6	2,25
T. M. radial máxima na fase C [MPa]	185,78	49,39
Corrente máxima na fita SAT da fase A [A]	219,2	185,6
Corrente máxima na fita SAT da fase B [A]	294,2	299,85
Corrente máxima na fita SAT da fase C [A]	262,7	187,5
Corrente de linha máxima na fase B [A]	17,84	12,4
Corrente de linha B em operação normal [A]	1,47	1,59
Corrente na fita SAT B em op. normal [A]	72	70,5

É de assinalar ainda que, na primeira topologia, a corrente no enrolamento secundário cresce em relação ao seu valor inicial antes de recuperar totalmente e retomar o seu funcionamento normal. Por outro lado, as duas colunas adicionais do *shell* permitem uma recuperação mais expedita. Estas colunas laterais criam um caminho magnético adicional para que o fluxo associado à fase afetada pela falha se feche por aí, não afetando as fases sãs. Isto deve-se ao facto de estas colunas apresentarem um valor de permeabilidade magnética substancialmente mais alto do que as três colunas interiores. Pelo exposto, o fluxo tem tendência a seguir por este caminho no núcleo *shell*, fazendo assim com que os campos de dispersão axial e radial sejam menores nas colunas interiores. Consequentemente, os esforços mecânicos nas fitas supercondutores são minimizados por ação das duas colunas adicionais do *shell*.

No *shell*, o fluxo é derivado para as colunas laterais. Logo, este deve afetar menos as fases A e C do que no tradicional. Por outro lado, no presente ensaio provocou-se um curto-circuito na fase B, o que faz com que os valores de fluxo e tensão mecânica nesta fase sejam semelhantes em ambos os núcleos.

A corrente no secundário na fase B atinge o seu pico antes da saturação em ≈ 300 A para os dois cenários. Os restantes valores recolhidos durante ambos os ensaios estão listados na Tabela 4.2. Por último, é importante realçar que os maiores valores de tensão mecânica obtidos durante as falhas fase-terra no LCDST foram de 217,31 MPa e 185,78 MPa, ambas no núcleo tradicional. Estes valores representam apenas 31% e 26,5% da tensão mecânica crítica das fitas (700 MPa, ver [46]). Fica então provado que a integridade estrutural das espiras SAT não foi posta em causa em nenhuma das topologias do núcleo e que as deformações nas fitas são do tipo elástico.

4.4.1.2 Curto-circuito das fases B e C à terra com ambos os núcleos

Numa fase posterior, e uma vez ensaiado o curto-circuito da fase B à terra, provocou-se outra falha; desta feita, curto-circuitou-se as fases B e C à terra, como é verificável na Figura 4.9. Ao contrário do que havia acontecido no cenário anterior, aqui não foi possível garantir a mesma duração para ambas as falhas pelo facto de não haverem SSR's disponíveis; no entanto, utilizando o disjuntor manual, tentou fazer-se com que o tempo de curto-circuito fosse semelhante para os dois núcleos do LCDST. Porém, o núcleo tradicional acabou por suportar uma falha de duração ligeiramente superior do que a *shell*.

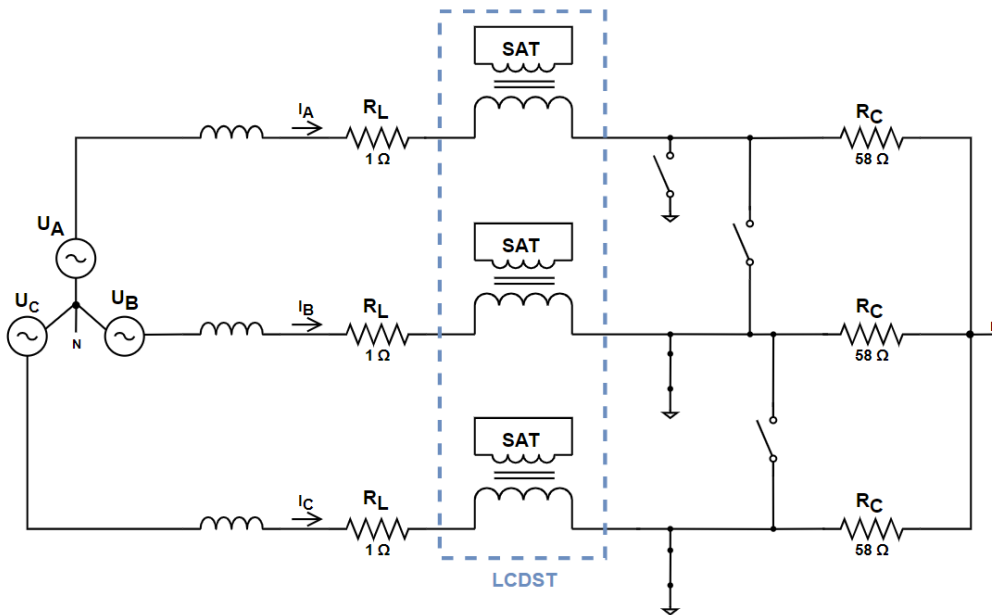


Figura 4.9: Esquema elétrico do ensaio de um curto-circuito fase-fase-terra no LCDST

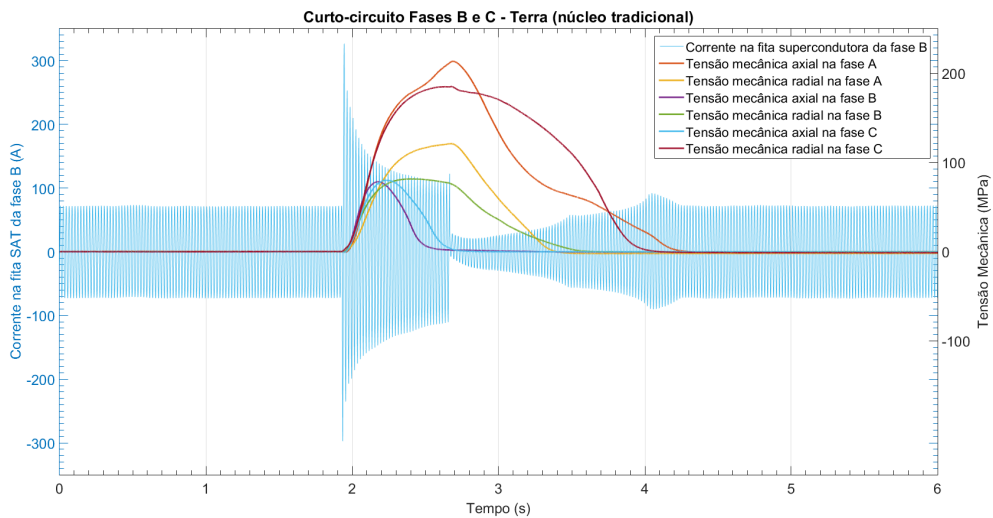


Figura 4.10: Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fases B e C - Terra com o núcleo tradicional

4.4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑNICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

As formas de onda da corrente e das tensões mecânicas nas fitas SAT para ambos os ensaios estão representadas nas Figuras 4.10 e 4.11.

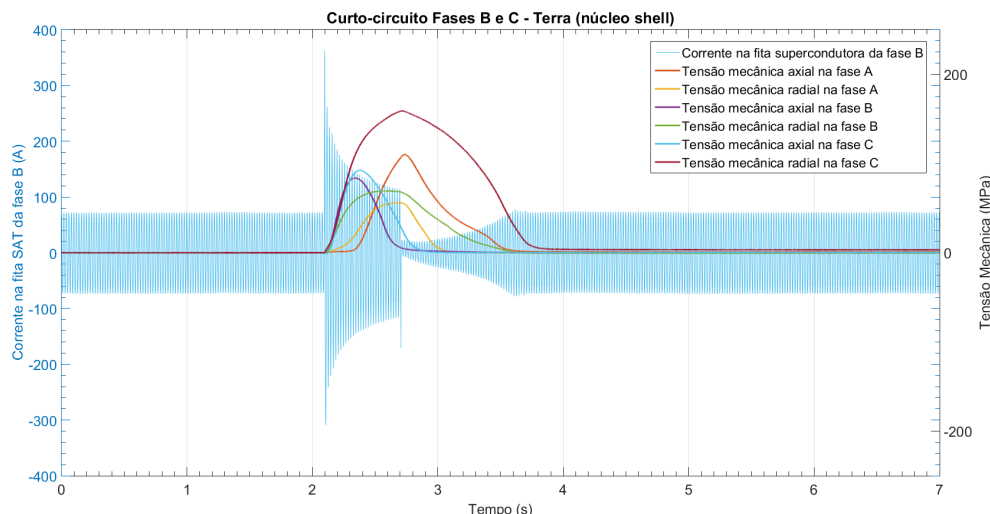


Figura 4.11: Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito Fases B e C - Terra com o núcleo *shell*

Analogamente ao que havia sucedido no ensaio do c.c. fase-terra, também aqui é notória a ação das duas colunas exteriores do *shell* no que à limitação dos esforços eletromecânicos nas fitas SAT diz respeito – especialmente na fase A.

Tabela 4.3: Valores recolhidos em ambos os núcleos durante o curto-circuito das fases B e C à terra no LCDST

Grandeza	Núcleo Tradicional	Núcleo Shell
T. M. axial máxima na fase A [MPa]	213,53	110,11
T. M. radial máxima na fase A [MPa]	121,15	56,15
T. M. axial máxima na fase B [MPa]	78,6	83,86
T. M. radial máxima na fase B [MPa]	81,65	69,34
T. M. axial máxima na fase C [MPa]	80,1	92,54
T. M. máxima radial na fase C [MPa]	185,23	159,07
Corrente máxima na fita SAT da fase A [A]	256,6	220,47
Corrente máxima na fita SAT da fase B [A]	326,56	361,74
Corrente máxima na fita SAT da fase C [A]	329,01	290,84
Corrente de linha máxima na fase B [A]	15,52	17,2
Corrente de linha B em operação normal [A]	1,47	1,59
Corrente na fita SAT B em op. normal [A]	73,31	72,45

Pode verificar-se, pelos gráficos das Figuras 4.10 e 4.11 e pela Tabela 4.3, que os esforços axiais e radiais na fase A foram fortemente mitigados aquando da utilização do *shell*, em comparação com o ensaio no núcleo tradicional. Os esforços axiais na fase A foram minimizados em 51,6%, ao passo que os radiais sofreram uma redução de 46,3% nesta topologia. Tal como no curto-circuito fase-terra, a fase B não vê nenhuma alteração

substantial nos esforços que a afetam pelo facto de ser uma das fases afetadas pelo curto-circuito e se encontrar mais distante das colunas exteriores. A fase C, por seu turno, tem esforços axiais 15% mais elevados no núcleo *shell* do que no tradicional de três colunas, o que não era expectável (apesar de se tratar de uma das fases afetadas e estar próximo de uma das colunas exteriores do núcleo). Não obstante, os esforços radiais na fase C são mitigados em 14% em comparação com o ensaio análogo no núcleo tradicional. É natural que as fases afetadas pela falha não vejam nenhuma alteração substancial nas tensões mecânicas que as afetam, independentemente do núcleo em estudo; porém, e como se pode constatar pelos dados apresentados na Tabela 4.3, a fase que não foi contemplada pelo curto-circuito vê os seus esforços bastante mitigados por ação das colunas exteriores do *shell*.

Os maiores valores de tensão mecânica aqui registados (ambos durante o ensaio com o núcleo tradicional) foram de 213,53 MPa e 185,23 MPa, valores esses que representam apenas 30,5% e 26,5% daquela que é a tensão mecânica crítica das fitas de YBCO. Garante-se assim que a sua integridade estrutural não foi comprometida em nenhuma das topologias utilizadas neste ensaio e que toda e qualquer deformação que possa atingir as fitas SAT é elástica e não plástica.

4.4.1.3 Curto-circuito das três fases à terra com ambos os núcleos

O último ensaio realizado no LCDST foi o do curto-circuito das três fases à terra. Esta falha foi provocada de forma semelhante à anterior (fase-fase-terra), com recurso ao mesmo disjuntor. O esquema elétrico referente a esta montagem está representado na Figura 4.12.

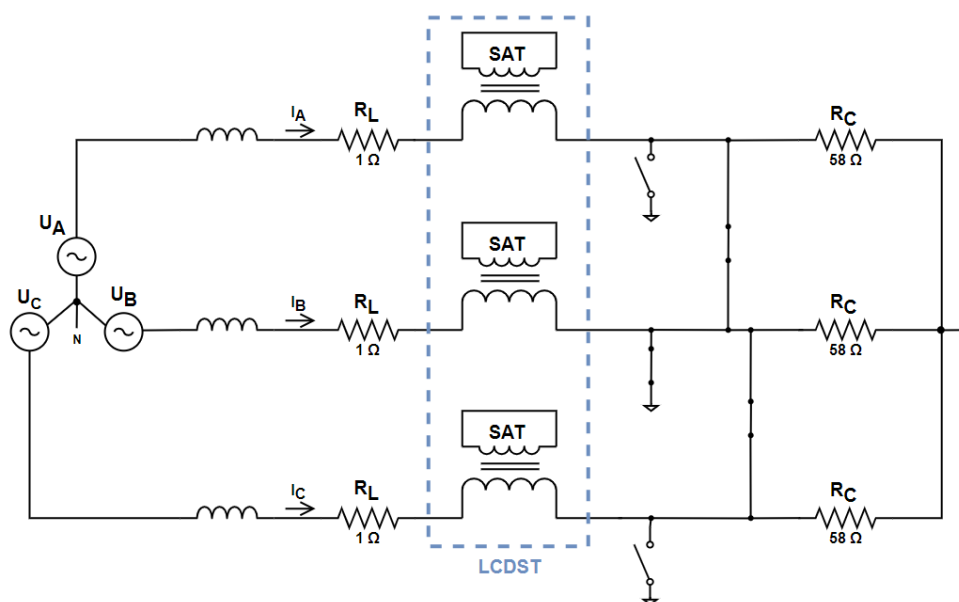


Figura 4.12: Esquema elétrico do ensaio de um curto-circuito das três fases à terra no LCDST

Por sua vez, as formas de onda da corrente e das tensões mecânicas das espiras

4.4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑNICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

de YBCO em ambos os núcleos ferromagnéticos estão retratadas nas Figuras 4.13 e 4.14 (núcleo convencional e *shell*, respetivamente).

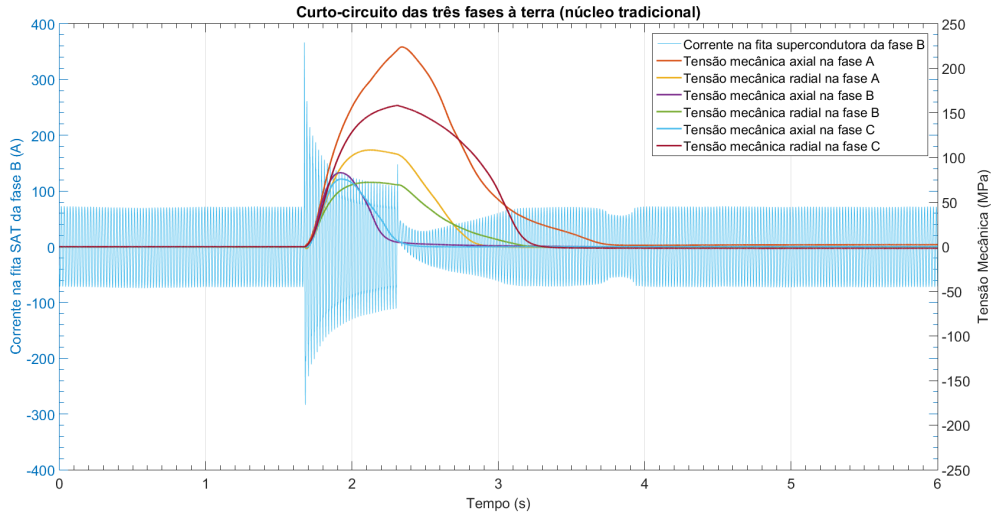


Figura 4.13: Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito das três fases à terra com o núcleo tradicional

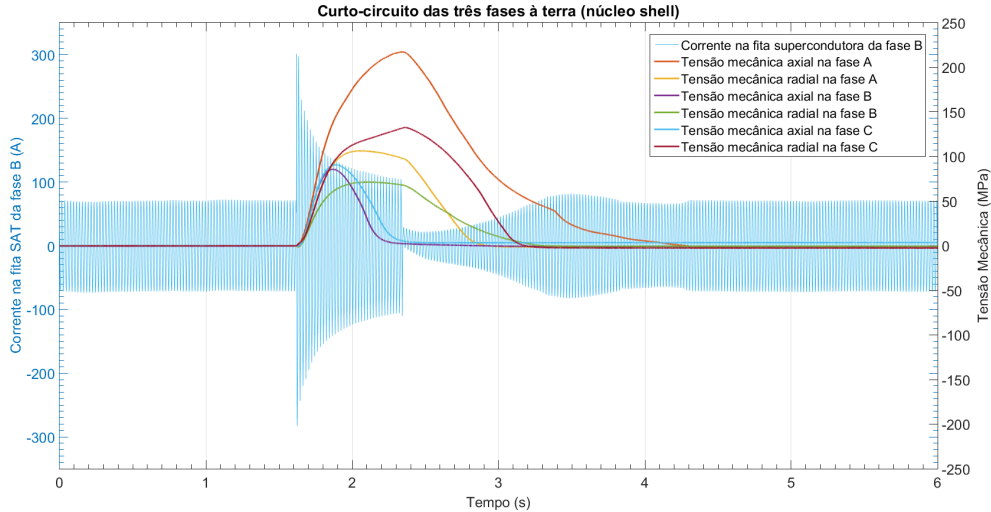


Figura 4.14: Corrente e tensões mecânicas nas fitas supercondutoras durante um curto-circuito trifásico com o núcleo *shell*

O curto-circuito trifásico influencia, como o nome indica, as três fases do LCDST e, consequentemente, as tensões mecânicas nas fitas supercondutoras são semelhantes em ambas as topologias – ver Tabela 4.4. Não se registou, neste caso, a ação do *shell* no que toca à inibição dos esforços eletromecânicos nas fitas SAT. Uma vez que as três fases são contempladas pela falha, existe variação do fluxo magnético em todas e este não se dispersa pelas colunas exteriores do *shell* como aconteceu em ambas as situações anteriores,

em que as forças nas fases não afetadas pela falha foram fortemente atenuadas nesta topologia.

Tabela 4.4: Valores recolhidos em ambos os núcleos durante o curto-circuito das três fases à terra no LCDST

Grandeza	Núcleo Tradicional	Núcleo Shell
T. M. axial máxima na fase A [MPa]	224,04	217,36
T. M. radial máxima na fase A [MPa]	108,49	106,36
T. M. axial máxima na fase B [MPa]	83,26	85,78
T. M. radial máxima na fase B [MPa]	73,76	71,46
T. M. axial máxima na fase C [MPa]	75,92	90,85
T. M. máxima radial na fase C [MPa]	158,55	132,64
Corrente máxima na fita SAT da fase A [A]	277,64	284,43
Corrente máxima na fita SAT da fase B [A]	366,52	301,37
Corrente máxima na fita SAT da fase C [A]	279,81	345,96
Corrente de linha máxima na fase B [A]	18,48	12,3
Corrente de linha B em operação normal [A]	1,47	1,59
Corrente na fita SAT B em operação normal [A]	71,58	71,36

Registou-se, porém, que as correntes máximas no primário e secundário da fase B em situação de falha são menores no núcleo *shell* do que no tradicional, apesar de a corrente em regime de funcionamento normal ser menor em ambos os casos. Tratando-se de um c.c. trifásico, as correntes têm valores um pouco diferentes – isto pode dever-se ao facto de o núcleo ser antigo e estar já oxidado, o que é passível de provocar assimetrias no circuito magnético. Também aqui os valores de *stress* nas fitas SAT estão muito aquém da tensão mecânica crítica de 700 MN/m^2 , sendo que os mais expressivos correspondem a apenas 30% daquele valor. Mais uma vez se conclui que toda e qualquer deformação das fitas supercondutoras é elástica e não plástica, pelo que não existem danos provocados nas espiras.

Ao longo dos ensaios, particularmente na topologia tradicional do núcleo, considerou-se que o valor registado pelo extensómetro relativo à deformação axial na fase A do LCDS poderia ser algo exagerado. Atribuiu-se este fenómeno ao extensómetro em si que, por ser mais antigo, é passível de não estar em perfeitas condições de funcionamento. Isto não põe em causa, no entanto, a validade da generalidade dos resultados.

4.4.2 Limitador de correntes de defeito supercondutor monofásico

Terminados os ensaios no LCDST, ensaiou-se um limitador de correntes de defeito monofásico em três situações: com uma e com duas espiras SAT de YBCO no secundário, primeiro distribuídas axialmente e, posteriormente, dispostas de maneira concêntrica (ver Figura 4.5). Nos três casos foi provocado um curto-circuito fase-terra recorrendo, mais uma vez, ao SSR e ao *Arduino Uno*. Os curto-circuitos têm duração fixa de 700 ms.

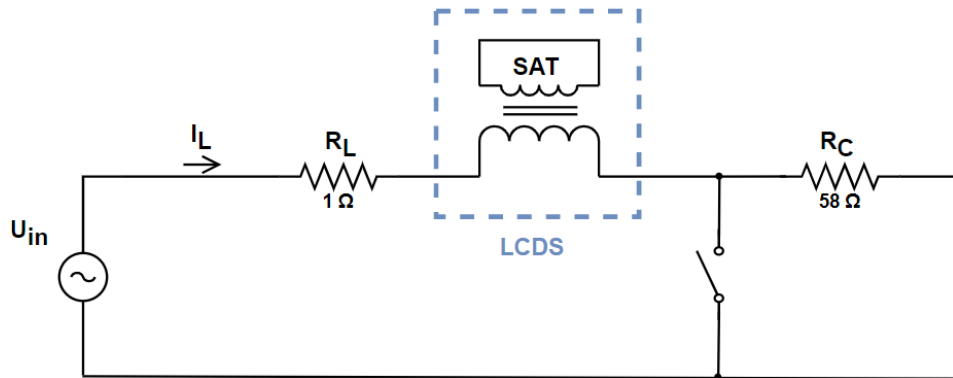


Figura 4.15: Esquema elétrico do ensaio do LCDS monofásico

Serão apresentados ao longo das próximas secções os gráficos das correntes e tensões mecânicas no secundário para cada uma das configurações ensaiadas, bem como o gráfico resultante de uma das simulações computacionais. No final, representar-se-á numa tabela os valores obtidos e far-se-á o respetivo estudo comparativo das três topologias em que se ensaiou o LCDS monofásico.

4.4.2.1 Curto-circuito fase-terra com uma espira supercondutora no secundário – configuração (a)

No primeiro ensaio efetuado no LCDS monofásico, o secundário é composto somente por uma espira de fita de YBCO. Recupera-se aqui, por uma questão de conveniência, a imagem ilustrativa desta configuração (Figura 4.16).

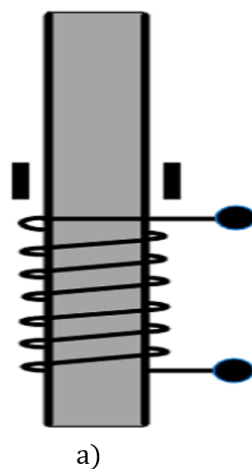


Figura 4.16: Diagrama ilustrativo da configuração (a) utilizada nos ensaios do LCDS monofásico

A corrente na espira supercondutora e as tensões mecânicas ali detetadas estão retratadas na Figura 4.17. Na Figura 4.18, por sua vez, está representada a forma de onda da corrente de linha durante o mesmo ensaio.

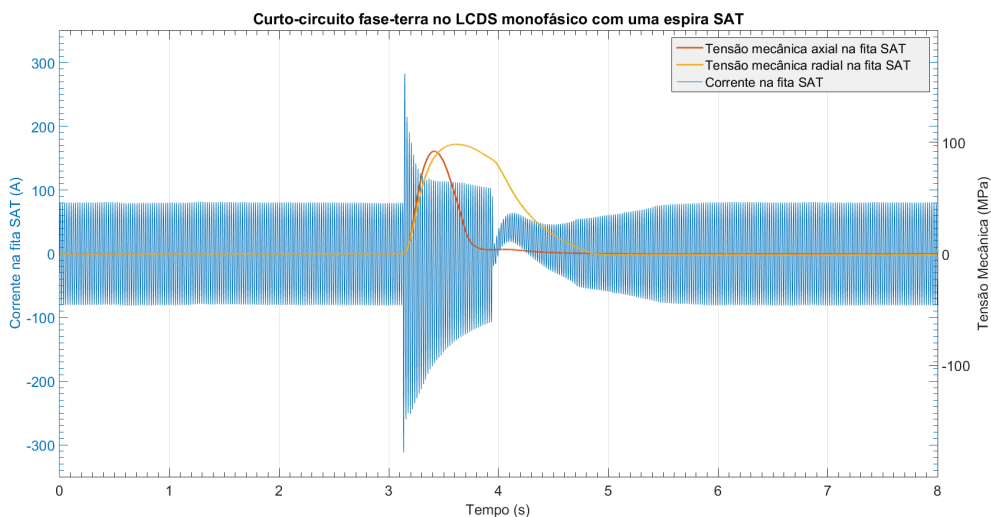


Figura 4.17: Corrente e tensões mecânicas na fita supercondutora durante um curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com uma espira SAT (configuração (a))

As tensões mecânicas axial e radial registadas vão de encontro ao que se expectava, tanto na sua forma de onda como no seu valor quantitativo. A deformação axial atinge o seu pico e desce de imediato, ao passo que a radial mantém uma gama de valores elevados durante mais tempo antes de começar a decrescer. Por outro lado, observa-se ainda que a tensão mecânica axial apresenta um valor máximo um pouco menor do que a radial (92,06 MPa e 98,17 MPa, respetivamente).

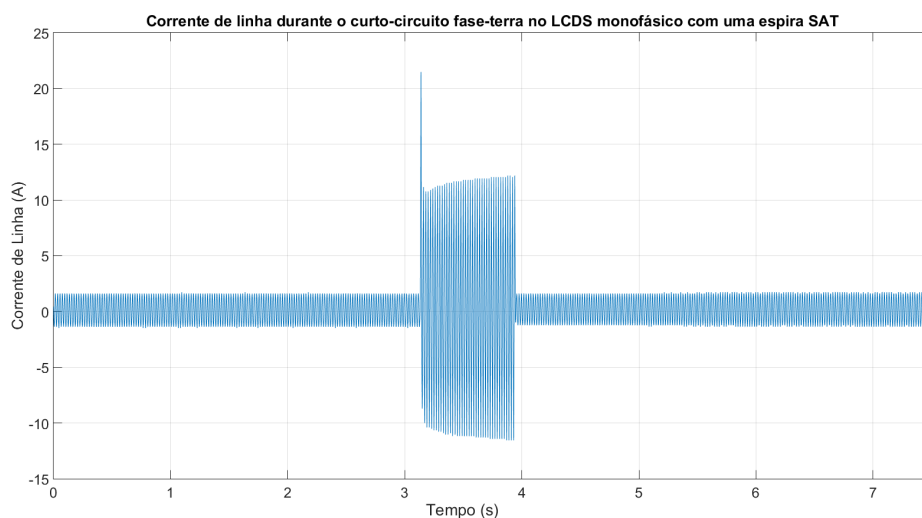


Figura 4.18: Corrente de linha durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com uma só espira SAT (configuração (a))

4.4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ELETROMECCÂNICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

Sabe-se que a corrente de linha durante o funcionamento normal do limitador tem 1,6067 A e que a bobina de cobre do primário tem 50 espiras. Resulta então, pela equação da força magnetomotriz, a corrente induzida no secundário:

$$1,6067 A \times 50 \text{ espiras} = 80 A.e$$

Observa-se na Figura 4.17 que este é precisamente o valor de corrente que se registou durante o regime de funcionamento normal na espira SAT do LCDS.

4.4.2.2 Curto-circuito fase-terra com duas espiras supercondutoras distribuídas axialmente no secundário – configuração (b)

Nesta segunda configuração, o secundário do LCDS compõe-se de duas espiras supercondutoras, cada uma no seu suporte, distribuídas axialmente e acima do enrolamento primário, conforme ilustrado na Figura 4.19. Pretende-se, com este ensaio, entender de que forma a densidade de fluxo radial influencia os esforços eletromecânicos nas fitas supercondutoras.

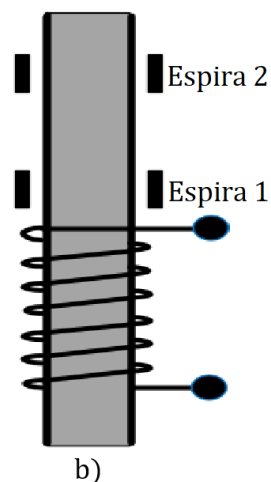


Figura 4.19: Diagrama ilustrativo da configuração (b) utilizada nos ensaios do LCDS monofásico

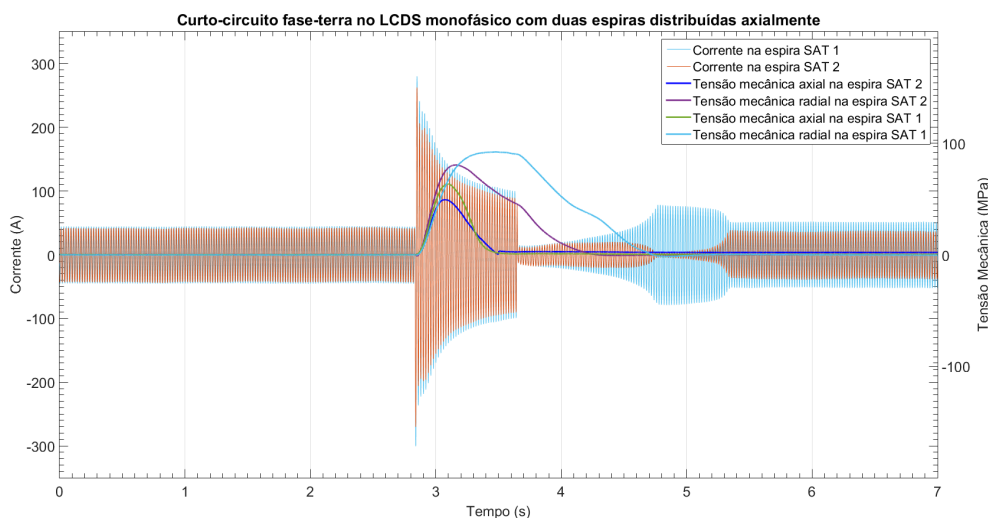


Figura 4.20: Corrente e tensões mecânicas na fita supercondutora durante um curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT distribuídas axialmente (configuração (b))

As forças mecânicas, tanto radiais como axiais, são maiores na espira 1, que se encontra mais perto do primário. Isto deve-se ao facto de o campo de dispersão ser mais intenso nas proximidades do enrolamento primário. Como mais campo se traduz em forças maiores, era expectável que as tensões mecânicas tivessem valores maiores na espira 1 do que na espira 2; também em [27] se chegou a esta conclusão. A Figura 4.20 mostra que o ensaio realizado foi de encontro a essas expectativas. A tensão mecânica radial máxima é 14% superior na espira 1. Da mesma forma, a T.M. axial registada na espira 1 é 28,5% superior à que se observou na espira 2.

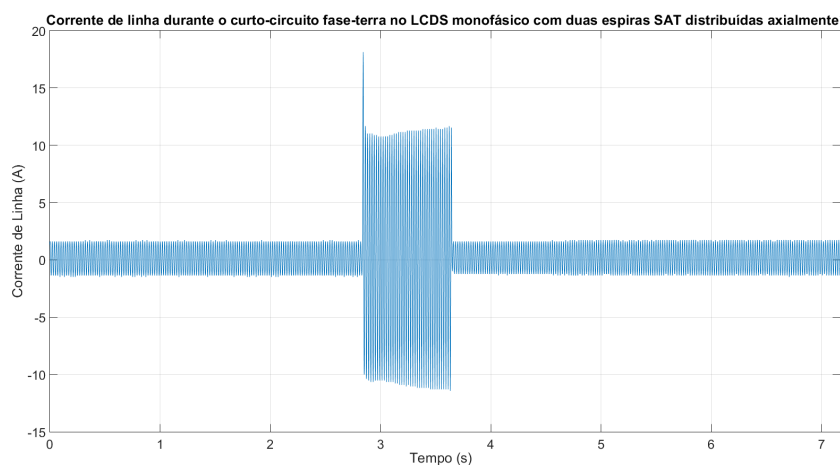


Figura 4.21: Corrente de linha durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT distribuídas axialmente (configuração (b))

4.4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ELETROMECAÑNICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

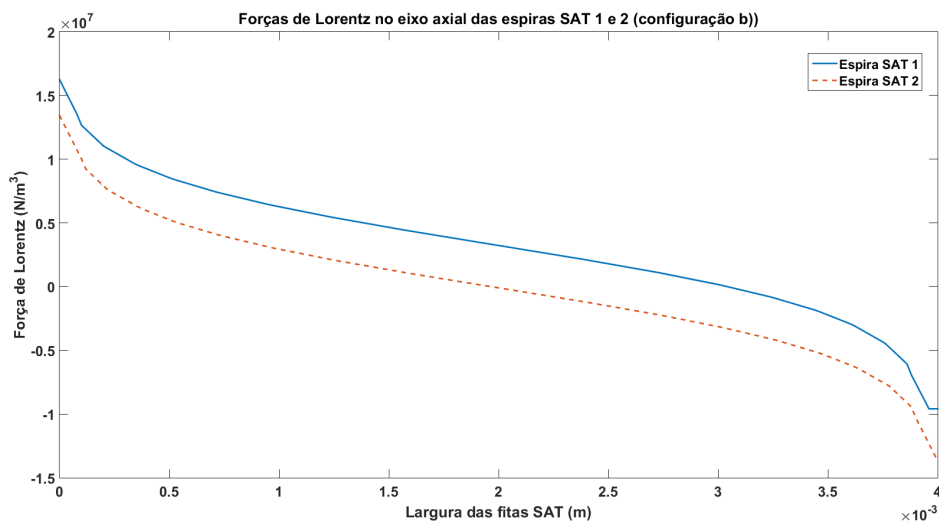


Figura 4.22: Forças de Lorentz no eixo axial das espiras SAT 1 e 2 (configuração (b))

Verifica-se também, através das simulações computacionais pelo método dos elementos finitos, que as forças de Lorentz presentes ao longo do eixo axial das fitas SAT têm valor superior na espira mais próxima do primário, como se pode comprovar na Figura 4.22. Este resultado corrobora os que se obteve experimentalmente, em que também as forças eletromecânicas que incidem na fita 1 têm magnitude superior às registadas na fita SAT 2.

Não obstante, há que ter em conta que as forças de Lorentz resultantes das simulações computacionais são volumétricas, pelo que apenas se analisou em que espira é que as forças são mais intensas para comparar com os resultados laboratoriais, e não os valores em si. Estas simulações FEM têm como objetivo evidenciar onde é suposto que as forças sejam mais intensas.

4.4.2.3 Curto-circuito fase-terra com duas espiras supercondutoras concêntricas no secundário – configuração (c)

Para a realização deste ensaio foi necessário soldar uma fita adicional, com diâmetro ligeiramente superior ao das três já utilizadas nos ensaios anteriores, para que pudesse ser colocada ao redor de uma delas. Isolou-se esta nova espira SAT com fita de *Kapton* na sua face interior para que não houvesse contacto entre a fita supercondutora e os contactos dos extensómetros do enrolamento de dentro. Posto isto, e colados os extensómetros nesta nova espira SAT, procedeu-se ao ensaio seguindo a metodologia utilizada nos restantes. Em termos de nomenclatura, considerou-se que a espira de menor diâmetro – portanto, a que está no interior – seria a espira 1 e que a exterior, de maior diâmetro e mais afastada do núcleo, seria a espira 2.

Pretende-se, com este ensaio, entender de que forma a densidade de fluxo axial influencia os esforços eletromecânicos nas fita supercondutoras. Ilustra-se, na Figura 4.23, a configuração utilizada em laboratório no LCDS. Por seu turno, na Figura 4.24 estão

representadas as formas de onda da corrente na fita SAT e das tensões mecânicas ali registadas.

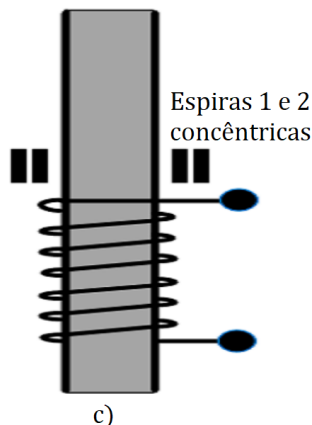


Figura 4.23: Diagrama ilustrativo da configuração (c) utilizada nos ensaios do LCDS monofásico

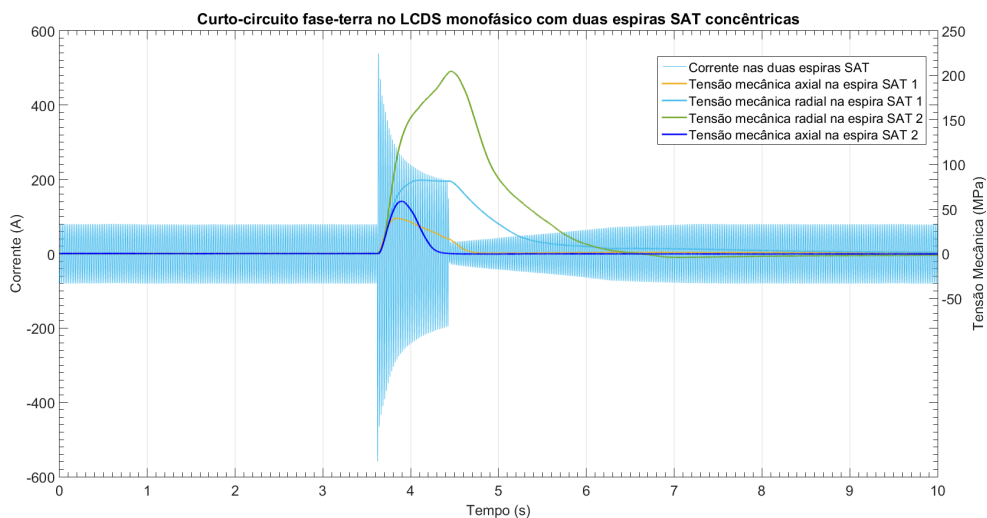


Figura 4.24: Corrente e tensões mecânicas na fita supercondutora durante um curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT dispostas de maneira concêntrica (configuração (c))

Face às conclusões expostas em [27], esperava ver-se valores de tensão mecânica axial e radial ligeiramente superiores na espira 2. Apesar de isto se ter verificado, achou-se exagerado o valor de deformação radial registado pelo extensómetro da espira 2 – adquiriu-se um valor máximo de tensão mecânica radial de 204,55 MPa. Este esforço é 2,47 vezes superior ao seu homólogo da espira SAT 1. De forma análoga ao que havia sucedido nos ensaios do LCDS trifásico com o núcleo tradicional, crê-se que este extensómetro não

4.4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS ESFORÇOS ELETROMECHANICOS NAS FITAS SUPERCONDUTORAS

está a funcionar corretamente; infelizmente, não foi possível adquirir mais extensómetros atempadamente para corrigir esta situação. Não obstante, os valores de T.M. axial e radial registados são, efetivamente, superiores na espira 2, que se encontra mais afastada do núcleo ferromagnético – poderá existir um maior valor de corrente ou de campo de dispersão nesta espira.

A corrente na fita SAT representada na Figura 4.24 é referente a ambas as espiras, uma vez que a bobina de Rogowski está disposta ao redor das duas.

Pode, adicionalmente, observar-se o pico de corrente na linha de 18,25 A na Figura 4.21.

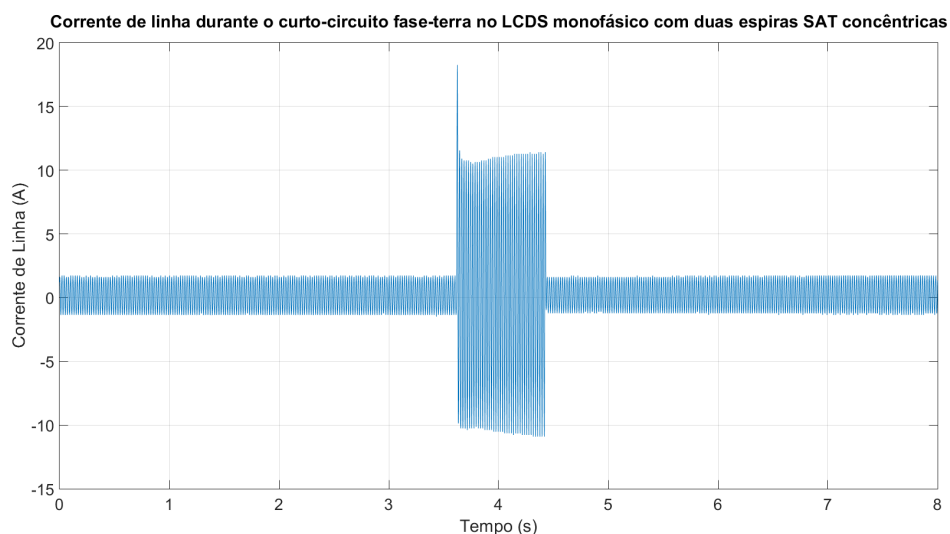


Figura 4.25: Corrente de linha durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico com duas espiras SAT distribuídas axialmente (configuração (c))

4.4.2.4 Estudo comparativo

A Tabela 4.5 contém em si todos os valores obtidos durante os ensaios nas diversas configurações testadas no LCDS monofásico, para que a partir da mesma se possam retirar todas as ilações pertinentes.

Pode, em primeira instância, verificar-se que a corrente na(s) fita(s) supercondutora(s) é semelhante para todas as espiras, em ambos os ensaios. De notar que a corrente no secundário registada no ensaio da configuração (c) é referente a duas espiras e que o seu valor se aproxima bastante da soma dos valores homólogos no ensaio da configuração (b).

Não obstante, os valores de tensão mecânica exercida nas fitas foram superiores na configuração com uma só espira (92,06 MPa de tensão mecânica axial máxima e 98,17 MPa de tensão mecânica radial máxima)– isto se se considerar que o valor da T.M. radial máxima na fita SAT 2 corresponde, de facto, a um erro de medição.

Tabela 4.5: Valores recolhidos durante o curto-circuito fase-terra no LCDS monofásico nas três configurações ensaiadas

Grandeza	Config. (a)	Config. (b)	Config. (c)
T.M. axial máx. na fita SAT 1 [MPa]	92.06	63.52	39.95
T.M. radial máx. na fita SAT 1 [MPa]	98.17	92.20	82.63
T.M. axial máx. na fita SAT 2 [MPa]	-	49.41	58.82
T.M. radial máx. na fita SAT 2 [MPa]	-	80.60	204.55
Corrente máx. na fita SAT 1 [A]	282.91	280.08	538.76
Corrente máx. na fita SAT 2 [A]	-	262.66	
Corrente de linha máx. [A]	21.48	18.12	18.25
Corrente na fita SAT 1 em op. normal [A]	81.13	44.42	80.48
Corrente na fita SAT 2 em op. normal [A]	-	41.96	
Corrente de linha em op. normal [A]	1.61	1.73	1.74

Na configuração (b), registou-se que a espira 1 é afetada por tensões axiais e radiais de maior magnitude do que a espira 2 (valores máximos 14% e 28,5% superiores, respetivamente). Isto deve-se ao facto de haver maior densidade de fluxo na espira mais próxima do primário do que na outra. Como a densidade de fluxo interage com a corrente no enrolamento e gera uma densidade de força que lhe é proporcional, os esforços são maiores na espira 1.

Por outro lado, na configuração (c), os valores dos esforços registados na espira 1 (a mais próxima do núcleo) são consistentemente menores do que aqueles obtidos na espira SAT 2. Apesar de um dos extensómetros apresentar um comportamento anormal, pensa-se que poderá haver mais corrente na espira de fora. Isto justificaria os esforços mais acentuados na espira SAT 2. Esta espira está, provavelmente, sujeita a mais campo de dispersão do que a de dentro. Haveria, com intuito de comprovar esta teoria, necessidade de medir as correntes e os campos de dispersão nas duas fitas SAT separadamente.

O valor de pico da corrente de linha registado durante a falha é cerca de 15% menor nas configurações em que se utilizou duas espiras do que na configuração (a), pelo que se pode inferir que o poder de limitação do LCDS é maior nas topologias em que se utilizou duas espiras. Por outro lado, a corrente de linha em regime de funcionamento normal é ligeiramente superior com uma só espira. Também o valor de fluxo registado é inferior nas duas configurações em que se utilizou duas espiras SAT.

4.5 Síntese de capítulo

Serviu o presente capítulo para, primeiramente, descrever a montagem laboratorial e as configurações ensaiadas em cada um dos limitadores de corrente em estudo. Expôs-se, em seguida, todos os valores obtidos na sequência do pós-processamento dos dados – tensões mecânicas, correntes de linha e nas espiras do secundário.

Feita a análise dos valores resultantes dos ensaios, concluiu-se que o método utilizado para quantificar os esforços eletromecânicos a que os enrolamentos supercondutores

estão sujeitos é viável e preciso. À exceção de duas situações em que os extensómetros apresentaram um comportamento anormal, os resultados mostraram-se coerentes e foram de encontro àquilo que seria expectável, tanto pela bibliografia consultada como pelas simulações computacionais efetuadas.

Pelo facto de os protótipos dos limitadores de correntes de defeito aqui utilizados serem de pequena escala, há que ter em atenção que os dispositivos que desempenham esta função nas redes elétricas "reais" são atingidos por correntes de curto-circuito de magnitudes substancialmente superiores às aqui apresentadas. Porém, desde que se utilize fita supercondutora do mesmo modelo no secundário desses dispositivos, e mesmo que o valor da corrente de curto-circuito seja maior, a corrente em cada uma das espiras será idêntica às aqui descritas. Logo, é possível concluir que as tensões mecânicas presentes num LCDS de maior escala terão magnitude semelhante às apresentadas e que, por consequência, a integridade do dispositivo não será colocada em causa.

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Importa, nesta fase final, tecer as considerações pertinentes relativamente ao desempenho do dispositivo de medida desenvolvido e às tensões mecânicas que incidem nas fitas supercondutoras adquiridas pelo mesmo.

5.1 Conclusões finais

Na sua generalidade, os ensaios revelaram-se consistentes e os resultados obtidos também. Tanto os extensómetros como os circuitos de condicionamento de sinal cumpriram as suas funções e, como tal, é seguro dizer que o aparelho desenvolvido para quantificar os esforços eletromecânicos nos enrolamentos SAT de vários dispositivos de potência é preciso, consistente e viável.

Houve, no entanto, alguns comportamentos anormais por parte de dois extensómetros em particular que importa assinalar. É notório, na generalidade dos ensaios reproduzidos no LCDST, que a tensão mecânica axial na fase A tem magnitude superior às restantes. Inicialmente, atribuiu-se isto à oxidação não-uniforme do núcleo ferromagnético; também a secção das colunas poderia estar ligeiramente desequilibrada, fazendo com que o núcleo fosse assimétrico. No entanto, para validar ou não estas hipóteses, utilizou-se essa mesma fita SAT como segunda espira num ensaio de despiste realizado no LCDS monofásico e os esforços axiais na mesma mantiveram a sua amplitude máxima substancialmente superior à dos restantes. Por isto, concluiu-se que seria pertinente substituir o extensómetro que lê estes esforços por outro similar, visto que o utilizado poderá não estar em perfeitas condições e não foi possível encomendar outros atempadamente. Registou-se a mesma ocorrência no extensómetro utilizado para ler a deformação radial na espira SAT 2 na configuração (c) dos ensaios realizados no LCDS monofásico.

Mesmo admitindo que os valores registados por estes extensómetros com comportamento anormal estejam corretos, as tensões mecânicas nas fitas não ultrapassaram, no caso do LCDST, os 224,04 MPa – 32% do limite de elasticidade das fitas de YBCO utilizadas. Foi notória, de um modo geral, a mitigação das tensões mecânicas nas fitas supercondutoras das fases não contempladas pela falha – isto por intermédio das colunas exteriores do núcleo *shell*, em cada um dos casos. Esta configuração é mais vantajosa do que a topologia tradicional.

No LCDS monofásico, registou-se um valor de 204,55 MPa no extensómetro utilizado para ler a deformação radial na espira 2 na configuração (c). Este valor corresponde a 29% do valor de tensão mecânica das fitas, 700 MPa. No ensaio da configuração (a) registou-se uma T.M. axial igual a 14% daquele valor. Pensa-se que a configuração ideal para este LCDS é a (c), com as espiras concêntricas. No entanto, pelo facto de neste ensaio ter existido um extensómetro com um comportamento anormal, não é possível aferir se os esforços na espira SAT 2 são, ou não, consistentemente menores do que os seus homólogos na configuração (b).

Pelo exposto, conclui-se que a integridade estrutural das fitas SAT não é, de forma alguma, posta em causa pelas forças mecânicas que nelas incidem. Todas as deformações registadas são do tipo elástico e nenhuma delas é plástica – isto é, são todas reversíveis e não há danos ao material.

Finalmente, e antes das considerações acerca do trabalho futuro, resta afirmar que o dispositivo de medida desenvolvido funciona como esperado e cumpre a sua função de forma precisa e consistente. É um aparelho fácil de operar, com todos os conectores e potenciómetros dispostos em locais acessíveis ao utilizador, que adquire, amplifica, modula e filtra valores de deformação com precisão.

5.2 Trabalho futuro

Apesar de os resultados aqui obtidos terem validade e irem de encontro ao que seria expectável, há diversas medidas que podem ser tomadas para melhorar o trabalho descrito no decorrer desta dissertação.

Em primeiro lugar, seria interessante utilizar extensómetros de 60 Ω na ponte de Wheatstone para assim poder ligar dois em série por cada deformação a medir. Desta forma, seria possível colar um extensómetro de cada lado da fita, de maneira que um sofresse contração quando o outro sofria alongamento, resultando isto numa compensação do *bending* que não foi possível efetuar com a presente montagem.

Para além disso, é importante referir que os extensómetros descolam das fitas quando se provoca uma falha com duração superior a 1 segundo, motivo pelo qual se estabeleceu um tempo de curto-circuito menor ou igual a este período. Nos ensaios em que a falha foi provocada pelo SSR e controlada pelo *Arduino*, o tempo de curto-circuito foi fixado em 700 ms. Seria pertinente fazer todos os ensaios com recurso a estes SSR's de forma a poder controlar o seu tempo com precisão e comparar os efeitos de vários curto-circuitos

de diferente duração. Também seria desejável verificar se os adesivos de outros fabricantes são capazes de manter os extensômetros colados às fitas durante falhas de maior duração do que as aqui provocadas.

Por outro lado, e visto que se verificou o mau funcionamento de alguns dos extensômetros, deve substituir-se os mesmos. Todos os extensômetros devem ter uma grelha com 2 mm de comprimento para que possam ser utilizados tanto para os esforços radiais como para os axiais; os extensômetros com 5 mm de comprimento da grelha não são indicados para ler os esforços axiais porque uma porção da sua grelha metálica fica fora da fita supercondutora, que tem apenas 4 mm de largura. Desta forma, os esforços lidos não seriam tão precisos como desejável.

Seria ainda pertinente fazer as simulações pelo método dos elementos finitos em 3D, com recurso a um *software* como o *COMSOL*. Estas simulações devem contemplar todas as camadas da fita supercondutora, que na presente simulação está representada como se fosse toda ela constituída por YBCO. As restantes camadas deveriam ter sido tidas em consideração para assim obter valores mais próximos daqueles que resultam dos ensaios laboratoriais.

Por fim, seria interessante construir um limitador em topologia *shell* em que as colunas exteriores fossem constituídas por um material cuja permeabilidade magnética fosse manifestamente superior àquela das chapas de ferro utilizadas nas três colunas interiores. O intuito seria "forçar" o fluxo a seguir por ali, fazendo assim com que não houvesse variação do seu valor nas fases que não são atingidas pela falha em situação de curto-circuito.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. de Bruyn Ouboter. “Heike Kamerlingh Onnes’s Discovery of Superconductivity”. Em: *Scientific American* 276.3 (1997), pp. 98–103. ISSN: 0036-8733. DOI: 10.1038/scientificamerican0397-98.
- [2] B. P. Oldfield. *The Rise of the Supertall*. June. 2009, pp. 22–24. ISBN: 9780813821634. DOI: 10.5437/08956308X5603005.
- [3] P. Arsénio. “Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [4] N. Vilhena. “Construção e Ensaio de Um Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2012. URL: <http://run.unl.pt/handle/10362/8516>.
- [5] F. L. Curzon e B. Ahlborn. “Efficiency of a Carnot engine at maximum power output”. Em: *American Journal of Physics* 43.1 (1975), pp. 22–24. ISSN: 0002-9505. DOI: 10.1119/1.10023.
- [6] S. Stavrev. “Modelling of High Temperature Supraconductors for AC Power Applications”. Dissertação de doutoramento. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [7] J. Bardeen, L. N. Cooper e J. R. Schrieffer. “Theory of superconductivity”. Em: *Physical Review* 108.5 (1957), pp. 1175–1204. DOI: 10.1103/PhysRev.108.1175.
- [8] A. Pronto. “Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura”. Dissertação de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2010. URL: <http://run.unl.pt/handle/10362/5116>.
- [9] J. Pina. “Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura”. Dissertação de doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2010. URL: <http://hdl.handle.net/10362/5059>.

- [10] R. Mateus. “Medição dos Esforços Eletromecânicos Desenvolvidos em Dispositivos de Potência que Utilizam Materiais Supercondutores”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [11] H. J. Schettino. “Análise de Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo para Inserção de Geradores ao Sistema de Transmissão”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- [12] V. Meerovich e V. Sokolovsky. *High-temperature superconducting fault current limiters (FCLs) for power grid applications*. 2. Elsevier Ltd, 2015, pp. 283–324. DOI: 10.1016/B978-1-78242-029-3.00009-1.
- [13] K. Arai, H. Tanaka, M. Inaba, H. Arai, T. Ishigohka, M. Furuse e M. Umeda. “Test of Resonance-Type Superconducting Fault Current Limiter”. Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 16.2 (2006), pp. 650–653. DOI: 10.1109/TASC.2006.870523.
- [14] V. Sokolovsky, V. Meerovich, I. Vajda e V. Beilin. “Superconducting FCL: Design and application”. Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 14.3 (2004), pp. 1890–1900. DOI: 10.1109/TASC.2004.830608.
- [15] V Sokolovsky, V Meerovich, L. I. Chubraeva e I Vajda. “An improved design of an inductive fault current limiter based on a superconducting cylinder”. Em: *Superconductor Science and Technology* 23 (2010). DOI: 10.1088/0953-2048/23/8/085007.
- [16] A. T. Cabrera. “Estudo das Forças Electrodinâmicas Desenvolvidas em Limitadores de Corrente Supercondutores”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2014. URL: <https://run.unl.pt/handle/10362/14718>.
- [17] H. Dersch. *Device for inductive current limiting of an alternating current employing the superconductivity of a ceramic high-temperature superconductor*. 1992.
- [18] R. B. A. Ferreira. “Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [19] A. J. Rosentino Pereira. “Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [20] A. C. de Azevedo. “Estresse eletromecânico em transformadores causado por curto-circuitos "passantes" e correntes de energização”. Dissertação de doutoramento. Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [21] E. R. D. Aguiar. “Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

- [22] K. Osamura, S. MacHiya, Y. Tsuchiya e H. Suzuki. “Internal strain and mechanical properties at low temperatures of surround Cu stabilized YBCO coated conductor”. Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 20.3 (2010), pp. 1532–1536. ISSN: 10518223. DOI: 10.1109/TASC.2010.2042437.
- [23] D. C. Van Der Laan, J. W. Ekin, C. C. Clickner e T. C. Stauffer. “Delamination strength of YBCO coated conductors under transverse tensile stress”. Em: *Superconductor Science and Technology* 20.8 (2007), pp. 765–770. ISSN: 09532048. DOI: 10.1088/0953-2048/20/8/007.
- [24] T. Takao, S. Koizuka, K. Oi, A. Ishiyama, J. Kato, T. Machi, K. Nakao e Y. Shiohara. “Characteristics of compressive strain and superconducting property in YBCO coated conductor”. Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 17.2 (2007), pp. 3517–3519. ISSN: 10518223. DOI: 10.1109/TASC.2007.899654.
- [25] R. C Duckworth, Y. Zhang, M. J. Gouge, C. M. Rey, D. C. van der Laan, C. Clickner e U. B. Balachandran. “Voltage Distribution and Mechanical Strength in Splice Joints Made from As-Manufactured YBCO Coated Conductors”. Em: 2010, pp. 370–379. ISBN: 0735407657. DOI: 10.1063/1.3402325. URL: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3402325>.
- [26] R. Soika, F. Schmidt e A. Allais. “Mechanical requirements for superconducting tapes in HTS power cable applications”. Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 17.2 (2007), pp. 1730–1733. ISSN: 10518223. DOI: 10.1109/TASC.2007.899060.
- [27] N. Vilhena, A. Taillacq, A. Pronto, J. Murta-Pina e A. Alvarez. “Analysis of Electromagnetic Forces in Superconducting Fault-Current Limiters Under Short-Circuit Condition”. Em: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 26.3 (2016), pp. 1–4. ISSN: 1051-8223. DOI: 10.1109/TASC.2016.2548482. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7444185/>.
- [28] E. Bjerkan. “High frequency modeling of power transformers”. Dissertação de doutoramento. Faculty of Information Technology, Mathematics e Electrical Engineering, 2005, p. 268. ISBN: 8247169258.
- [29] N. Mahomed. “Electromagnetic forces in transformers under short circuit conditions”. Em: *Energize* (), pp. 36–40. ISSN: 0332-1649. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/03321649810203297/full/html>.
- [30] G. Bertagnolli. *Short-circuit duty of power transformers - The ABB Approach*. Ed. por Golinelli. 3rd ed. 2013.
- [31] CIGRE e WG12.19. “The short-circuit performance of power transformers”. Em: *CIGRE Technical Brochure* 209.August (2002).
- [32] Instruments National. *Medições de deformação com Strain Gages*. 2017. URL: <http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/> (acedido em 30/11/2018).

- [33] KYOWA. *Strain Gages*. URL: <https://bit.ly/2ya5PWf> (acedido em 03/12/2018).
- [34] S. A. de Souza. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos - Fundamentos Teóricos e Práticos*. Ed. por Blucher. 1982.
- [35] J. Willian D. Callister e D. G. Rethwisch. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 8.^a edição. 2012. ISBN: 978-85-216-2124-9.
- [36] R. M. Natal Jorge e L. M.J. S. Dinis. “Teoria da Plasticidade”. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 2005. ISBN: 9788521206064.
- [37] KYOWA. *Strain Gages*. 2018. URL: <http://testmachines.com.au/wp-content/uploads/2017/04/Kyowa-Strain-Gage-Selection-Chart-page-1.pdf> (acedido em 03/12/2018).
- [38] KYOWA. *Technical Memo*. 2018. URL: <https://bit.ly/39YIofZ>.
- [39] J. W. Jaquay. “Designers Guide To: Instrumentation Amplifiers.” Em: *Edn* 18.9 (1973), pp. 40–43. ISSN: 00127515.
- [40] D. Overview. “Active Integrator for Rogowski Coil Reference Design”. Em: *April* (2016). URL: <http://www.ti.com/lit/ml/tiduby4a/tiduby4a.pdf>.
- [41] A. Devices. *Precision Instrumentation Amplifier AD8221*. 2007. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8221.pdf>.
- [42] A. Devices. *AD630 Balanced Modulator/Demodulator*. 2000. URL: <https://bit.ly/3eeLEqL>.
- [43] KYOWA. *Adhesives*. URL: <https://bit.ly/2K0JQU1> (acedido em 03/12/2018).
- [44] P. M. M. Barroso. “Ensaio e Comparação de Limitadores de Corrente Supercondutores Trifásicos Indutivos”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [45] P. R. S. Figueira. “Projecto e construção de um transformador de potência supercondutor”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [46] D. W. Hazelton. “Application of SuperPower 2G HTS Wire to High Field Devices Demands on conductor for high field applications”. Em: *MT22 Conference* (2011). URL: <https://bit.ly/2UXKY1k>.