



**Pedro Miguel Lucas Arsénio**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223**

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

Orientador: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina FCT – UNL  
Co-orientadora: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto FCT – UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos da Palma Goes  
Arguente: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins  
Vogal: Prof. Doutor Grégoire Marie Jean Bonfait



## **Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223**

Copyright © Pedro Miguel Lucas Arsénio, 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  
Ao meu irmão  
À Bruna*



## Agradecimentos

Gostaria, em primeiro lugar, de agradecer aos meus orientadores, Prof. João Murta Pina e Prof<sup>a</sup>. Anabela Pronto, por me terem aberto as portas do mundo da supercondutividade, pela sua simpatia, disponibilidade e pelos conhecimentos que me transmitiram, tanto nas disciplinas que me lecionaram, como na realização deste trabalho. Sem eles, nada disto teria sido possível de concretizar.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelo acolhimento e formação.

Ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica pelas boas condições de trabalho, pelos materiais disponibilizados e pelo saudável ambiente criado entre professores, funcionários e alunos.

Aos Serviços de Ação Social da Universidade Nova de Lisboa pelo apoio financeiro disponibilizado, essencial à prossecução dos meus estudos.

Ao grupo “Benito Mahedero” de Badajoz, pela simpatia e disponibilização do seu laboratório para realização de uma experiência.

Ao Tenente Tiago Arsénio, do Regimento de Manutenção do Exército Português, e ao Sr. António Campos, do Departamento de Mecânica da FCT, pelo auxílio na conceção de suportes para as fitas supercondutoras.

Aos meus colegas do laboratório de supercondutividade do DEE, pela camaradagem, boa disposição e auxílio nas mais determinadas tarefas. Aos restantes colegas de curso e de trabalho, também um forte agradecimento. Quaisquer referências particulares são sempre injustas para os demais, contudo abro uma exceção para enaltecer a ajuda preciosa do meu colega Nuno Vilhena no auxílio das mais diversas tarefas que foram sendo necessárias ao longo do trabalho.

Aos amigos de longa data e aos de curta data, onde o pessoal da supercondutividade se inclui, quero deixar um reconhecido agradecimento, pelas mais diversas situações onde as nossas vidas se cruzaram.

Aos meus avós por todo o apoio que me providenciam e pela permanente preocupação com o meu bem-estar, por vezes até excessiva.

À minha mãe e ao meu pai reservo um agradecimento especial, essencialmente por tudo. Pelos sólidos valores que me transmitiram, pelo sentido de responsabilidade que sempre me inculcaram, pela liberdade que me deram em todas as minhas tomadas de decisão, pela total confiança demonstrada em mim e pelo esforço que têm feito, financiando os meus encargos. Apostaram na minha formação, disponibilizando sempre todo o apoio possível e impossível com vista ao meu bem-estar físico e psicológico. Eles acreditaram em mim, compreenderam e toleraram as minhas ausências, principalmente na fase final deste trabalho. Um muito obrigado.

Ao meu irmão, que também contribuiu para este trabalho, como referido anteriormente, agradeço-lhe pela amizade que temos, por todo o apoio prestado, pelos conhecimentos que sempre me transmite, mostrando-me como funciona a engenharia do ponto de vista profissional e pela sua constante disponibilidade.

À Bruna, por me apoiar nos maus e bons momentos, e pela motivação incondicional que sempre me deu. Nem sempre foi fácil, mas valeu a pena!

E, por fim, agradeço a todos os leitores desta obra, esperando que a leitura da mesma contribua com algo de útil para os seus conhecimentos.





## Resumo

Devido ao aumento das correntes de curto-circuito em sistemas de energia elétrica, fruto da implementação de tecnologias de produção descentralizada, maioritariamente de cariz renovável, torna-se necessário desenvolver uma solução capaz de resolver os problemas que atualmente subsistem ao nível das proteções das redes, pois os dispositivos atualmente existentes apresentam limitações na resolução do problema.

Nesta perspetiva, os limitadores de corrente supercondutores, de conceito já demonstrado, apresentam-se como uma alternativa viável para proteção das redes de energia elétrica. Estes dispositivos têm como principais características a virtual invisibilidade à rede em situações de regime normal, a atuação rápida em situações de falha e a recuperação autónoma após supressão da falha.

O objetivo desta dissertação é construir e ensaiar um limitador de corrente supercondutor de tipologia indutiva, à escala laboratorial, sendo o secundário composto por fita supercondutora Bi-2223. Pretende-se analisar o desempenho do limitador e identificar os aspetos relevantes para um futuro escalamento do dispositivo para maiores dimensões.

Numa perspetiva futura, a implementação da solução proposta, à escala da rede, irá permitir a minimização de eventuais alterações estruturais à rede que seriam inevitavelmente necessárias de efetuar com o advento da produção descentralizada.

**Termos-chave:** Correntes de curto-circuito, Fita supercondutora Bi-2223, Limitador de corrente supercondutor de tipologia indutiva, Produção descentralizada, Redes de energia elétrica.



## Abstract

Due to the increase of short-circuit currents in electric power systems, through the implementation of decentralized production technologies, mostly from renewable sources, it becomes necessary to develop a solution that can solve the problems that currently exists at the level of the protections of the networks because the devices currently available have some limitations in the resolution of the problem.

In this perspective, superconducting fault current limiters, whose concept has been previously demonstrated, present themselves a viable alternative for protection of power grids. These devices have the main characteristics of virtual invisibility in the network under normal situations, fast response in situations of failure and self-recovery after removal of the fault.

The goal of this dissertation is to build and test an inductive topology of superconducting fault current limiter, at laboratory scale, whose the secondary coil is built of superconducting Bi-2223 tape. It's intended to analyze the performance of the limiter and identify relevant aspects for a future device at a larger scale.

In a future perspective, the implementation of the proposed solution, at network scale, allows the minimization of any structural changes to the network that would be necessary due to the advent of decentralized production.

**Keywords:** Decentralized production, Inductive superconducting fault current limiter, Power networks, Short-circuit currents, Superconducting Bi-2223 tape.



# Índice de Matérias

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Contribuições Originais .....	3
1.4	Organização da Dissertação.....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	Evolução Histórica .....	5
2.2	Propriedades.....	8
2.2.1	Resistividade Nula.....	8
2.2.2	Efeito Meissner.....	8
2.2.3	Limites da Supercondutividade .....	9
2.2.4	Classes de Supercondutores .....	10
2.2.4.1	Supercondutores do Tipo I.....	10
2.2.4.2	Supercondutores Tipo II.....	11
2.3	Teorias da Supercondutividade .....	12
2.3.1	Teoria dos Dois Fluidos.....	12
2.3.2	Equações de London.....	13
2.3.3	Teoria BCS .....	14
2.3.4	Teoria de Ginzburg-Landau .....	14
2.4	Modelização de Supercondutores.....	18
2.4.1	Modelos de Estado Crítico .....	18
2.4.2	Lei da Potência E-J .....	18
2.5	Materiais Supercondutores de Alta Temperatura .....	19
2.5.1	Formatos Comerciais dos SAT .....	20
2.5.1.1	Blocos Maciços .....	20
2.5.1.2	Fitas .....	20
2.5.1.3	Cabos.....	21
2.5.2	Aplicações .....	21

<b>2.6</b>	<b>Limitadores de Corrente .....</b>	<b>22</b>
2.6.1	Introdução.....	22
2.6.2	Estado da Arte.....	22
2.6.2.1	Limitadores de Corrente Convencionais.....	23
2.6.2.2	Limitadores de Corrente Supercondutores.....	24
2.6.3	Modelização de Limitadores de Corrente Indutivos .....	29
2.6.3.1	Construção do Ciclo Máximo de Histerese do Limitador.....	29
2.6.3.2	Metodologia para Simulação Dinâmica de um Circuito com Limitador .....	30
<b>2.7</b>	<b>Síntese.....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Princípio de Funcionamento .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Aquisição de Dados .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Aspetos Construtivos .....</b>	<b>37</b>
3.4.1	Núcleo Ferromagnético .....	38
3.4.2	Enrolamento Primário.....	39
3.4.3	Enrolamento Secundário.....	39
3.4.4	Crióstato .....	40
<b>3.5</b>	<b>Protótipo Desenvolvido .....</b>	<b>41</b>
<b>3.6</b>	<b>Síntese.....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Lei da Potência em Fita Supercondutora .....</b>	<b>43</b>
4.1.1	Procedimento Experimental .....	44
4.1.2	Resultados e Análise.....	44
<b>4.2</b>	<b>Característica de Magnetização .....</b>	<b>45</b>
4.2.1	Procedimento Experimental .....	46
4.2.2	Resultados e Análise.....	48
<b>4.3</b>	<b>Desempenho do Limitador .....</b>	<b>49</b>
4.3.1	Procedimento Experimental .....	49

4.3.2	Resultados e Análise.....	51
4.3.2.1	Blindagem Magnética .....	51
4.3.2.2	Operação em Situações de Falha .....	54
<b>4.4</b>	<b>Avaliação de Resultados para Potencial Validação de uma Metodologia para Simulação Dinâmica de um Circuito com Limitador</b>	<b>62</b>
4.4.1	Característica Magnética do Ferro com o Primário.....	62
4.4.2	Ensaio do Limitador com Variação do Número de Espiras Supercondutoras ....	63
4.4.3	Ensaio do Limitador com Variação da Impedância de Linha .....	64
4.4.4	Construção do Ciclo Máximo de Histerese .....	65
<b>4.5</b>	<b>Síntese.....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO .....</b>	<b>69</b>
5.1	Conclusões .....	69
5.2	Trabalho Futuro .....	70
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>73</b>
	Referências Bibliográficas .....	73
	Referências Iconográficas.....	77
<b>APÊNDICES .....</b>		<b>79</b>
<b>Apêndice 1 – Desenho Técnico .....</b>		<b>79</b>
	Apêndice 1.1 – Núcleo Ferromagnético.....	79
	Apêndice 1.2 – Suporte do Primário .....	80
	Apêndice 1.3 – Suporte do Secundário .....	81
	Apêndice 1.4 – Crióstato Menor .....	82
	Apêndice 1.5 – Crióstato Maior.....	83





## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Resistência em função da temperatura, medidas por Onnes, em tubos capilares de mercúrio.....	5
Figura 2.2 – Evolução temporal da temperatura crítica dos materiais supercondutores desde a sua descoberta.....	7
Figura 2.3 – Diagrama temporal dos aspetos mais relevantes da história da supercondutividade.....	7
Figura 2.4 – Comparação entre a) condutor perfeito e b) supercondutor.....	9
Figura 2.5 – Espaço de fases de um supercondutor.....	10
Figura 2.6 – Magnetização de um supercondutor do tipo I em função do campo aplicado.....	11
Figura 2.7 – Magnetização de um supercondutor do tipo II em função do campo aplicado.....	11
Figura 2.8 – Concentração local de iões positivos devido à passagem de em eletrão.....	14
Figura 2.9 – Densidade de fluxo e densidade local de eletrões supercondutores num supercondutor a) do tipo I e b) do tipo II.....	16
Figura 2.10 – Ilustração da densidade de fluxo e densidade local de eletrões supercondutores no interior de um supercondutor.....	17
Figura 2.11 – Esquema de princípio para medição da lei da potência numa fita supercondutora.....	19
Figura 2.12 – Exemplos de blocos maciços SAT disponíveis comercialmente.....	20
Figura 2.13 – Exemplo de fitas SAT disponíveis comercialmente.....	21
Figura 2.14 – Exemplo de cabos SAT disponíveis comercialmente.....	21
Figura 2.15 – Limitador $I_s$ da ABB.....	24
Figura 2.16 – Reator de núcleo de ar da Alstom.....	24
Figura 2.17 – Diagrama unifilar dos potenciais locais de aplicação dos LCS na rede.....	26
Figura 2.18 – CURL 10, o primeiro LCS resistivo testado na rede.....	26
Figura 2.19 – Disposição das fitas supercondutoras do LCS do projeto ECCOFLOW.....	27
Figura 2.20 – Limitador da ABB. Fonte.....	27
Figura 2.21 – Limitador do CRIEPI.....	28
Figura 2.22 – Limitador da Brucker, iSFCL.....	28
Figura 2.23 – Modelo do ciclo de histerese máximo.....	30
Figura 2.24 – Circuito elétrico utilizado para determinar o comportamento dinâmico do limitador.....	31
Figura 3.1 – Esquema de princípio do LCS.....	34
Figura 3.2 – Esquema de ensaio do LCS.....	34
Figura 3.3 – Circuito elétrico de ensaio, antes do curto-circuito.....	35
Figura 3.4 – Circuito elétrico de ensaio, depois do curto-circuito.....	35
Figura 3.5 – Placa de aquisição de dados NI-6009.....	36
Figura 3.6 – Montagem para aquisição de tensões.....	36
Figura 3.7 – Representação da estrutura do protótipo LCS.....	37
Figura 3.8 – Representação do dispositivo para conceção de crióstatos.....	38

Figura 3.9 – Núcleo ferromagnético adquirido para o protótipo do LCS.....	38
Figura 3.10 – Enrolamentos primários.....	39
Figura 3.11 – Anéis SAT em suportes de Celeron.....	39
Figura 3.12 – Crióstato menor e crióstato maior.....	40
Figura 3.13 – Dispositivo para conceção de crióstatos.....	40
Figura 3.14 – Protótipo do LCS desenvolvido.....	41
Figura 4.1 – Montagem experimental para determinação da lei da potência.....	44
Figura 4.2 – Amostra utilizada para ensaio do método dos quatro pontos.....	44
Figura 4.3 – Lei da potência da fita Bi-2223.....	45
Figura 4.4 – Montagem experimental para determinação do ciclo de histerese.....	46
Figura 4.5 – Montagem experimental de ensaio para determinação do desempenho do limitador.....	47
Figura 4.6 – Característica de magnetização da bobina de 70 espiras com núcleo ferromagnético sem a presença de SAT.....	48
Figura 4.7 – Característica de magnetização do núcleo ferromagnético sem a presença de SAT.....	48
Figura 4.8 – Circuito elétrico de ensaio.....	49
Figura 4.9 – Montagem experimental para determinação do desempenho do limitador.....	50
Figura 4.10 – Montagem experimental de ensaio para determinação do desempenho do limitador.....	51
Figura 4.11 – Característica da bobina face à composição do secundário.....	52
Figura 4.12 – Característica do núcleo ferromagnético face à composição do secundário.....	53
Figura 4.13 – Resultados de operação sob falha, com o protótipo composto por 1 espira SAT no secundário.....	55
Figura 4.14 – Resultados de operação sob falha, com o protótipo composto por 2 espiras SAT no secundário.....	57
Figura 4.15 – Resultados de operação sob falha, com o protótipo composto por 3 espiras SAT no secundário.....	59
Figura 4.16 – Resultados de operação sob falha, com o protótipo composto por 4 espiras SAT no secundário.....	60
Figura 4.17 – Característica do primário, com núcleo de ferro mas sem supercondutor.....	63
Figura 4.18 – Comparação dos ciclos de histerese obtidos para 1, 2 3 e 4 espiras no secundário.....	63
Figura 4.19 – Comparação da curva de 1ª magnetização com a histerese proveniente do LCS em operação.....	64
Figura 4.20 – Resultados do ensaio do limitador com variação da impedância de linha resistiva.....	65
Figura 4.21 – Comparação de resultados do ensaio do limitador com variação da impedância de linha através do ensaio laboratorial e da simulação pela metodologia adotada.....	66

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Temperatura crítica dos SAT de maior aplicação em dispositivos de potência. ...	19
Tabela 4.1 – Características técnicas da fita Innost Bi-2223.....	43
Tabela 4.2 – Valores máximos observados no LCS em operação.....	61
Tabela 4.3 – Valores máximos observados no LCS em operação normal.....	61
Tabela 4.4 – Valores máximos observados no LCS em operação, após falha e excluindo o primeiro período do sinal, após acionamento do interruptor.....	61



## Simbologia

Símbolo	Descrição	Unidades
<b>A</b>	Vetor potencial	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>B</b>	Densidade de fluxo magnético (ou campo de indução)	T
<b>B</b>	Vetor densidade de fluxo magnético (ou campo de indução)	T
<b>B<sub>a</sub></b>	Vetor densidade de fluxo (ou campo de indução) externo aplicado a um corpo sólido	T
<b>C</b>	Capacidade de um condensador	F
<b>E</b>	Vetor campo elétrico	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>E<sub>c</sub></b>	Critério de campo elétrico para definição da corrente crítica	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>e</b>	Carga do elétron ( $1,60217646 \cdot 10^{-19}$ )	C
<b>F</b>	Vetor força	N
<b>f</b>	Densidade de energia livre no estado supercondutor	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
<b>f<sub>n</sub></b>	Densidade de energia livre no estado normal	$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
<b>H</b>	Campo magnético	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>H</b>	Vetor campo magnético	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>H<sub>c</sub></b>	Campo magnético crítico	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>H<sub>c1</sub></b>	Campo magnético crítico inferior	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>H<sub>c2</sub></b>	Campo magnético crítico superior	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>h</b>	Constante de Planck ( $6,62606896(33) \times 10^{-34}$ )	$\text{J} \cdot \text{s}$
<b>I</b>	Corrente elétrica	A
<b>I<sub>c</sub></b>	Corrente elétrica crítica	A
<b>I<sub>cc</sub></b>	Corrente elétrica de curto-circuito	A
<b>I<sub>SAT</sub><sup>*</sup></b>	Corrente elétrica máxima num supercondutor	A
<b>i</b>	Corrente elétrica	A
<b>i<sub>c</sub></b>	Corrente elétrica crítica	A
<b>i<sub>cc</sub></b>	Corrente elétrica de curto-circuito	A
<b>i<sub>linha</sub></b>	Corrente elétrica na linha	A
<b>i<sub>p</sub></b>	Corrente elétrica presumida na linha	A
<b>J</b>	Densidade de corrente elétrica	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
<b>J</b>	Vetor densidade de corrente elétrica	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
<b>J<sub>c</sub></b>	Densidade de corrente elétrica crítica	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
<b>J<sub>n</sub></b>	Vetor densidade de corrente elétrica normal	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
<b>J<sub>s</sub></b>	Vetor densidade de corrente elétrica supercondutora	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
<b>j</b>	Número imaginário ( $\sqrt{-1}$ )	-
<b>L</b>	Indutância de uma bobina	H
<b>M</b>	Vetor magnetização	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
<b>m<sub>e</sub></b>	Massa do elétron ( $9,10938188 \times 10^{-31}$ )	kg
<b>N</b>	Número de espiras no enrolamento primário	-

$n$	Expoente da lei da potência	-
$n_e$	Número de elétrons	-
$q_c$	Carga de um condensador	C
$R$	Resistência elétrica	$\Omega$
$R_a$	Resistência de amostragem	$\Omega$
$R_c$	Resistência de carga	$\Omega$
$\mathbf{r}$	Vetor posição espacial	m
$T$	Temperatura	K
$T_c$	Temperatura crítica	K
$U$	Tensão	V
$U_c$	Tensão crítica	V
$U_{LCS}$	Tensão aos terminais do limitador de corrente supercondutor	V
$u_{rede}$	Tensão aos terminais da fonte de alimentação	V
$\mathbf{v}$	Vetor velocidade	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ )	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
$\lambda_a$	Ramo ascendente da característica de magnetização simulada	Wb
$\lambda_d$	Ramo descendente da característica de magnetização simulada	Wb
$\lambda_L$	Profundidade de penetração	Å
$\psi$	Fluxo ligado com o primário ou parâmetro de ordem	Wb
$\psi_0$	Fluxo ligado com o primário na ausência de núcleo de ferro	Wb
$\psi_{LCS}$	Fluxo ligado com o primário na presença de núcleo de ferro	Wb
$\psi_{LCS}^*$	Fluxo máximo ligado com o primário na presença de núcleo de ferro	Wb
$\kappa$	Parâmetro de Ginzburg-Landau	-
$\xi$	Comprimento de coerência	Å
$\sigma$	Condutividade elétrica	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
$\Lambda$	Constante presente nas equações de London	$\text{kg} \cdot \text{C}^{-2}$
$\eta_s$	Densidade de elétrons supercondutores	$\text{m}^{-3}$
$\hbar$	Constante de Planck reduzida ( $1,054571628(53) \times 10^{-34}$ )	J · s
$\phi_0$	<i>Quantum</i> de fluxo ( $2,068 \times 10^{-15}$ )	Wb

## Notações

1G	Fita supercondutora de primeira geração
2G	Fita supercondutora de segunda geração
AC	<i>Alternating current</i>
AT	Alta tensão (entre 45 kV e 110 kV)
Bi-2212	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$
Bi-2223	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$
BSCCO	Supercondutores de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$ , com $n=0,1,2$
BT	Baixa tensão (abaixo de 1 kV)
CC	Curto-circuito
DC	<i>Direct current</i>
FMM	Força magnetomotriz (Ae)
GL	Ginzburg-Landau
LCS	Limitador de corrente supercondutor
Maglev	Dispositivo de levitação magnética
MBCCO	Supercondutor de composição química $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+x}$ ou $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$
MT	Média tensão (entre 1 kV e 45 kV)
SAT	Supercondutor de alta temperatura
SBT	Supercondutor de baixa temperatura
SEE	Sistema de energia elétrica
SMES	<i>Superconducting magnetic energy storage</i>
TBCCO	Supercondutores de composição química $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$
XPS	Poliestireno extrudido
YBCO	Supercondutores de composição química $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , sendo $\delta$ o conteúdo de oxigénio.
Y-123	YBCO na sua fase supercondutora.





# 1 Introdução

A presente dissertação aborda o tema da limitação das correntes de curto-circuito em sistemas de energia elétrica (SEE), através do estudo, conceção e análise de um limitador de corrente de curto-circuito baseado em fita supercondutora de composição química  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$  (Bi-2223).

## 1.1 Motivação

Tendo em conta o panorama atual e futuro, existe uma preocupação, cada vez mais acentuada, com questões de sustentabilidade energética, onde as tecnologias de produção de energia, de cariz renovável, ganham cada vez mais importância. Com efeito, o estudo e desenvolvimento de tecnologias de produção de energia renovável, nos últimos tempos, tem tido uma evolução bastante satisfatória, permitindo um elevado progresso tecnológico.

Fruto da implementação de programas de sustentabilidade energética, verifica-se um aumento da utilização de fontes renováveis para produção de energia a injetar na rede<sup>1</sup>, principalmente fontes de energia hídrica, eólica, solar, oceânica, geotérmica e bioenergia.

Face ao sucessivo crescimento de fontes renováveis, e conseqüente ligação à rede, existe uma maior distribuição da produção, o que origina, com elevada probabilidade, o aumento das correntes de curto-circuito (CC), que são devidas principalmente a variações rápidas de produção (Lopes, 2006). Assim, é necessário que a rede esteja preparada para suportar as fortes alterações de trânsito de energia, induzidas pela produção descentralizada e de índole variável no tempo (Barros, 2011).

De forma a acautelar problemas relativos a correntes de curto-circuito que possam surgir, existem vários dispositivos de proteção disponíveis, como por exemplo, transformadores, indutâncias e fusíveis explosivos. No entanto, estes dispositivos apresentam alguns problemas. Os transformadores e indutâncias aumentam as perdas, enquanto os fusíveis têm que ser substituídos após falhas (Pina, 2010).

Uma alternativa aos dispositivos de proteção supra mencionados são os limitadores de corrente supercondutores. Estes dispositivos podem ser do tipo resistivo ou indutivo. Para além das redes de energia elétrica convencionais, os dispositivos de proteção também podem ser aplicados, por exemplo, nas microrredes<sup>2</sup> ou nos eletromagnetos supercondutores de armazenamento de energia<sup>3</sup> (Jiayi, Chuanwen, & Rong, 2008).

O limitador supercondutor do tipo resistivo consiste num supercondutor colocado em série com o circuito que se pretende proteger. A ligação em série permite que haja limitação a partir do momento em que a densidade de corrente presente no material supercondutor apresente valores capazes de destruir o seu estado supercondutor, tornando-o resistivo, possibilitando assim a limitação da corrente.

---

<sup>1</sup> Em 2010, 52% do consumo total bruto de energia elétrica em Portugal Continental derivou de fontes de base renovável. Prevê-se um maior crescimento no futuro. Fonte: Direção-Geral de Energia e Geologia.

<sup>2</sup> *Microgrids*, na terminologia anglo-saxónica.

<sup>3</sup> *Superconducting magnetic energy storage* (SMES), na terminologia anglo-saxónica.

Por sua vez, o limitador supercondutor do tipo indutivo consiste num enrolamento primário ligado magneticamente com um circuito secundário formado por material supercondutor. Durante o funcionamento normal, o secundário encontra-se em curto-circuito e a sua força magnetomotriz (FMM) anula a FMM produzida pelo enrolamento primário, de modo que praticamente não penetra fluxo no núcleo. Em situações de falha, i.e., aparecimento de correntes de curto-circuito na linha, a corrente induzida no supercondutor ultrapassa o seu valor crítico, destruindo o estado supercondutor, tornando-o resistivo, permitindo assim a penetração de fluxo no núcleo. A elevada variação de fluxo no núcleo aumenta a impedância do circuito primário, o que provoca a limitação de corrente (Tleis, 2008).

Algumas das vantagens dos limitadores indutivos face aos resistivos, consistem na não necessidade de pontas terminais de corrente ou na possibilidade de ajuste da impedância limitadora através do número de espiras do primário. Contudo, o seu peso e volume, causados pela presença de núcleos de ferro, é substancialmente superior, quando comparados com os mesmos limitadores resistivos (Pina, 2010). No entanto, o facto do material supercondutor dos limitadores indutivos não estar ligado galvanicamente com o circuito a proteger, ao contrário dos resistivos, permite que exista uma esperança de vida útil superior, apresentando assim maior robustez face aos resistivos. A viabilidade dos limitadores indutivos encontra-se demonstrada, por exemplo em (Paul, et al., 1997).

A facilidade de construção dos limitadores indutivos encontra-se dependente do tipo de materiais supercondutores que se pretendam utilizar. Caso se pretenda fazer uso de cilindros supercondutores maciços, a construção do limitador é simples contudo existem dificuldades em escalar limitadores para elevadas dimensões uma vez que o processo de fabrico de supercondutores maciços encontra dificuldades em manter um elevado padrão de qualidade de amostras, em grande parte devido à elevada anisotropia dos materiais supercondutores, assim como a impossibilidade de produção de cilindros maciços de elevadas dimensões. Contudo é possível obviar esta problemática através do recurso a fitas supercondutoras. A utilização de fita permite a conceção de limitadores sem grandes restrições de dimensão, uma vez que, atualmente, as principais empresas produtoras de fita supercondutora conseguem produzir fita com comprimentos bastante significativos, na ordem dos quilómetros. Um problema residual da adoção desta alternativa consiste na maior dificuldade de construção do limitador, no entanto este trabalho pretende abordar tal problema, sendo esta uma das principais motivações.

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos gerais desta dissertação são o estudo, conceção e análise de um limitador de corrente supercondutor monofásico, do tipo indutivo, baseado em fita supercondutora Bi-2223. No que diz respeito aos objetivos específicos, destacam-se:

- i. Estudo teórico dos fenómenos da supercondutividade, relativos ao limitador de corrente.
- ii. Projeto e construção do limitador, à escala laboratorial.

- iii. Procedimentos experimentais com vista à obtenção de dados relativos à limitação de correntes de curto-circuito.
- iv. Análise e crítica de resultados experimentais.
- v. Avaliação de desempenho do limitador.

### **1.3 Contribuições Originais**

Através da construção e ensaio de um limitador de corrente indutivo baseado em fita supercondutora Bi-2223, o trabalho desenvolvido pretende contribuir com evidências experimentais, de modo a avaliar o desempenho deste tipo de dispositivos, assim como fornecer elementos importantes para a potencial validação de uma metodologia de simulação destes, previamente desenvolvida na referência (Pina, 2010). Do presente trabalho resultaram contribuições para dois artigos científicos:

- i. Pina, J. M., Pereira, P., Pronto, A., Arsénio, P., Silva, T., “Modelling and simulation of inductive fault current limiters”, *Physics Procedia*, Vol. 36, pp. 1248-1253, 2012.
- ii. Arsénio, P., Silva, T., Vilhena, N., Pina, J. M., Pronto, A., “Towards predicting the performance of inductive current limiters by the analysis of their characteristic hysteresis loop”, aceite para publicação na revista *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*.

### **1.4 Organização da Dissertação**

A dissertação encontra-se subdividida em 5 capítulos.

Neste capítulo inicial procede-se a uma introdução ao trabalho, designadamente, as motivações para o seu desenvolvimento e os objetivos que se pretendem alcançar.

No Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, procede-se ao levantamento bibliográfico dos elementos necessários ao desenvolvimento do trabalho, nomeadamente, um resumo da história da supercondutividade, os conceitos e teorias da supercondutividade, os tipos de materiais supercondutores, os tipos de limitadores de corrente supercondutores e as metodologias de simulação de limitadores indutivos.

No Capítulo 3 – Construção do Protótipo, abordam-se os aspetos construtivos do protótipo, em termos dos materiais a utilizar, as características dos mesmos, assim como o princípio de funcionamento do protótipo. Também se faz referência aos métodos utilizados para aquisição de dados de ensaio.

No Capítulo 4 – Resultados e Análise, apresentam-se os dados resultantes dos ensaios efetuados, nomeadamente a lei da potência, a característica do núcleo ferromagnético e o desempenho do limitador. Este último ponto reveste-se de especial importância pois permite aferir as qualidades do dispositivo em termos de funcionamento na rede em análise, quer em regime de operação normal, quer em regime de operação em falha.

Por fim, no Capítulo 5 – Conclusões e Trabalho Futuro, apresentam-se as conclusões retiradas do desenvolvimento deste trabalho, assim como o trabalho necessário futuramente.

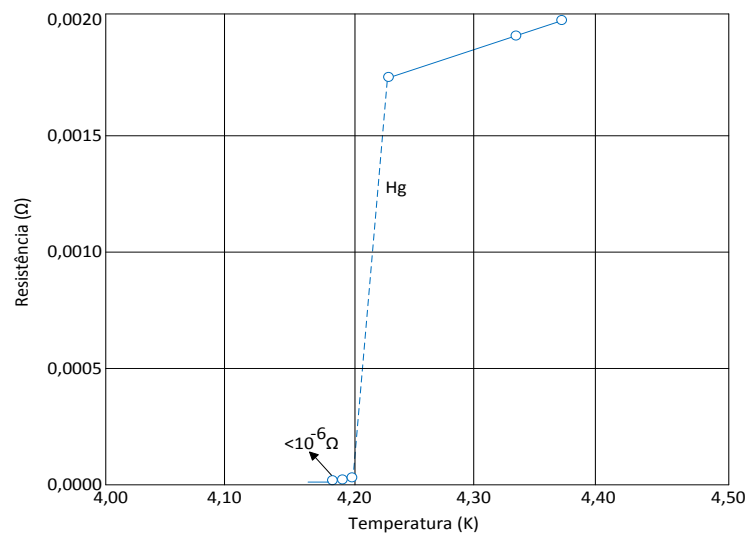


## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo abordam-se os conceitos bibliográficos mais relevantes ao desenvolvimento do trabalho. Procede-se ao levantamento dos factos históricos mais importantes da supercondutividade, expõem-se as propriedades elétricas e magnéticas mais influentes, descrevem-se as teorias mais relevantes e apresenta-se o estado atual da arte relativo a esta temática.

### 2.1 Evolução Histórica

O fenómeno da supercondutividade foi descoberto no ano de 1911, pelo físico Heike Kamerlingh Onnes, no seu laboratório em Leiden, na Holanda. Ao investigar as propriedades elétricas do mercúrio, a muito baixas temperaturas, Onnes observou que a resistência elétrica de um tubo capilar de mercúrio desaparecia, abruptamente, abaixo de 4,2 K, como se observa na Figura 2.1, contrariando as principais teorias existentes na época. Onnes, acabara assim de descobrir um novo estado da matéria, o estado supercondutor. Fruto do seu trabalho, na área da supercondutividade e também nas técnicas de liquefação do Hélio, Onnes viria a receber o prémio Nobel da Física em 1913.



**Figura 2.1 – Resistência em função da temperatura, medidas por Onnes, em tubos capilares de mercúrio.**

Após a descoberta da supercondutividade, diversos cientistas passaram ao estudo dos materiais supercondutores. Em 1933, os investigadores Walther Meissner e Robert Oschfeld descobrem que este tipo de materiais repele o fluxo magnético, tratando-se assim de um comportamento diamagnético perfeito. Este fenómeno ficou conhecido como efeito Meissner.

No ano de 1934 os físicos Holandeses Cornelius Gorter e Hendrik Casimir postularam uma teoria da supercondutividade denominada teoria dos dois fluidos. Nesta teoria, considera-se que existem eletrões “normais”, responsáveis por conceber aos materiais comportamentos “normais” e eletrões “supercondutores” responsáveis por permitir comportamentos “supercondutores”. No estado supercondutor os materiais são compostos por estes dois tipos

de elétrons, assemelhando-se, de forma análoga, a dois líquidos de características diferentes dentro de um mesmo recipiente.

Em 1935, os irmãos Fritz e Heinz London apresentam uma interpretação da supercondutividade, sob uma perspectiva macroscópica. Através desta teoria, designadamente através das chamadas equações de London, é possível descrever o efeito Meissner. Também neste estudo, os irmãos London provam que um campo magnético intenso, a partir de um determinado valor crítico, tem a capacidade de destruir a supercondutividade.

No ano de 1937, Lev Shubnikov descobre a existência de vórtices nos supercondutores, através da investigação do comportamento dos supercondutores face a campos magnéticos externos. Esta descoberta permite a definição de um novo estado nos materiais supercondutores, o estado misto.

Em 1950, Vitaly Ginzburg e Lev Landau propõem uma teoria para a supercondutividade. Esta teoria (que é baseada numa outra, a teoria da transição de fase de 2ª ordem, desenvolvida por L. Landau) descreve o comportamento dos supercondutores face a campos magnéticos.

Em 1957, Alexei Abrikosov, através da teoria de Ginzburg e Landau, prova teoricamente a existência de vórtices nos supercondutores, explicando assim os fenómenos observados nas experiências de Shubnikov.

Também em 1957, surge uma teoria microscópica acerca da supercondutividade, apresentada pelos físicos John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer, conhecida como teoria BCS, sendo amplamente aceite pela comunidade científica, permitindo explicar muitos dos fenómenos presentes nos supercondutores. Nesta teoria descrevem-se os chamados pares de Cooper, que são associações de pares de elétrons e que se comportam como portadores de carga, sabendo-se que quanto menor for a temperatura mais pares de Cooper se formam. Devido a este trabalho, Bardeen, Cooper e Schrieffer são galardoados com o prémio Nobel da Física no ano de 1972.

Em 1962, Brian Josephson prevê a existência de correntes de tunelamento<sup>4</sup> entre dois supercondutores separados por uma barreira de material isolante.

No mesmo ano de 1962, a empresa Westinghouse<sup>5</sup> comercializa o primeiro cabo supercondutor, com base numa liga de nióbio e titânio. A partir desta data, o desenvolvimento de tecnologias de manufatura e produção de objetos (cabos, fitas, blocos, etc...) à base de supercondutores tem crescido gradualmente até aos dias de hoje, com especial enfoque nos materiais com maior interesse, os supercondutores de alta temperatura, que foram descobertos em 1986 por Johannes Bednorz e Karl Muller nos laboratórios da IBM.

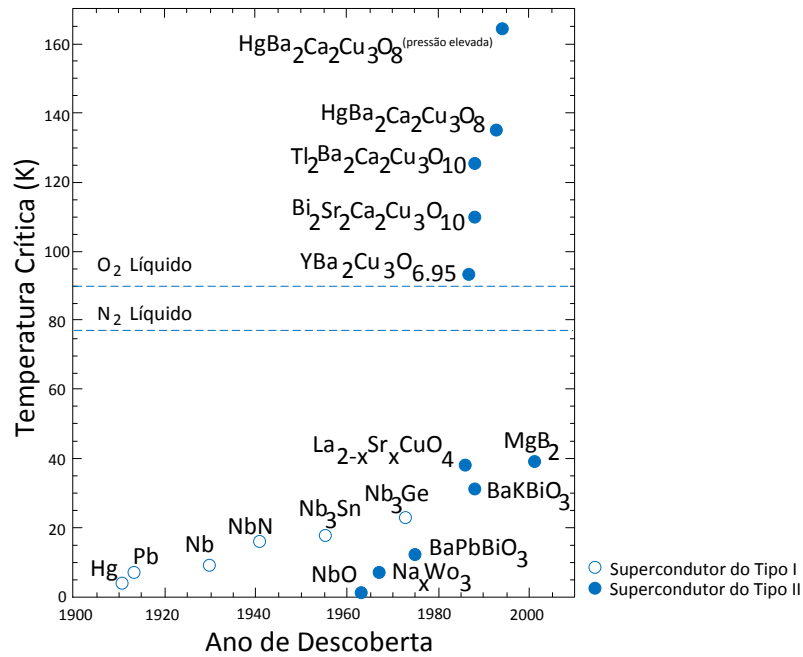
Desde a descoberta da supercondutividade, tem-se vindo a descobrir vários materiais com propriedades supercondutoras, sendo possível observar, na Figura 2.2, a evolução das descobertas ao longo do tempo. A descoberta e posterior utilização de materiais com

---

<sup>4</sup> Fenómeno quântico que permite que uma partícula (ou, par de Cooper) penetre através de uma banda de energia, embora não tenha energia suficiente para superar a banda.

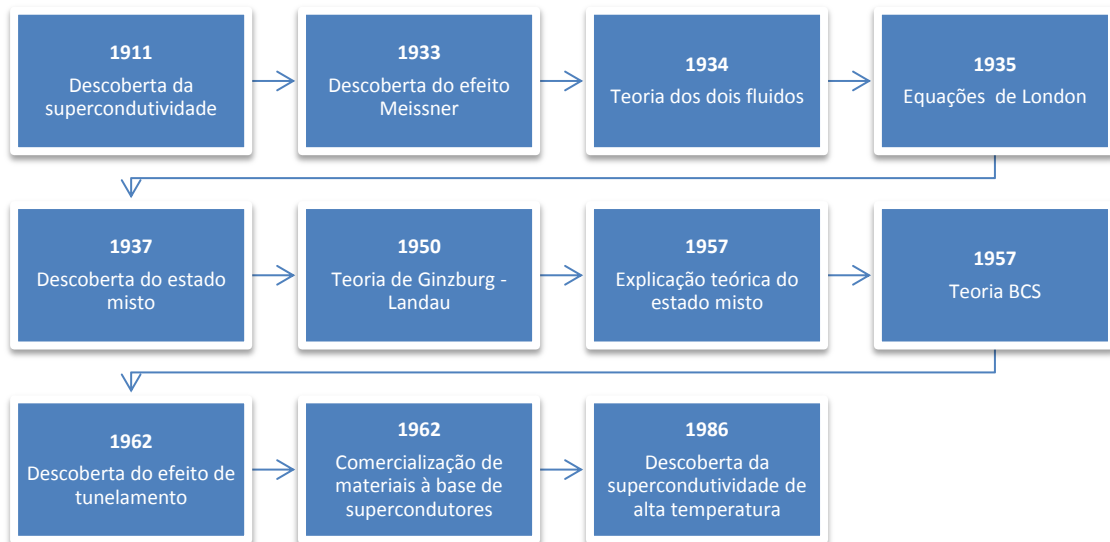
<sup>5</sup> Informação recolhida em <http://www.superconductors.org/History.htm>. Último acesso em 6 de janeiro de 2012.

temperaturas críticas superiores à temperatura do azoto líquido, 77 K, permitiu reduzir drasticamente os custos com a criogenia.



**Figura 2.2 – Evolução temporal da temperatura crítica dos materiais supercondutores desde a sua descoberta.**

Na Figura 2.3, representa-se a ordem cronológica dos eventos mais importantes acerca da evolução da supercondutividade.



**Figura 2.3 – Diagrama temporal dos aspetos mais relevantes da história da supercondutividade.**

## 2.2 Propriedades

Sendo a supercondutividade um estado da matéria, um material, no estado supercondutor, apresenta determinadas propriedades elétricas e magnéticas características. Dois fenômenos importantes que se observam nos materiais supercondutores são a resistividade nula (propriedade elétrica) e o efeito Meissner (propriedade magnética), sendo de notar que, estas propriedades apenas se observam dentro dos limites da supercondutividade. A transição entre a fase normal e a fase supercondutora determina o tipo de supercondutor, podendo este ser do tipo I ou do tipo II.

### 2.2.1 Resistividade Nula

Um material supercondutor, no caso ideal, apresenta resistividade nula, significando isto que não existe dissipação de potência e, por conseguinte, não existem perdas. Contudo esta propriedade apenas se verifica quando se trata de uma corrente apenas com componente DC. No caso em que a corrente tem componente AC, o material apresenta, ainda que reduzida, alguma resistividade.

A resistividade nula, evidenciada experimentalmente, pode ser compreendida à luz da teoria dos dois fluidos. Sumariamente, este fenómeno resulta do facto de que, abaixo da temperatura crítica, a condução através do material é feita à custa de duas categorias de eletrões: os eletrões supercondutores, que formam os chamados pares de Cooper, sendo estes responsáveis pela condução com resistividade nula, e os eletrões normais, que são eletrões com comportamento idêntico aos eletrões dos materiais condutores no estado normal e que contribuem, como se conhece, para a resistividade do material.

No caso de uma corrente DC, não existe campo elétrico  $E$  no material, logo a densidade de corrente normal é nula,  $J_n = \sigma_n E = 0$ , pelo que não existe condução por parte dos portadores de carga normais. Uma vez que a força eletrostática  $F = -eE = m_e \frac{dv}{dt} = 0$ , sendo  $e$  a carga do eletrão e  $m_e$  a sua massa, apenas serão os eletrões supercondutores os responsáveis pela condução, à velocidade  $v$ , que será constante no tempo. Assim, em regime contínuo, a resistividade do material é virtualmente nula.

No caso de uma corrente AC, existe campo elétrico no material, devido à presença de vórtices e à sua correspondente variação no espaço e no tempo, que proporcionam a existência de forças eletrostáticas capazes de colocar os eletrões normais em condução, pelo que parte da corrente será conduzida por eletrões normais e outra parte por pares de Cooper, existindo desta forma resistividade no material, embora bastante reduzida comparativamente a um condutor metálico convencional (Stavrev, 2002).

### 2.2.2 Efeito Meissner

A par da resistividade nula, o efeito Meissner é uma das propriedades mais importantes dos supercondutores. O efeito Meissner consiste na expulsão das linhas de fluxo magnético do interior do supercondutor. A este efeito também se denomina diamagnetismo perfeito, pois o material, no estado supercondutor, comporta-se como um diamagneto perfeito.

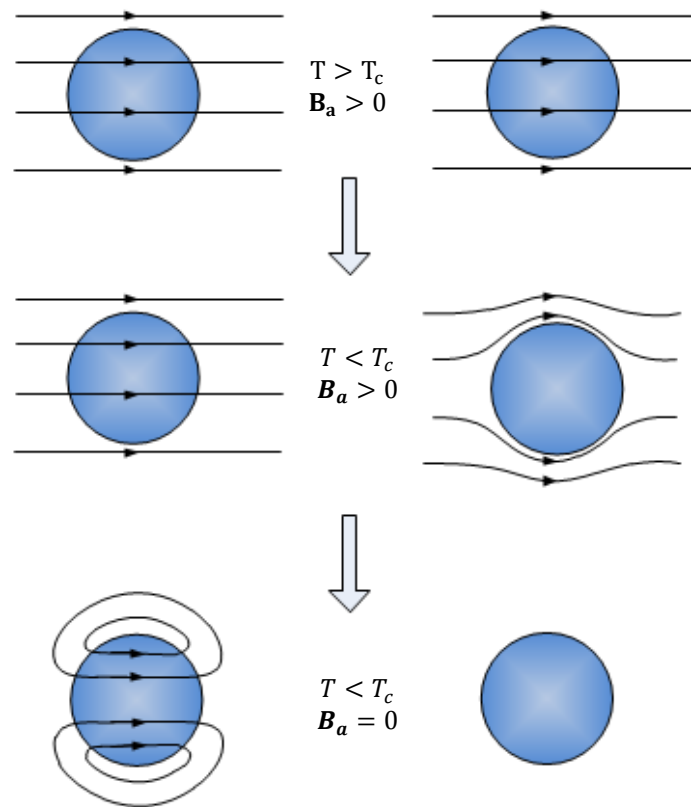


Em qualquer material, a densidade de fluxo  $B$  relaciona-se com o campo magnético aplicado  $H$  e com a magnetização  $M$  através da seguinte expressão:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.1)$$

Num diamagneto perfeito tem-se  $M = -H$ , pelo que  $B = 0$ . Assim, verifica-se que não existe densidade de fluxo magnético no interior de um material que apresente um comportamento diamagnético perfeito.

Note-se, no entanto, que um supercondutor não apresenta o mesmo comportamento que um condutor perfeito. Enquanto no interior de um supercondutor não existe fluxo, pois  $B = 0$ , no interior de um condutor perfeito vem  $dB/dt = 0$ , fazendo com que a variação das linhas de fluxo seja constante ao longo do tempo, podendo, portanto, existir fluxo no interior do condutor, tal como se observa na Figura 2.4.



a) Condutor perfeito,  $dB/dt = 0$ .

b) Supercondutor,  $B = 0$ .

Figura 2.4 – Comparação entre a) condutor perfeito e b) supercondutor.

### 2.2.3 Limites da Supercondutividade

A supercondutividade consiste num estado da matéria que depende de três grandezas físicas, a densidade de corrente  $J$ , o campo magnético  $H$  e a temperatura  $T$ . A relação entre  $J$ ,  $H$  e  $T$  designa-se por espaço de fases e representa os limites físicos da supercondutividade. Na Figura 2.5, ilustra-se um exemplo do espaço de fases de um supercondutor.

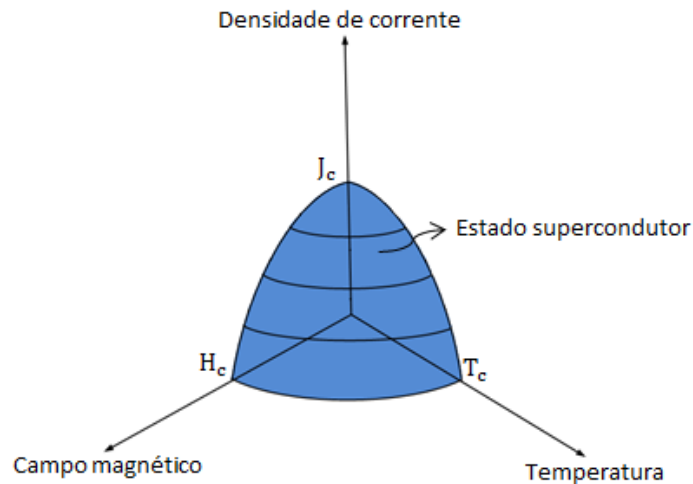


Figura 2.5 – Espaço de fases de um supercondutor.

Qualquer uma das três grandezas pode fornecer energia necessária capaz de destruir a supercondutividade, pelo que, se uma ou mais condições de (2.2) não se verificar, o material perde a supercondutividade e transita para o estado normal<sup>6</sup>.

$$\begin{cases} J < J_c \\ H < H_c \\ T < T_c \end{cases} \quad (2.2)$$

## 2.2.4 Classes de Supercondutores

Existem duas classes de supercondutores, os do tipo I e os do tipo II, também denominados supercondutores macios e duros, respetivamente. A distinção de classes deve-se fundamentalmente às diferentes propriedades eletromagnéticas que se verificam.

### 2.2.4.1 Supercondutores do Tipo I

Os supercondutores do tipo I, ou macios, caracterizam-se por apresentar uma transição bastante abrupta entre o estado normal e o estado supercondutor. Quando no estado supercondutor, o material apresenta, de forma praticamente perfeita, o efeito Meissner. Contudo, para campos externos superiores ao valor crítico  $H_c$ , o material perde as propriedades supercondutoras, transitando para o estado normal de forma bastante abrupta, como se evidencia na Figura 2.6. O valor do campo magnético crítico depende da temperatura e é nulo quando o material se encontra à temperatura crítica  $T_c$ .

<sup>6</sup> Adiante se verá que, nalguns casos, os supercondutores poderão não transitar totalmente para o estado normal, mas sim para o estado misto, devido à existência de campos magnéticos críticos inferior e superior,  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ , respetivamente.

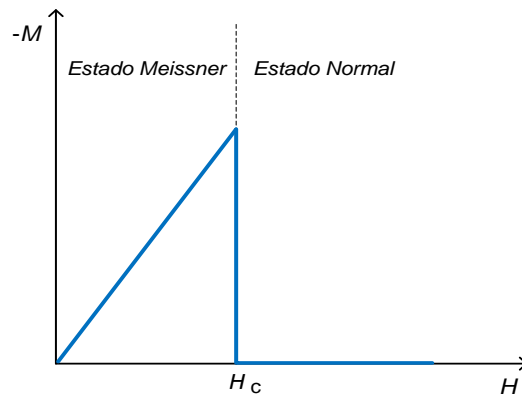


Figura 2.6 – Magnetização de um supercondutor do tipo I em função do campo aplicado.

#### 2.2.4.2 Supercondutores Tipo II

Os supercondutores do tipo II, ou duros, são relativamente diferentes dos supercondutores do tipo I, pois o comportamento face a campos magnéticos externos é bastante diferente, principalmente no que respeita à fase de transição entre os estados supercondutor e normal. Na fase de transição existe o chamado estado misto, caracterizado por permitir a coexistência do estado supercondutor e do estado normal no material, tal como se ilustra na Figura 2.7.

Exposto a campos externos fracos, tal como nos supercondutores macios, também os supercondutores duros apresentam efeito Meissner, repelindo as linhas de fluxo magnético do seu interior até um determinado campo crítico  $H_{c1}$ . Acima de  $H_{c1}$  ocorre o fenómeno de penetração de linhas de fluxo no interior do material, provocando a coexistência dos estados normal e supercondutor, ou seja, o denominado estado misto, que também pode ser designado por estado Shubnikov.

Quanto mais elevado for o campo externo, maior penetração de fluxo existe no material, até que, atingido um determinado campo  $H_{c2}$ , o material perde praticamente todas as propriedades supercondutoras, tornando-se um material dito normal.

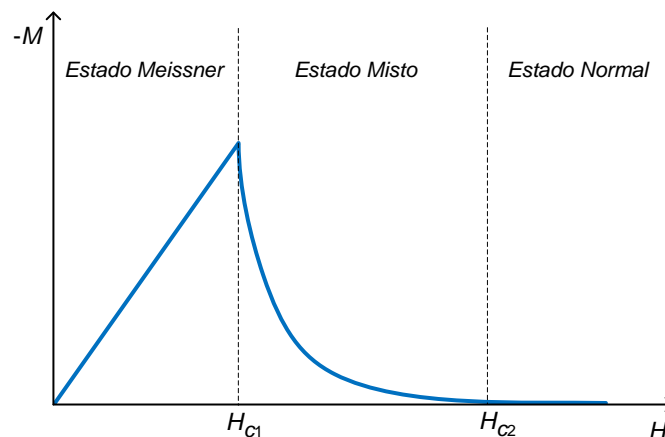


Figura 2.7 – Magnetização de um supercondutor do tipo II em função do campo aplicado.

## 2.3 Teorias da Supercondutividade

Desde a descoberta da supercondutividade que se têm desenvolvido diversas teorias, quer pela via microscópica, quer pela via macroscópica, na tentativa de explicar os vários fenómenos observados experimentalmente.

### 2.3.1 Teoria dos Dois Fluidos

A teoria dos dois fluidos consiste numa teoria microscópica, desenvolvida em 1934 por Hendrik Casimir e Cornelius Jacobus Gorter. Esta teoria permite explicar o fenómeno de resistividade nula observado nos supercondutores, através da interpretação de que a corrente elétrica  $J$  num material supercondutor é composta por duas componentes, uma componente normal, de densidade  $J_n$ , característica dos materiais condutores convencionais, e outra, uma corrente supercondutora, de densidade  $J_s$ , característica dos materiais supercondutores, de modo que  $J = J_n + J_s$ .

A teoria baseia-se no facto de que, em regime DC, não existe campo elétrico no interior de um condutor. Pela lei de Ohm local:

$$J_n = \sigma E \quad (2.3)$$

Sendo  $\sigma$  a condutividade elétrica da fase normal. Verifica-se que não existe densidade de corrente normal no supercondutor quando o campo elétrico é nulo. Assim, a corrente será transportada apenas pelos eletrões supercondutores, de forma constante ao longo do tempo, como se verifica pela segunda lei de Newton:

$$F = -eE = m_e \frac{dv}{dt} \quad (2.4)$$

Como o campo elétrico é nulo,  $\frac{dv}{dt} = 0$ , donde resulta  $v$  constante.

Em regime AC, verifica-se a presença de campo elétrico não nulo, pelo que coexistem as correntes normal e supercondutora no material, ou seja:

$$\begin{cases} J_n \neq 0 \\ m_e \frac{dv}{dt} \neq 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Nesta situação a resistência elétrica do material não é nula, fruto da condução de corrente ser assegurada, em parte, por eletrões normais. No entanto a resistência é bastante inferior quando comparada aos materiais normais, pois parte da condução é assegurada por eletrões supercondutores. Historicamente, a designação desta teoria por teoria dos dois fluidos resulta da analogia a um recipiente contendo dois fluidos diferentes mas coexistindo ambos no interior do mesmo.

### 2.3.2 Equações de London

A teoria proposta pelos irmãos London, em (London & London, 1935), propõe explicar as propriedades elétricas e magnéticas que se observam num supercondutor, segundo uma abordagem macroscópica.

Sendo a densidade de corrente num condutor normal  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ , os irmãos London partem do pressuposto que a densidade de corrente num supercondutor é diferente da densidade de corrente num condutor normal, caracterizando o comportamento elétrico do supercondutor através da primeira equação de London:

$$\Lambda \frac{d\mathbf{J}}{dt} = \mathbf{E} \quad (2.6)$$

A constante  $\Lambda$  pode ser determinada, partindo do conhecimento de que  $\mathbf{J} = n_e e v$ . Pelo que, derivando em ordem ao tempo e sabendo que, pela segunda lei de Newton,  $\frac{dv}{dt} = -\frac{e\mathbf{E}}{m_e}$ , então, tomando em consideração os módulos vetoriais, vem:

$$\Lambda = \frac{m_e}{n_e e^2} \quad (2.7)$$

O comportamento magnético do supercondutor determina-se, partindo da primeira equação de London, através da aplicação da rotacional em ambos os lados da igualdade:

$$\Lambda \frac{d}{dt} \nabla \times \mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{E} \quad (2.8)$$

Donde resulta a segunda equação de London, que, como referido, caracteriza o comportamento magnético do supercondutor:

$$\mathbf{B} = -\Lambda \nabla \times \mathbf{J} \quad (2.9)$$

Pela lei de Ampère,  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ , tem-se:

$$\mathbf{B} = -\frac{\Lambda}{\mu_0} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (2.10)$$

Sabendo que  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B}$  e, pela lei de Maxwell que,  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ , então obtém-se:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{\Lambda} \mathbf{B} \quad (2.11)$$

O único campo magnético uniforme que satisfaz a equação (2.11) é  $\mathbf{B} = 0 \text{ T}$ , ou seja, verifica-se que o campo magnético é nulo no interior do supercondutor. Da constante  $\frac{\mu_0}{\Lambda}$  define-se a profundidade de penetração:

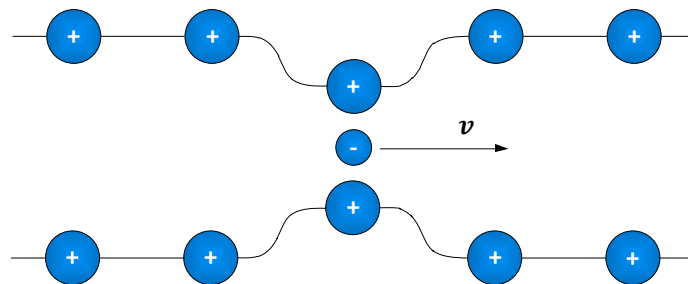
$$\lambda_L = \sqrt{\frac{\Lambda}{\mu_0}} \quad (2.12)$$

A profundidade de penetração representa a espessura da camada superficial em que o material é penetrado por fluxo magnético, sendo o fluxo aplicado externamente.

### 2.3.3 Teoria BCS

Em 1957, J. Bardeen, L. Cooper e J. Schrieffer, formularam uma teoria microscópica da supercondutividade conhecida hoje como teoria BCS.

De acordo com esta teoria, os eletrões de um supercondutor formam pares, conhecidos como pares de Cooper. A formação dos pares de Cooper deve-se à interação entre os eletrões e os iões positivos da rede cristalina. O eletrão atrai os iões positivos que se encontram próximos, aumentando a concentração de cargas positivas em certas regiões do espaço, como se ilustra na Figura 2.8.



**Figura 2.8 – Concentração local de iões positivos devido à passagem de um eletrão.**

Como os iões positivos se encontram presos na rede cristalina por forças eletrostáticas, a região de alta densidade de carga propaga-se pelo material, devido à interação com os eletrões. Deste fenómeno resulta uma onda de vibração ao longo da rede cristalina, levando ao surgimento de fonões. Um fonão representa um *quantum* de onda sonora.

Em resultado da presença de uma região de elevada densidade de carga positiva, um segundo eletrão é atraído, podendo absorver o fonão. Assim, os dois eletrões interagem por intermédio do fonão, sendo esta interação atrativa de modo que, ambos os eletrões são atraídos para a região de elevada densidade de carga positiva.

Abaixo da temperatura crítica do material, a força de atração entre os dois eletrões é superior que a força de repulsão de Coulomb entre ambos, formando-se assim os pares de Cooper (Lima, 2005).

### 2.3.4 Teoria de Ginzburg-Landau

Em 1950 Ginzburg e Landau propõem uma teoria que pretende descrever fenomenologicamente o comportamento observado nos supercondutores. Esta teoria, publicada em (Ginzburg & Landau, 1965), baseia-se na caracterização da supercondutividade nos diversos locais do material, segundo um termo introduzido, o parâmetro de ordem. O

parâmetro de ordem, designado, em função da sua posição espacial, por  $\psi(\mathbf{r})$ , representa a chamada função de onda de Ginzburg-Landau (GL) (Parks, 1969) (Poole, 2000). Esta função reproduz, segundo a teoria, a transição entre as fases normal e supercondutora, sendo dependente da temperatura, donde:

$$\begin{cases} \psi(\mathbf{r}) = 0, \text{ para } T > T_c \\ \psi(\mathbf{r}) \neq 0, \text{ para } T < T_c \end{cases} \quad (2.13)$$

A função de onda GL, relaciona-se com a densidade local de eletrões supercondutores,  $\eta_s$ , através da seguinte expressão:

$$\eta_s(\mathbf{r}) = |\psi(\mathbf{r})|^2 \quad (2.14)$$

Na ausência de campo magnético, a densidade de energia livre num supercondutor é expressa por:

$$f = f_n + \alpha|\psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\psi|^4 + \frac{1}{2m^*}|(-j\hbar\nabla - e^*\mathbf{A})\psi|^2 + \frac{|\mathbf{B}|^2}{2\mu_0} \quad (2.15)$$

Sendo  $f_n$  a densidade de energia livre no estado normal (na ausência de campo magnético),  $m^* = 2m_e$ ,  $e^* = 2e$ ,  $\alpha$  um parâmetro dependentes da temperatura,  $\beta$  um parâmetro independente da temperatura,  $\hbar = h/2\pi$  a constante de Planck reduzida e  $\mathbf{A}$  o vetor potencial.

Ligeiramente abaixo da temperatura crítica, a densidade de energia livre pode ser minimizada em ordem a  $\psi$ , com base no princípio variacional<sup>7</sup>, resultando a primeira equação GL:

$$\frac{1}{2m^*}(-j\hbar\nabla - e^*\mathbf{A})^2 \psi + \alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi = 0 \quad (2.16)$$

Minimizando a densidade de energia livre em ordem ao vetor potencial  $\mathbf{A}$ , obtém-se a segunda equação GL:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \frac{j\hbar e^*}{2m^*}(\psi^*\nabla\psi - \psi\nabla\psi^*) + \frac{e^{*2}}{m^*}\mathbf{A}|\psi|^2 = 0 \quad (2.17)$$

Com base na primeira e segunda equação GL é possível determinar as propriedades do estado supercondutor (Poole, 2000). O comprimento de coerência  $\xi$ , expresso em (2.18), interpreta-se como sendo a distância necessária para que a densidade de eletrões supercondutores  $\eta_s$  presentes na fronteira entre as regiões normal e supercondutora suba desde zero até ao seu valor normal no interior do material. A profundidade de penetração  $\lambda_L$ , interpreta-se tal como a teoria de London, sendo a distância média de penetração de fluxo

<sup>7</sup> Método matemático utilizado para encontrar funções que minimizem ou maximizem valores de quantidades que dependam de tais funções.

magnético externo no interior do supercondutor. Tanto o comprimento de coerência como a profundidade de penetração são dependentes da temperatura (Sass, 2011).

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m^*} |\alpha|} \quad (2.18)$$

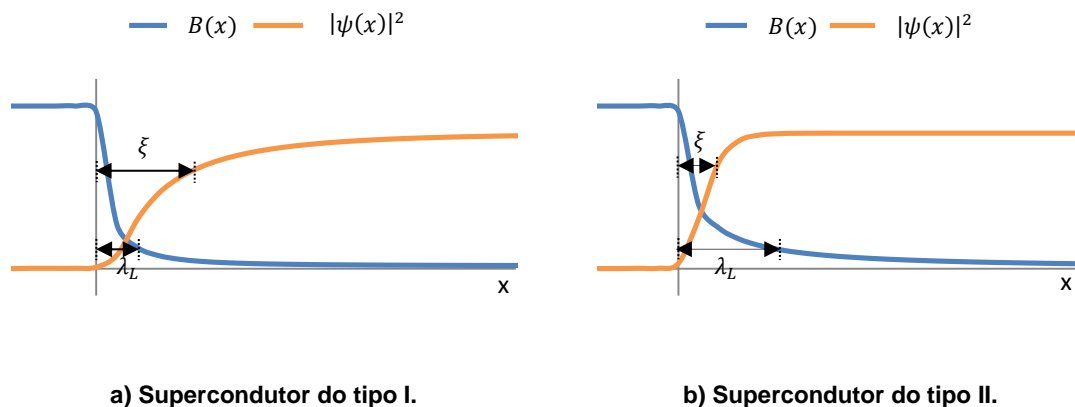
Ao rácio entre a profundidade de penetração e o comprimento de coerência denomina-se parâmetro GL:

$$\kappa = \frac{\lambda_L}{\xi} \quad (2.19)$$

Com base no parâmetro GL é possível distinguir os supercondutores do tipo I dos supercondutores do tipo II. Nos supercondutores do tipo I tem-se  $\xi > \lambda_L$ , enquanto nos supercondutores do tipo II se tem  $\xi < \lambda_L$ , tal como se apresenta em (2.20).

$$\begin{cases} \kappa < \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ Tipo I} \\ \kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ Tipo II} \end{cases} \quad (2.20)$$

Na Figura 2.9 encontra-se representada a relação entre um campo de indução externo e a distância ao centro entre  $\xi$  e  $\lambda_L$  tanto para os supercondutores do tipo I como para os supercondutores do tipo II.



**Figura 2.9 – Densidade de fluxo e densidade local de eletrões supercondutores num supercondutor a) do tipo I e b) do tipo II.**

A aplicação de um campo externo a um supercondutor provoca o surgimento de vórtices ou fluxóides, que são quantidades de fluxo distribuído por unidade quântica, como se ilustra na Figura 2.10. Nesta Figura também se apresenta uma ilustração da densidade de fluxo e densidade local de eletrões supercondutores no interior do supercondutor.



Por cada vórtice está associado um *quantum* de fluxo  $\phi_0$ , que vale:

$$\phi_0 = \frac{h}{e^*} = 2,068 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (2.21)$$

O efeito Meissner perfeito apenas se observa nos supercondutores do tipo I, uma vez que nos supercondutores do tipo II o campo não se anula tão rapidamente à medida que penetra no supercondutor quanto os supercondutores do tipo I. Assim, à luz desta teoria a densidade de fluxo crítica para um supercondutor do tipo I pode ser aproximada por:

$$B_c = \frac{\phi_0}{2\sqrt{2}\pi\xi\lambda_L} \quad (2.22)$$

Relativamente aos supercondutores do tipo II, dada a existência do estado misto, existe penetração de fluxo quantizado por meio de vórtices entre  $B_{c1}$  e  $B_{c2}$ . Para valores inferiores a  $B_{c1}$  verifica-se o estado Meissner e para valores superiores a  $B_{c2}$  verifica-se o estado normal. Os valores de  $B_{c1}$  e  $B_{c2}$  são expressos por:

$$\begin{cases} B_{c1} = \frac{\phi_0 \ln(\kappa)}{4\pi\lambda_L^2} \\ B_{c2} = \frac{\phi_0}{2\pi\xi^2} \end{cases} \quad (2.23)$$

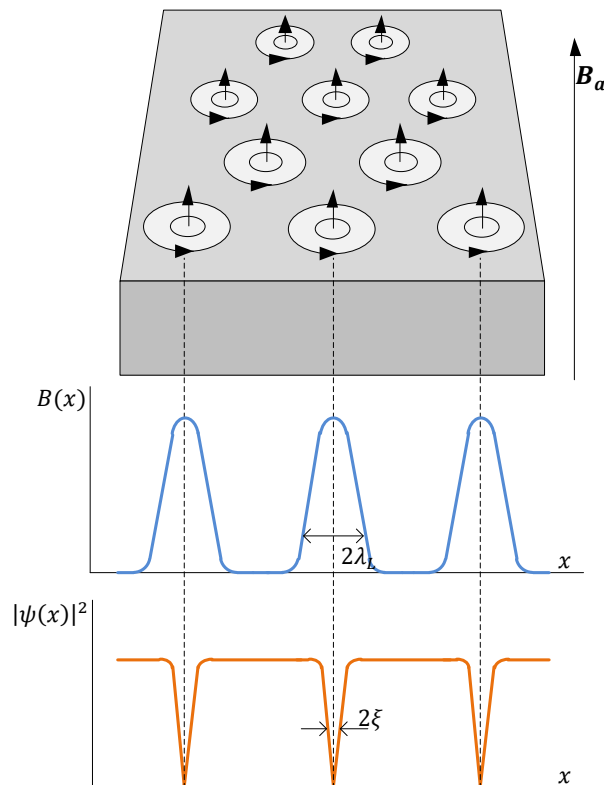


Figura 2.10 – Ilustração da densidade de fluxo e densidade local de elétrons supercondutores no interior de um supercondutor.

## 2.4 Modelização de Supercondutores

De forma a tentar explicar os fenómenos da supercondutividade, nomeadamente nos supercondutores do tipo II, têm-se feito ao longo do tempo, diversos contributos, mediante o desenvolvimento de modelos, tal como é o caso dos modelos de estado crítico ou da lei da potência E-J.

### 2.4.1 Modelos de Estado Crítico

Os modelos de estado crítico têm por objetivo descrever o comportamento dos supercondutores do tipo II, segundo a consideração dos valores críticos das grandezas eletromagnéticas afetas aos supercondutores deste tipo, designadamente as grandezas relacionadas com o espaço de fases deste tipo de supercondutores.

Dos principais modelos de estado crítico destacam-se o modelo de Bean, (Bean, Magnetization of Hard Superconductors, 1962), (Bean, Magnetization of High-Field Superconductors, 1964) e o modelo de Kim, (Kim, Hempstead, & Strnad, Critical Persistent Currents in Hard Superconductors, 1962), (Kim, Hempstead, & Strnad, Magnetization on Critical Supercurrents, 1963).

Apesar de grande parte dos modelos de estado crítico serem de base fenomenológica, desvalorizando, em parte, os fenómenos microscópicos que ocorrem nos supercondutores, os resultados previstos por estes modelos apresentam, sob determinadas condições, elevada concordância com resultados experimentais.

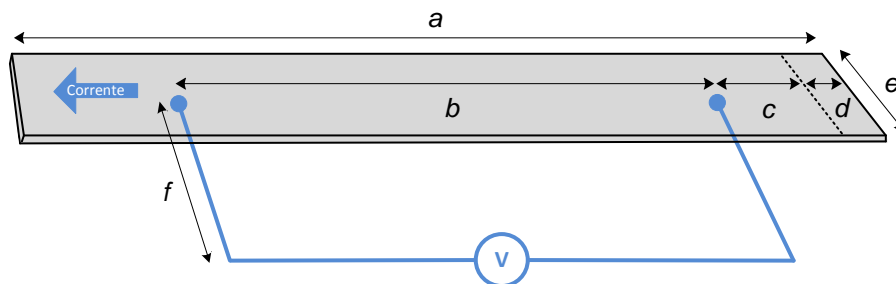
### 2.4.2 Lei da Potência E-J

Ao contrário do modelo de Bean, onde se consideram que as correntes no supercondutor podem apenas tomar o valor nulo ou o valor crítico, na lei da potência E-J, a corrente, caso exista, não apresenta, em todo o caso, o seu valor crítico. A lei da potência E-J é expressa por:

$$E(J) = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.24)$$

Onde  $E_c$  representa o campo eléctrico crítico e normalmente é definido segundo o critério  $E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ,  $J_c$  representa a densidade de corrente crítica e o expoente  $n$  indica a forma da curva E-J, caracterizando a transição entre estados normal e supercondutor.

No caso de fitas supercondutoras, a lei da potência E-J pode-se determinar, sob o ponto de vista experimental, de acordo com o padrão internacional (IEC 61788-3, 2006). O método de medição consiste no denominado método dos quatro pontos, ilustrado na Figura 2.11, que consiste na aplicação de uma corrente DC a uma amostra de fita, registando-se os diversos valores de corrente aplicada e a respetiva queda de tensão entre dois pontos localizados na amostra.



**Figura 2.11 – Esquema de princípio para medição da lei da potência numa fita supercondutora.**

Com base na Figura 2.11,  $a$  representa o comprimento total da amostra de fita,  $b$ , a distância entre os pontos de medição de queda de potencial,  $c$ , a distância mínima entre o ponto de medição da queda de potencial e a zona de contacto por soldadura,  $d$ , o comprimento da zona de contacto por soldadura,  $e$ , representa a largura da amostra de fita e, por fim,  $f$ , representa o comprimento dos fios de recolha dos pontos de queda de potencial. De acordo com (IEC 61788-3, 2006) é necessário obedecer às seguintes condições:

$$\begin{cases} a \geq 5e \\ b, c, d \geq e \end{cases} \quad (2.25)$$

## 2.5 Materiais Supercondutores de Alta Temperatura

O surgimento dos supercondutores ditos de alta temperatura permitiu reduzir drasticamente os custos de refrigeração. Por exemplo, o oxigénio, no estado líquido, encontra-se à temperatura de 90 K e o azoto, nesse mesmo estado, encontra-se a 77 K. Como os custos de liquefação deste tipo de gases é muito menos dispendioso comparativamente ao hélio (na ordem das mil vezes menor, segundo (Sheaen, 2002)), abriu-se um horizonte para desenvolvimento de aplicações viáveis, baseadas em supercondutores de alta temperatura.

Os SAT mais utilizados em aplicações de potência são materiais do tipo cerâmico, constituídos à base de óxidos de cobre e mantêm a supercondutividade a temperaturas relativamente elevadas, designadamente o YBCO e o BSCCO. Existem também, o TBCCO e o HBCCO, embora estes não sejam produzidos em tão larga escala como o YBCO e o BSCCO. As temperaturas até às quais estes materiais preservam a supercondutividade encontram-se na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Temperatura crítica dos SAT de maior aplicação em dispositivos de potência.**

Designação	Fórmula	Temperatura Crítica (K)
YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	92
BSCCO	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$	105
TBCCO	$\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	115
HBCCO	$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	135 <sup>8</sup>

<sup>8</sup> Sob elevada pressão, tipicamente a 160 kbar.

## 2.5.1 Formatos Comerciais dos SAT

Os SAT disponíveis comercialmente possuem formatos exclusivos para determinadas aplicações, podendo ser do tipo maciço, em fita ou em cabo.

### 2.5.1.1 Blocos Maciços

Os supercondutores em blocos maciços podem ser mono ou policristalinos. Os blocos monocristalinos apresentam densidades de corrente mais elevadas, comparativamente aos blocos policristalinos. As diferenças são devidas à redução da corrente entre os limites de grão, que existem nos blocos policristalinos, ao contrário dos blocos monocristalinos. Este tipo de blocos normalmente apresentam propriedades francamente anisotrópicas, o que poderá, nalguns casos, constituir um problema. Na Figura 2.12 apresentam-se dois exemplos de blocos maciços supercondutores disponíveis comercialmente.



a) Tubo para blindagem magnética em Bi-2223 comercializado pela CAN Superconductors

b) Bloco para levitação magnética em YBCO comercializado pela CAN Superconductors

Figura 2.12 – Exemplos de blocos maciços SAT disponíveis comercialmente.

### 2.5.1.2 Fitas

As fitas supercondutoras têm vindo, gradualmente, a ser utilizadas cada vez mais em dispositivos de energia. Atualmente existem duas gerações de fitas supercondutoras com características díspares entre si.

As fitas 1G, são formadas por filamentos de BSCCO embebidos numa matriz de prata, que dota a fita de maior flexibilidade e robustez mecânica. Apesar da maior flexibilidade conferida pela matriz de prata, existe um limite mínimo de raio de flexão até onde as propriedades supercondutoras da fita não se degradam, que são tipicamente na ordem das dezenas de milímetros. Comercialmente existem duas fases, a Bi-2212 e a Bi-2223, tendo como temperaturas críticas aproximadamente 90 K e 110 K, respetivamente.

As fitas 2G, também conhecidas como condutores revestidos a Y-123, são fitas constituídas à base de filmes finos depositados sobre substratos. Estas fitas apresentam campos, temperaturas e densidades de corrente críticas superiores às que se verificam nas fitas 1G, além de melhores propriedades mecânicas, sendo atualmente mais caras que as fitas 1G. Para ambos os casos, as fitas podem também ter isolamento elétrico ao longo da sua

superfície. Na Figura 2.13 apresentam-se dois exemplos de fitas supercondutoras disponíveis comercialmente.



a) Fita 1G comercializada pela Innost.



b) Fita 2G comercializada pela Suptech.

**Figura 2.13 – Exemplo de fitas SAT disponíveis comercialmente.**

### 2.5.1.3 Cabos

Os cabos supercondutores constituem uma alternativa aos cabos convencionais de transporte de energia, uma vez que apresentam melhor condutividade elétrica e, por conseguinte, reduzidas perdas por efeito de Joule e baixas quedas de tensão ao longo do cabo. Na Figura 2.14 apresentam-se dois exemplos de cabos disponíveis comercialmente.

Contudo ainda existem alguns aspetos a melhorar, que se esperam resolver a médio prazo, tais como a redução do seu custo de produção, melhor resistência à corrosão e uma maior tensão de rutura, de forma a suportar elevados esforços mecânicos e térmicos.



a) Cabo supercondutor monofásico comercializado pela Nexans.



b) Cabo supercondutor trifásico comercializado pela HTSTriax.

**Figura 2.14 – Exemplo de cabos SAT disponíveis comercialmente.**

## 2.5.2 Aplicações

Os SAT possuem um enorme potencial no domínio da energia, podendo ter diversas aplicações tais como, cabos elétricos, transformadores de potência, limitadores de corrente, sistemas de armazenamento de energia, geradores elétricos, motores elétricos de relutância e de histerese, chumaceiras magnéticas, levitação eletromagnética em transportes (*Maglev*), dispositivos de ressonância magnética, aceleradores de partículas, entre outros.

## 2.6 Limitadores de Corrente

Os sistemas de proteção dos SEE têm-se vindo a tornar cada vez mais complexos e exigentes, devido às necessidades de integrar fontes de geração distribuída, nos mais diversos pontos da rede.

As correntes de falha são um problema bastante significativo para as redes elétricas e respetivos equipamentos, pelo que se deve garantir um nível de proteção adequado de forma a garantir a segurança, confiabilidade e disponibilidade. Os limitadores de corrente oferecem uma solução para otimizar a segurança, confiabilidade e disponibilidade das redes face ao novo paradigma da geração energética.

### 2.6.1 Introdução

De uma forma genérica, o limitador de corrente deve possuir as seguintes características (Pina, 2010) (Hewitson, Brown, & Balakrishnan, 2004):

- i. Seletividade: Ao limitar a corrente, a falha deve ser suprimida, de forma a não afetar os restantes elementos presentes no SEE.
- ii. Estabilidade: Garantia de que os elementos do SEE que não contribuem para falhas na rede funcionam dentro da normalidade, assegurando a continuidade de serviço.
- iii. Tempo de deteção de falha reduzido: A deteção de falha deve ser feita o mais rapidamente possível, minimizando assim os potenciais danos e garantindo a segurança dos equipamentos.
- iv. Tempo de resposta a falha reduzido: Detetada a falha, deve haver uma rápida limitação, prevenindo elevados níveis de falha.
- v. Sensibilidade dinâmica: Facilidade em alterar o poder de limitação do dispositivo.
- vi. Atuação autónoma: Limitação com ativação automática.
- vii. Recuperação autónoma: Assim que estejam estabelecidas as condições normais de funcionamento, o limitador deve retornar ao seu estado normal
- viii. Impedância reduzida sob funcionamento normal: Pouca interferência na rede, de modo a permitir custos operacionais reduzidos.
- ix. Impedância elevada sob funcionamento em falha: Limitação efetiva de corrente.

### 2.6.2 Estado da Arte

Atualmente existem diversos limitadores de corrente em utilização nas redes elétricas (ou, em alternativa, alterações na rede para redução das correntes de falha), com desempenho comprovado mas com algumas limitações identificadas. Por outro lado, encontram-se em fase de desenvolvimento vários limitadores baseados em supercondutores, que pretendem resolver as limitações identificadas.

### 2.6.2.1 Limitadores de Corrente Convencionais

As formas mais comuns para a redução dos níveis de corrente de curto-circuito são (Schmitt, 2003):

- i. Construção de novas subestações.
- ii. Construção ou separação de barramentos.
- iii. Transformadores de elevada impedância.
- iv. Fusíveis de elevada tensão.
- v. Limitadores de corrente pirotécnicos ou limitadores  $I_s$ .
- vi. Reatores de núcleo de ar.

No entanto, a limitação de correntes de falha com base nos mecanismos supra mencionados encontra algumas limitações.

A Construção de novas subestações, apesar de resolver grande parte dos problemas, por norma, é bastante dispendiosa e morosa.

A construção ou separação de barramentos, é uma solução não tão dispendiosa como a construção de novas subestações, mas no entanto perde-se interconetividade<sup>9</sup> na rede ao construir ou separar barramentos, significando que se reduzem as fontes que contribuem para uma falha, mas também se reduzem as que fornecem as correntes em situações normais ou de sobrecarga.

O recurso a transformadores de elevada impedância, limita efetivamente a corrente, aquando de uma falha, mas em funcionamento normal, a impedância não é desprezável, observando-se perdas associadas.

A limitação da corrente na linha através de um fusível colocado em série com esta, provoca a interrupção do circuito, caso surja uma falha, além de que necessita de ser substituído posteriormente, permanecendo o circuito em aberto até que tal substituição se suceda (Bauml & Kaltenborn, 2011).

Uma alternativa com melhor desempenho consiste nos dispositivos pirotécnicos ou limitadores  $I_s$ , estando representado um exemplar na Figura 2.15. Esta tipologia consiste em duas câmaras em paralelo, sendo que, uma delas contém o condutor, oferecendo um caminho preferencial para a corrente (com perdas relativamente baixas), enquanto na outra, se encontra o fusível. Neste dispositivo, existe também um sensor de corrente, responsável pelo comando de elementos capazes de interromper a passagem de corrente pelo condutor, assim que surja um aumento significativo de corrente. Por consequência, o único caminho possível para a circulação de corrente será através do fusível, o que, por via da sua destruição, provoca a extinção da corrente de CC em menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo (Schaffer, 2000). Segundo o fabricante ABB, o limitador  $I_s$  produzido pela empresa, com gamas de tensão entre 0,75 kV e 40,5 kV e gamas de corrente entre 630 A e 5000 A, é capaz de detetar e limitar uma corrente de curto-circuito durante seu crescimento inicial, em menos de 1 ms.

---

<sup>9</sup> Várias fontes ligadas ao mesmo barramento.



**Figura 2.15 – Limitador  $I_s$  da ABB.**

Uma outra alternativa para a limitação de corrente é o reator de núcleo de ar, tal como se ilustra na Figura 2.16. Este dispositivo aciona-se automaticamente sem necessidade de sensores e limita a corrente de falha devido à queda de tensão aos seus terminais. A impedância do reator depende da corrente que o atravessa, apresentando um comportamento linear. Normalmente este dispositivo não necessita de manutenção e tem pouco impacto ambiental. Contudo, em funcionamento normal, o dispositivo apresenta impedância considerável, que conduz a perdas associadas (Bauml & Kaltenborn, 2011).



**Figura 2.16 – Reator de núcleo de ar da Alstom.**

#### 2.6.2.2 Limitadores de Corrente Supercondutores

Graças ao seu tempo de resposta, quase instantâneo, os LCS permitem evitar a sobrecarga prejudicial dos elementos da rede. Prevêem-se diversos pontos de aplicação dos LCS ao nível das redes de geração, transporte e distribuição. As gamas de tensão para aplicação dos LCS são essencialmente a média tensão<sup>10</sup> (MT) e a alta tensão<sup>11</sup> (AT). No entanto, não é de excluir aplicações em baixa tensão<sup>12</sup> (BT). Os LCS podem ser aplicados em diversos locais da rede, observe-se a Figura 2.17, nomeadamente (Kozak & Janowski, 2003) (Pina, 2010):

<sup>10</sup> Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1 kV e igual ou inferior a 45 kV.

<sup>11</sup> Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 45 kV e igual ou inferior a 110 kV.

<sup>12</sup> Tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1 kV.

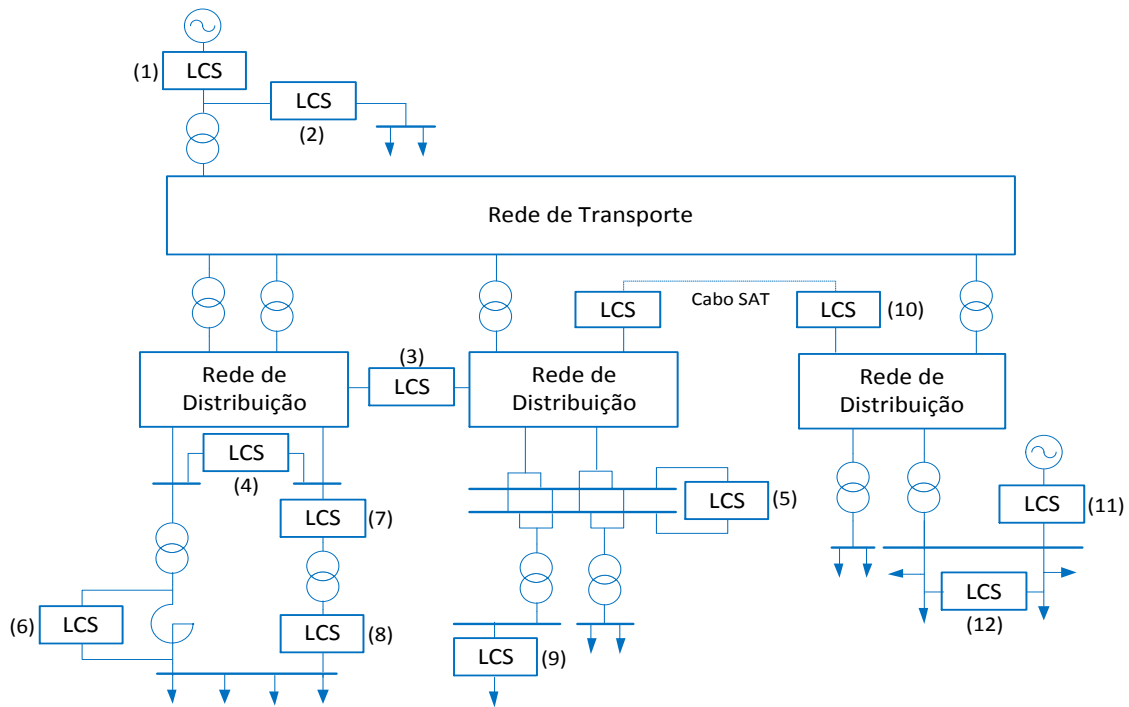


- 1) Ligação a fontes de produção centralizada: O LCS ligado à saída do gerador permite a limitação de correntes vindas diretamente da produção centralizada.
- 2) Entrada de dispositivos elétricos de colaboração a estações de produção: Limitação de corrente nos dispositivos elétricos de auxílio ao processo produção de energia.
- 3) Interligação entre redes de distribuição: Em caso de falha de uma rede, o fornecimento de energia é providenciado pela que se encontra interconectada. O LCS assegura níveis de falha<sup>13</sup> reduzidos.
- 4) Interligação entre barramentos: O LCS fornece um caminho com baixa resistência para o trânsito de energia, reduzindo as perdas, assim como permite a limitação de correntes de curto-circuito entre barramentos.
- 5) Interligação entre barramentos: Situação idêntica a 4), à exceção que existem caminhos opcionais ao trânsito de energia. Neste caso, os níveis de falha poderão ser superiores em relação ao caso 4).
- 6) Limitação em shunt a reator de núcleo de ar: A colocação em paralelo do limitador oferece um percurso de menor impedância, em regime normal, permitindo reduzir a queda de tensão e as perdas no reator. Em regime de falha, a limitação é assegurada pelos dois limitadores.
- 7) Ramais de entrada de postos de transformação: O LCS garante que todo o ramal fica protegido.
- 8) Ramais de saída de postos de transformação: O LCS limita a corrente do circuito a jusante ao posto de transformação.
- 9) Entrada de recetores elétricos: Proteção de recetores a consumir da rede.
- 10) Combinação com outros dispositivos supercondutores: A proteção de outros dispositivos supercondutores, como por exemplo, cabos supercondutores, SMES, entre outros, pode ser feita à custa de LCS, protegendo-os do *quench*<sup>14</sup>.
- 11) Ligação a fontes de produção descentralizada: O LCS ligado à saída do gerador permite a limitação de correntes vindas diretamente da produção descentralizada, como é o caso de eólicas, entre outras.
- 12) Fecho de circuitos em anel: Estabelecimento do anel através de um caminho ótimo e garantia de limitação.

---

<sup>13</sup> O nível de falha define-se como o valor de corrente (tensão) que permite a destruição total ou parcial de um determinado equipamento elétrico.

<sup>14</sup> O *quench* consiste na transição abrupta entre o estado supercondutor e o estado normal.



**Figura 2.17 – Diagrama unifilar dos potenciais locais de aplicação dos LCS na rede.**

O primeiro LCS do tipo resistivo testado na rede reporta ao ano de 2004, altura em que um consórcio Alemão, testou na sua rede elétrica o denominado projeto CURL 10, representado na Figura 2.18. Este limitador, trifásico, de 10 kV/10 MVA, foi construído com base em Bi-2212 maciço. Durante os testes em laboratório, foi testado um CC de 60 ms de duração, verificando-se a limitação da corrente presumida de CC de 18 kA para 7,2 kA, inclusivamente abaixo do valor esperado de 8,7 kA. Os resultados pormenorizados encontram-se em (Bock, et al., 2005). Durante o período de teste do LCS, na rede elétrica, não se verificou a ocorrência de falhas capazes de gerar correntes de CC, não sendo assim possível observar o desempenho do LCS (Kreutz, et al., 2005).



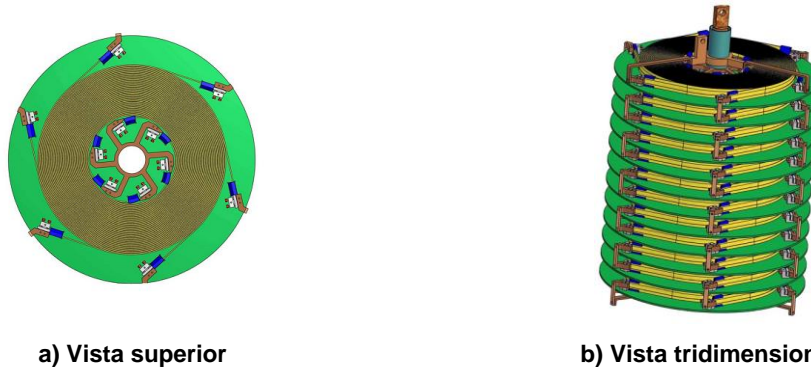
**a) Aspecto exterior.**



**b) Aspecto interior.**

**Figura 2.18 – CURL 10, o primeiro LCS resistivo testado na rede.**

Recentemente, ao abrigo do projeto europeu ECCOFLOW<sup>15</sup>, a empresa Nexans, com mais 13 parceiros, tem dado desenvolvimento a um LCS trifásico, do tipo resistivo, baseado em camadas de fitas 2G orientadas paralelamente, tal com se ilustra na Figura 2.19. Este limitador, dimensionado para 24 kV, 1 kA, tem capacidade para limitação de correntes de 10,8 kA de amplitude e tempo de recuperação inferior a 30 s, para falhas de 1 s de duração. O limitador encontra-se em fase de desenvolvimento, devendo posteriormente ser testado em duas redes com diferentes características, uma rede em Espanha e outra na Eslováquia. (Noe, Hobl, Tixador, Martini, & Dutoit, 2012).



**Figura 2.19 – Disposição das fitas supercondutoras do LCS do projeto ECCOFLOW.**

No que diz respeito a limitadores do tipo indutivo, no ano de 1997, foi instalado numa linha auxiliar da central hidroelétrica de Kraftwerk am Löntsch, na Suíça, um LCS trifásico, de 10,5 kV/70 A, apresentado na Figura 2.20. Este limitador fora desenvolvido pela ABB e é baseado em anéis maciços de Bi-2212 de 40 mm de largura. Dos ensaios em laboratório, este dispositivo apresenta limitação de correntes presumidas de 60 kA a 0,7 kA no primeiro ciclo e aproximadamente 0,25 kA após 50 ms (Paul, et al., 1997).



**Figura 2.20 – Limitador da ABB. Fonte**

O Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), no Japão, desenvolveu um limitador indutivo, monofásico, 3,5 kV, formado por cilindros em filme fino Bi-2223 depositado em MgO, com camada intermédia de Bi-2212, tendo o aspeto evidenciado na Figura 2.21 a). Dos ensaios em laboratório verificou-se uma redução da corrente presumida de

<sup>15</sup> <http://www.eccoflow.org/>. Último acesso em 29 de agosto de 2012.

11,3 kA para uma corrente limitada de 7,97 kA, na Figura 2.21 b) ilustra-se o LCS em fase de ensaio (Kado, et al., 2005).



a) Cilindros do LCS

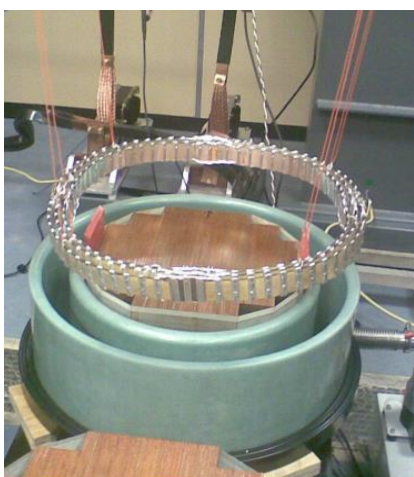


b) LCS em fase de ensaio

**Figura 2.21 – Limitador do CRIEPI.**

Atualmente um LCS indutivo, monofásico, de 10 kV/15 MVA, denominado iSFCL, está a ser desenvolvido pela Bruker EST em colaboração com a Schneider Electric e a Stadtwerke Augsburg. Este limitador, apresentado na Figura 2.22, tem no seu secundário fitas 2G de 40 mm de largura, desenvolvidas especialmente para limitadores supercondutores.

Uma réplica à menor escala do iSFCL tem estado em fase de testes de laboratório na Universidade de Braunschweig, Alemanha, tendo-se verificado o desempenho previsto em mais de 100 curto-circuitos efetuados. Em termos operacionais, é anunciado que este limitador tem capacidade de limitar uma corrente presumida de 68 kA a 9 kA, num intervalo inferior a 5 ms. O tempo de reação de deteção de falha é de aproximadamente 0,3 ms e a recuperação após a mesma é de aproximadamente 0,2 s. Face aos resultados recentes, prevê-se a instalação do iSFCL na rede elétrica Alemã, na rede da Stadtwerke Augsburg, no ano de 2013 (Klein, 2010).



a) Três anéis SAT, crióstato e núcleo



b) Pormenor do interior do crióstato

**Figura 2.22 – Limitador da Bruker, iSFCL.**

### 2.6.3 Modelização de Limitadores de Corrente Indutivos

A simulação do desempenho de limitadores de corrente faz-se vulgarmente com recurso a *software* de elementos finitos, como por exemplo, o Flux2D. No entanto, consoante as dimensões do dispositivo a simular e o grau de precisão associado, as simulações poderão ser bastante morosas, o que poderá inviabilizar a utilização deste tipo de *software*.

De modo a minorar os problemas resultantes da utilização de programas de elementos finitos, têm-se desenvolvido algumas metodologias. Como o limitador indutivo equivale a um transformador com o secundário em curto-circuito, um dos métodos de modelização tem por base esquemas equivalentes de Steinmetz, tal como é tratado nas referências (Majoroš, Janšak, Sello, & Zannella, 1997), (Paul, et al., 1997), e (Meerovich & Sokolovsky, 2007). Outra abordagem consiste na modelização do limitador assumindo que este representa uma impedância variável no tempo, tal como se aborda em (Willén & Cave, 1995), (Zong, Wang, Sun, & Wang, 2003) e (Yamaguchi & Kataoka, 2008). No entanto, tanto os modelos baseados em esquemas equivalentes de Steinmetz, como os baseados em impedâncias variáveis apresentam algumas limitações, designadamente a não consideração de saturação dos núcleos de ferro e a histerese dos limitadores.

Assim, são necessárias metodologias alternativas que permitam, por um lado, reduzir substancialmente os tempos de simulação, e, por outro lado, ultrapassar as restrições resultantes dos modelos baseados em esquemas equivalentes de Steinmetz ou impedâncias variáveis no tempo.

#### 2.6.3.1 Construção do Ciclo Máximo de Histerese do Limitador

Na referência (Pina, 2010) apresenta-se uma metodologia para determinação do comportamento dinâmico de limitadores indutivos, que permite ultrapassar as restrições temporais dos programas de elementos finitos, além de colmatar as limitações identificadas nos modelos descritos anteriormente. Esta metodologia parte de uma expressão que relaciona o fluxo ligado,  $\psi_0$ , com a corrente de linha,  $i_{linha}$ , dada por:

$$\psi_0(i_{linha}) = aNi_{linha} + \frac{bNi_{linha}}{c + dN|i_{linha}|} \quad (2.26)$$

Onde  $N$  representa o número de espiras do primário e os parâmetros  $a, b, c$  e  $d$  são determinados por ajuste a partir de dados simulados ou experimentais. Partindo da característica  $\psi_0(i_{linha})$  é possível construir o ciclo de histerese máximo do limitador, onde, para tal, se tem em consideração a máxima corrente de linha que o dispositivo consegue blindar. A metodologia assume que existem dois ramos, um ascendente,  $\lambda_a$ , e outro descendente,  $\lambda_d$ , que evoluem paralelamente à característica  $\psi_0(i_{linha})$ , sendo expressos por:

$$\lambda_a(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} - f(i_{linha})) \quad (2.27)$$

$$\lambda_d(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} + f(i_{linha})) \quad (2.28)$$

A função auxiliar  $f$  é definida por:

$$f(i_{linha}) = \frac{I_{SAT}^*/N}{\cos\left(\frac{\pi I_{SAT}^*/N}{2 I_{CC}}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi i_{linha}}{2 \frac{I_{CC}}{I_{SAT}^*/N}}\right) = A_f \cdot \cos(B_f \cdot i_{linha}) \quad (2.29)$$

Sendo:

$$A_f = \frac{I_{SAT}^*/N}{\cos\left(\frac{\pi I_{SAT}^*/N}{2 I_{CC}}\right)} \quad (2.30)$$

$$B_f = \frac{\pi}{2} \frac{1}{I_{CC}} \quad (2.31)$$

Onde  $I_{SAT}^*$  representa a corrente máxima possível no supercondutor que se encontra no secundário e  $I_{CC}$  representa a corrente de curto-circuito da rede. Na Figura 2.23 representa-se o modelo do ciclo de histerese máximo do limitador, assim como a característica  $\psi_0(i_{linha})$  do núcleo de ferro sem o supercondutor no secundário. Os ramos ascendentes e descendentes cruzam o eixo em  $\pm \frac{I_{SAT}^*}{N}$ , que corresponde à máxima corrente que o secundário SAT consegue blindar. Ambos os ramos se interseam com  $\psi_0$  assim que a corrente de curto-circuito é atingida.

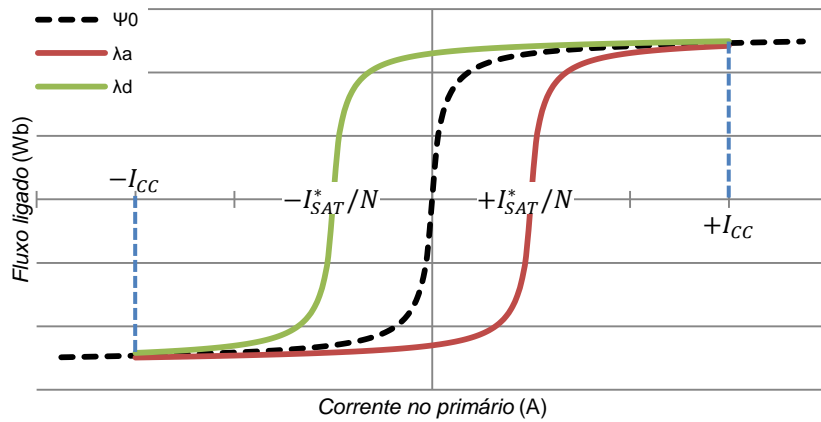
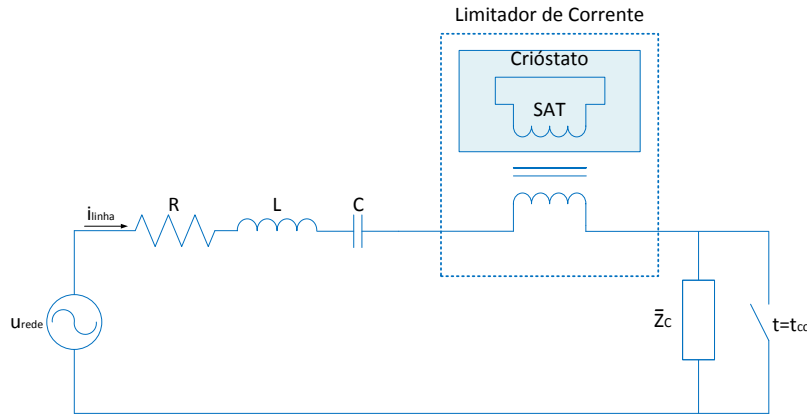


Figura 2.23 – Modelo do ciclo de histerese máximo.

### 2.6.3.2 Metodologia para Simulação Dinâmica de um Circuito com Limitador

Com base no ciclo de histerese máximo, torna-se possível proceder à simulação dinâmica de um circuito com limitador de corrente, tendo por base as suas equações dinâmicas. O algoritmo apresentado em (Pina, 2010), baseado no método de Euler, permite a determinação da evolução da corrente de linha sob uma falha na rede, onde os tempos de simulação são substancialmente menores quando comparados com os tempos de simulação por programas de elementos finitos. O circuito considerado na metodologia apresenta-se na Figura 2.24.



**Figura 2.24 – Circuito elétrico utilizado para determinar o comportamento dinâmico do limitador.**

Assim que uma falha ocorre no circuito, num tempo genérico  $t = t_{cc}$ , a resposta do circuito é descrita por:

$$u_{rede} = Ri_{linha} + L \frac{di_{linha}}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_{linha}(\tau) d\tau + \frac{d\psi_{LCS}}{dt} \quad (2.32)$$

Manipulando a expressão anterior, vem, de modo equivalente:

$$u_{rede} = Ri_{linha} + L \frac{di_{linha}}{dt} + \frac{q_C}{C} + \frac{d\psi_{LCS}}{di_{linha}} \frac{di_{linha}}{dt} \quad (2.33)$$

Rearranjando a expressão (2.33) e tendo em conta que a derivada temporal da carga de um condensador corresponde à corrente que o percorre, resulta o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{dq_C}{dt} = i_{linha} \\ \frac{di_{linha}}{dt} = \frac{1}{L + \frac{d\psi_{LCS}}{di_{linha}}} \left( u_{rede} - Ri_{linha} - \frac{q_C}{C} \right) \end{cases} \quad (2.34)$$

A resolução deste sistema de equações faz-se, como anteriormente referido, com base no método de Euler, de modo a discretizar o problema e assim permitir o recurso a poder computacional, que permite uma rápida simulação do circuito.

## 2.7 Síntese

Neste capítulo procedeu-se ao levantamento bibliográfico de alguns temas introdutórios, tais como a evolução histórica da supercondutividade, as propriedades mais importantes dos supercondutores e as suas teorias mais relevantes. Por outro como fez-se o levantamento dos elementos mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho, designadamente aspetos de modelização de supercondutores, materiais supercondutores, assim como o estado atual de desenvolvimento de limitadores de corrente.





### 3 Construção do Protótipo

Neste capítulo procede-se à descrição dos aspetos construtivos do protótipo do LCS, para situações de ensaio em laboratório. Face às dificuldades em escalar supercondutores maciços para elevadas dimensões, assim como a sua fraca consistência em termos de resistência mecânica, considera-se o uso de fita supercondutora como uma alternativa bastante viável para a construção de limitadores, qualquer que seja a sua dimensão<sup>16</sup>. Por outro lado, pretende-se desenvolver um protótipo compacto, com elevada versatilidade e reduzidas perdas de criogenia.

#### 3.1 Introdução

Face ao crescimento acentuado da produção de energia proveniente de recursos renováveis, a tendência para a descentralização da produção tem vindo a crescer sucessivamente ao longo dos últimos anos, assim como a modificação das infraestruturas de produção. De forma a dotar as novas infraestruturas de produção mais eficientes e fiáveis, nomeadamente ao nível das redes elétricas, têm-se desenvolvido diversas tecnologias capazes de aumentar a qualidade das infraestruturas. Nesse sentido, o protótipo em estudo enquadra-se na perspetiva de contribuir para a resolução de um problema emergente e associado à produção distribuída: as correntes de curto-circuito na rede. Como se reconhece, a operação dos sistemas de energia sob condições de falha conduz a algumas consequências, sendo as mais importantes, a ocorrência de *blackouts*<sup>17</sup> ou a destruição total ou parcial de dispositivos presentes na rede, o que leva à necessidade de proceder à substituição dos dispositivos danificados. Esta problemática poderá ser precavida através de limitadores supercondutores.

Este protótipo consiste num enrolamento primário ligado magneticamente com um circuito secundário, que é formado por material supercondutor, designadamente fita Bi-2223. Em situações de funcionamento normal, o limitador encontra-se idealmente “invisível” na rede, não exercendo qualquer influência. Contudo, assim que existam situações de falha por curto-circuito, o limitador permite o aumento da impedância da linha, limitando a corrente, de forma a proteger os restantes dispositivos, prevenindo a sua destruição e mantendo a sua integridade. Quando comparado com os limitadores convencionais, o limitador de corrente supercondutor apresenta as seguintes vantagens (Lamas, 2009) (Sokolovsky, Meerovich, Chubraeva, & Vajda, 2010):

- i. Poder de limitação superior, devido à maior eficácia e rapidez de entrada em limitação.
- ii. Reduzida dissipação de energia, em regime normal, devido à impedância virtualmente nula.
- iii. Reduzida indução eletromagnética em potenciais estruturas metálicas vizinhas.
- iv. Não necessidade de controladores para acionamento do limitador.

---

<sup>16</sup> À exceção de limitadores de dimensões bastante reduzidas, onde a fita supercondutora pode sofrer degradação das suas propriedades devido ao reduzido raio de curvatura exigido.

<sup>17</sup> Falha no fornecimento de energia para consumo.

- v. Contribuição para uma maior estabilidade da rede.

### 3.2 Princípio de Funcionamento

O LCS, como se ilustra na Figura 3.1, assemelha-se a um transformador com o secundário em curto-circuito, sendo o circuito primário composto por um condutor elétrico normal e o secundário composto por fita supercondutora.

Em regime de funcionamento normal, o fluxo simples no núcleo é blindado pelo secundário, ou seja, a FMM criada pelo primário é anulada pela FMM do secundário, o que provoca a inexistência de variação de fluxo no núcleo e, por consequência, não existe tensão aos terminais do LCS.

No regime de funcionamento em falha, que pode decorrer, por exemplo, do curto-circuito da carga, existe variação de fluxo no núcleo, mediante a passagem do secundário SAT do estado supercondutor para o estado normal<sup>18</sup>. Por esta via, tem-se, aos terminais do limitador, uma queda de tensão, o que permite a limitação da corrente de curto-circuito.

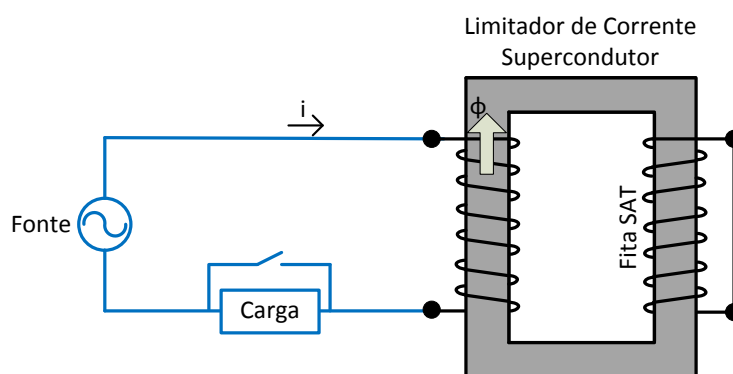


Figura 3.1 – Esquema de princípio do LCS.

O protótipo a ensaiar será colocado numa rede resistiva, tal como se ilustra na Figura 3.2, sendo submetido a correntes de curto-circuito provocadas propositadamente através do acionamento de um interruptor, de forma a anular a carga e aumentar abruptamente a corrente na linha.

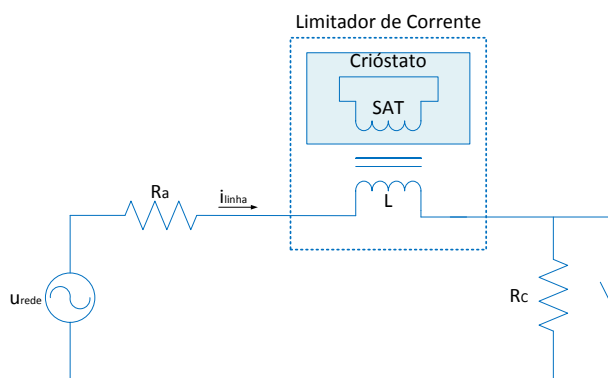
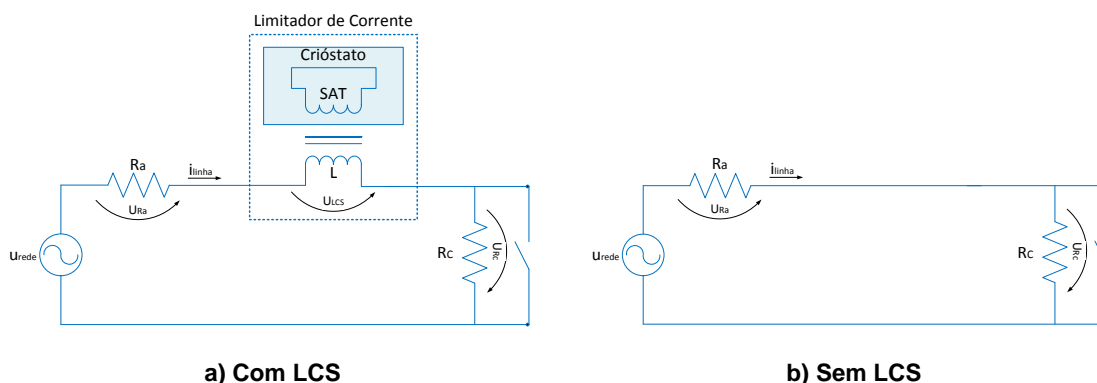


Figura 3.2 – Esquema de ensaio do LCS.

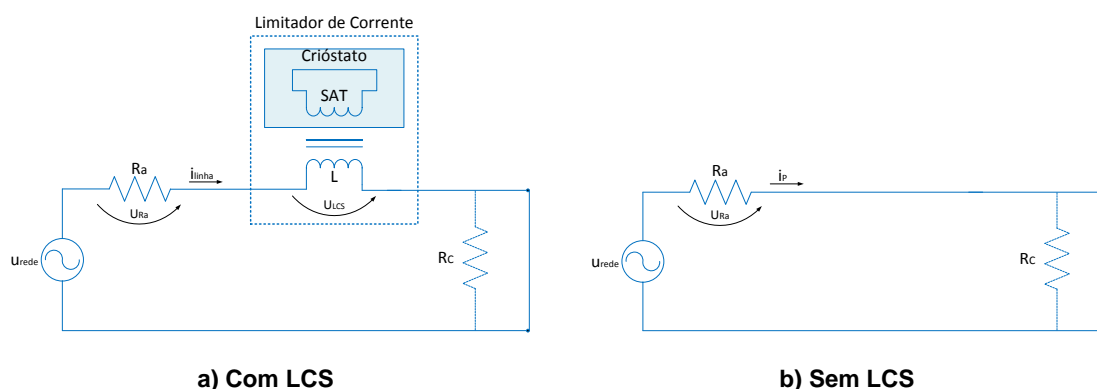
<sup>18</sup> As correntes induzidas no secundário SAT são superiores à sua corrente crítica.

Antes do curto-circuito, em condições ideais, a corrente na linha deverá depender exclusivamente da fonte de tensão e das resistências de amostragem e de carga,  $R_a$  e  $R_c$ , respectivamente, uma vez que o secundário do LCS deverá permitir a blindagem magnética do núcleo, não adicionando, desta forma, qualquer impedância ao circuito. Deste modo, o circuito presente na Figura 3.3 a) deverá ser idêntico ao circuito da Figura 3.3 b). A corrente na linha,  $i_{linha}$ , deverá também, no caso ideal, ser idêntica à corrente presumida,  $i_p$ .



**Figura 3.3 – Circuito elétrico de ensaio, antes do curto-circuito.**

Após o curto-circuito, a corrente na linha aumenta abruptamente, fruto da inexistência de carga. Nesta situação, o secundário do LCS deverá permitir a circulação de fluxo magnético no núcleo, através da perda total ou parcial da supercondutividade, o que permite que surja uma impedância no circuito através do primário do LCS. Neste caso, a tensão fornecida pela fonte é distribuída aos terminais do LCS e, em parte residual, aos terminais da resistência de amostragem, como se ilustra na Figura 3.4 a). Em termos de corrente presumida, esta depende da tensão da fonte e da resistência de amostragem, tal como se observa na Figura 3.4 b).



**Figura 3.4 – Circuito elétrico de ensaio, depois do curto-circuito.**

Nesta situação, bastante diferente da situação de funcionamento normal, a corrente na linha e a corrente presumida não se desejam idênticas, mas sim que a corrente na linha seja bastante inferior à corrente presumida, de modo a garantir elevado poder de limitação.

### 3.3 Aquisição de Dados

Para aquisição das leituras das tensões nos diversos pontos do circuito de ensaio recorre-se à placa de aquisição de dados NI-6009, ilustrada na Figura 3.5. Esta placa de aquisição de dados, de 14 bits e 48000 amostras por segundo, possui oito entradas analógicas e compatibilidade com o *software* Labview SignalExpress, que é utilizado para gravação de dados em ficheiro.

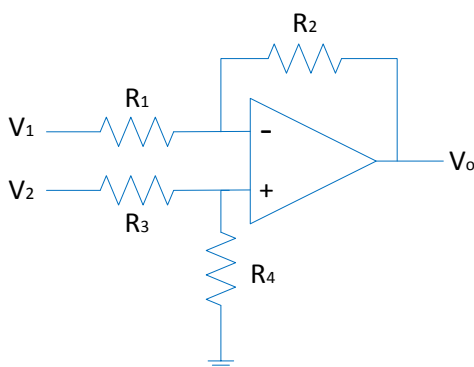


Figura 3.5 – Placa de aquisição de dados NI-6009.

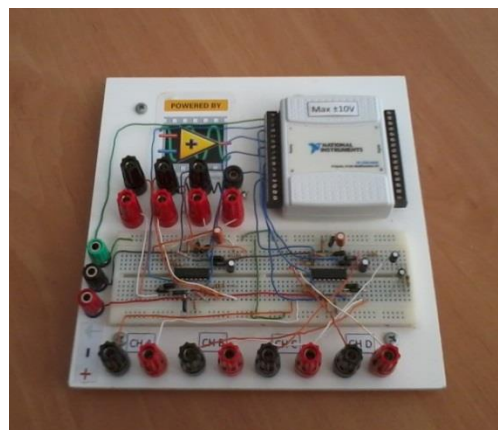
Uma vez que a placa de aquisição de dados apenas admite tensões às suas entradas na gama  $\pm 10\text{ V}$ , torna-se necessário proceder ao condicionamento de sinal, de modo a permitir a leitura de tensões elevadas durante os ensaios. O método considerado para o condicionamento de sinal baseia-se na montagem subtratora, presente na Figura 3.6 a). Nesta montagem, a relação entre a diferença de potencial entre os terminais  $V_1$  e  $V_2$  e o potencial  $V_0$ , caso  $R_1 = R_3$  e  $R_2 = R_4$ , é expressa por (3.1).

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) \quad (3.1)$$

A bancada concebida, presente na Figura 3.6 b), permite o condicionamento de sinal para posterior aquisição nos oito canais analógicos disponíveis. A implementação da montagem subtratora faz-se com recurso aos amplificadores operacionais presentes nos circuitos integrados MC3403N.



a) Montagem subtratora



b) Bancada

Figura 3.6 – Montagem para aquisição de tensões.

### 3.4 Aspetos Construtivos

O limitador em desenvolvimento, idealizado de acordo com a Figura 3.7, deve, em situações de funcionamento normal, permitir a blindagem magnética do seu núcleo ferromagnético, pois, como o secundário se encontra em curto-circuito, a FMM do secundário anula a FMM criada pelo primário, de modo que praticamente não existe penetração de fluxo no núcleo. Por outro lado, em situações de falha, surgem correntes de curto-circuito na linha, devidas, por exemplo, ao decréscimo repentino da impedância de carga do circuito. Neste tipo de situações, a corrente induzida no supercondutor ultrapassa o seu valor crítico, levando à perda das propriedades supercondutoras do material, de modo que este se torna resistivo e deixa de apresentar efeito Meissner, permitindo a penetração de fluxo no núcleo. A presença de variação de fluxo no núcleo aumenta a impedância do circuito primário, o que provoca a limitação da corrente presente na linha.

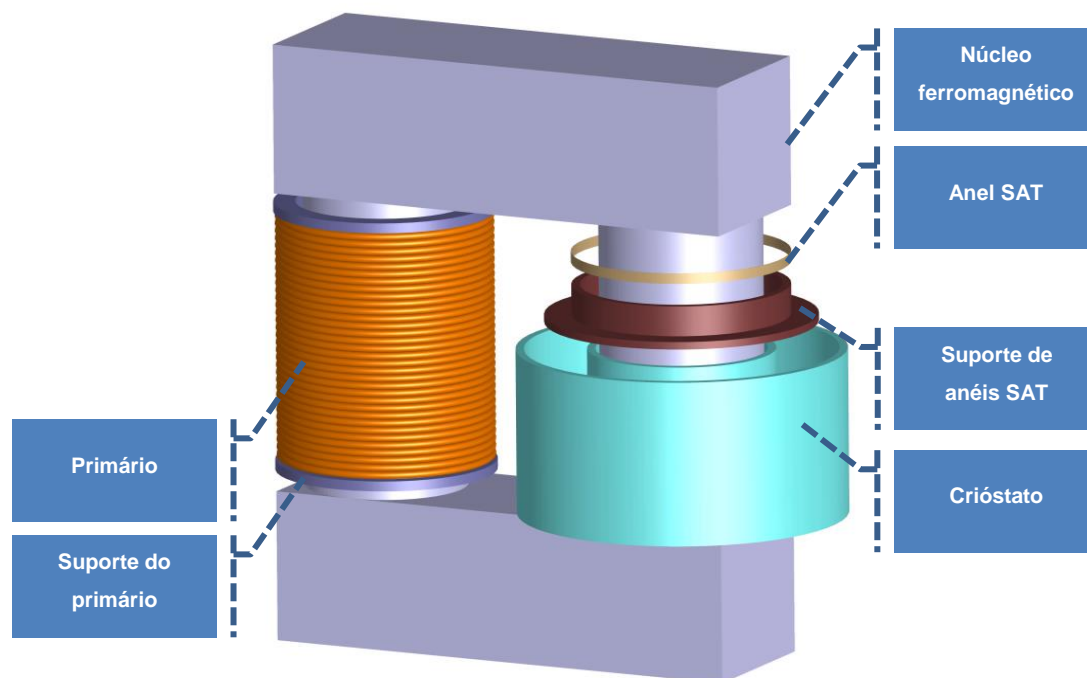


Figura 3.7 – Representação da estrutura do protótipo LCS.

O limitador idealizado tem como características principais a versatilidade em ajustar o número de espiras, tanto no primário, como no secundário, mediante a colocação do primário, assim como do secundário, com o número de espiras desejado, possibilitando assim adaptar o limitador às características da rede. Relativamente ao material constituinte, além do núcleo ferromagnético, o limitador é composto por um suporte do primário à base de acrílico, um crióstato construído com XPS e suportes de Celeron para o secundário, composto por anéis SAT de Bi-2223.

Para fabrico do crióstato, desenvolvido especialmente para ensaios em laboratório, recorrem-se a blocos de XPS, sendo a moldagem destes efetuada com recurso a um dispositivo a conceber propositadamente para essa finalidade, representado na Figura 3.8. O

dispositivo para concepção de crióstatos tem como princípio de funcionamento a moldagem de blocos de XPS através do contacto destes com um condutor elétrico a altas temperaturas. O condutor elétrico, percorrido por uma determinada corrente, aquece, por efeito de Joule, provocando desgaste térmico localizado caso se encontre em contacto com o XPS, permitindo dessa forma a moldagem dos blocos. A base de apoio giratória permite uma moldagem circular, tal como é objetivo.

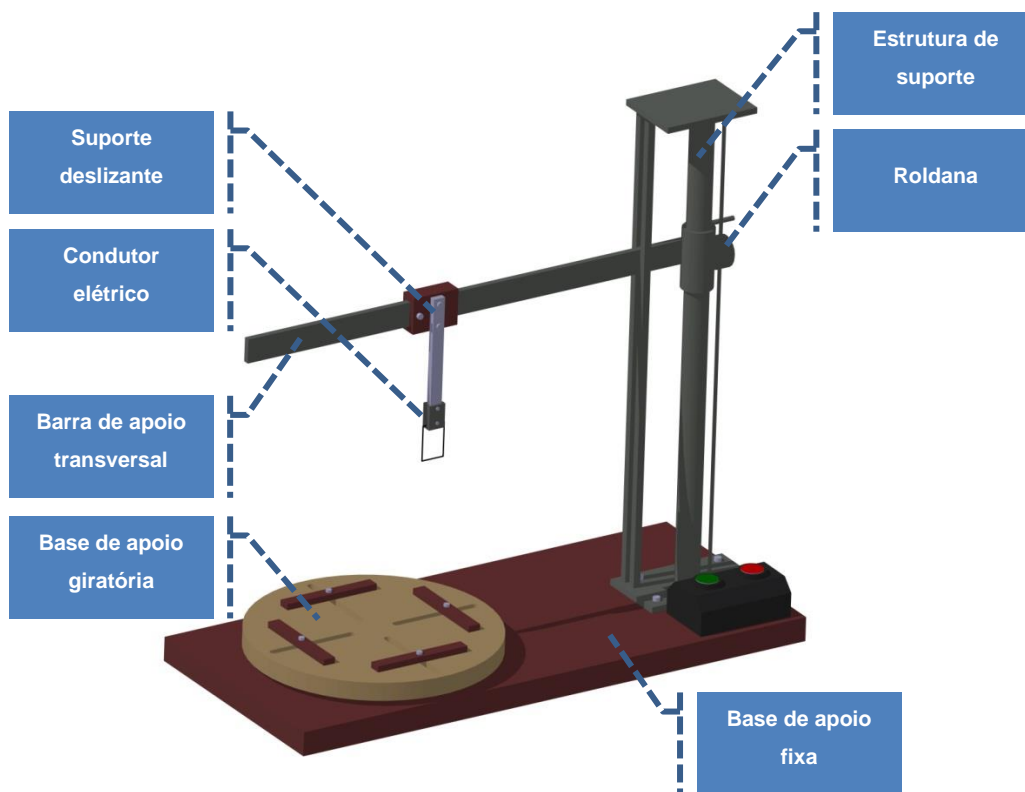


Figura 3.8 – Representação do dispositivo para concepção de crióstatos.

### 3.4.1 Núcleo Ferromagnético

O núcleo adquirido, que se apresenta na Figura 3.9, tem as dimensões presentes no Apêndice 1.1. A sustentação das chapas, que são 106, é feita com recurso a uma estrutura metálica. A mesma estrutura serve também de apoio aos suportes do primário e do secundário, assim como do crióstato.

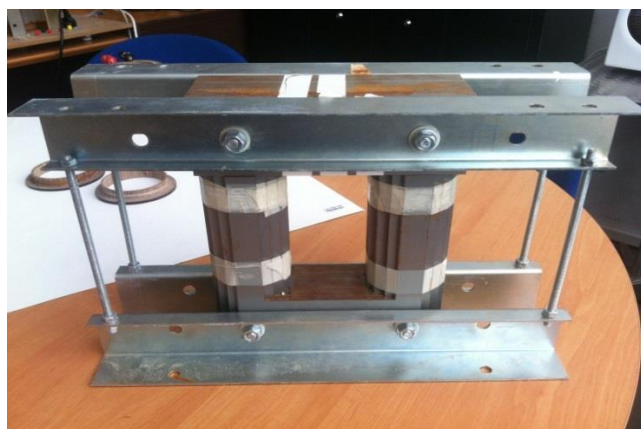


Figura 3.9 – Núcleo ferromagnético adquirido para o protótipo do LCS.

### 3.4.2 Enrolamento Primário

O enrolamento primário é constituído por fio de cobre nú, com secção de  $1,5 \text{ mm}^2$ . A sustentação do primário é feita à custa de um suporte em acrílico. No mesmo suporte também se encontra um enrolamento por fio de cobre nú de secção de  $0,5 \text{ mm}^2$ , que tem por objetivo permitir a leitura do fluxo magnético no núcleo. Na Figura 3.10, apresentam-se os enrolamentos desenvolvidos, num caso, tem-se um primário com 215 espiras e um enrolamento para leitura de fluxo de 70 espiras, enquanto, noutro caso, se desenvolveu um enrolamento primário de 70 espiras e um enrolamento para leitura de fluxo de 65 espiras. De notar que o enrolamento para leitura de fluxo, para efeitos de ensaios, se encontra em aberto. No Apêndice 1.2 apresentam-se as dimensões do suporte do primário.



Figura 3.10 – Enrolamentos primários.

### 3.4.3 Enrolamento Secundário

O enrolamento secundário é constituído à base de anéis supercondutores suportados por moldes em Celeron, tal como se observa na Figura 3.11. A construção dos anéis é feita à custa do curto-circuito das pontas terminais da fita supercondutora, recorrendo-se para tal, à soldadura a estanho. A utilização do Celeron como elemento de suporte aos anéis supercondutores resulta das suas propriedades térmicas e mecânicas que se revelam apropriadas, nomeadamente elevada resistência mecânica e baixo coeficiente de expansão/compressão térmica. No Apêndice 1.3 apresentam-se as dimensões dos suportes dos anéis SAT.



Figura 3.11 – Anéis SAT em suportes de Celeron.

### 3.4.4 Crióstato

De modo a dotar o LCS de um formato mais compacto, torna-se necessário o recurso a crióstatos adaptados à tipologia do LCS em questão. Os crióstatos desenvolvidos, apresentados na Figura 3.12, têm por objetivo manter o secundário do LCS abaixo da temperatura crítica. No caso concreto utiliza-se azoto líquido, cuja temperatura neste estado corresponde a 77 K e que se revela adequada à manutenção dos anéis SAT abaixo da sua temperatura crítica. No Apêndice 1.4 e Apêndice 1.5, encontra-se, respetivamente, o desenho técnico do crióstato menor e crióstato maior.



Figura 3.12 – Crióstato menor e crióstato maior.

O dispositivo desenvolvido para a conceção de crióstatos apresenta-se na Figura 3.13. É utilizada a fonte de corrente TTi QPX 1200L para aquecimento por efeito de Joule do condutor que se encontra em contacto com os blocos de XPS.

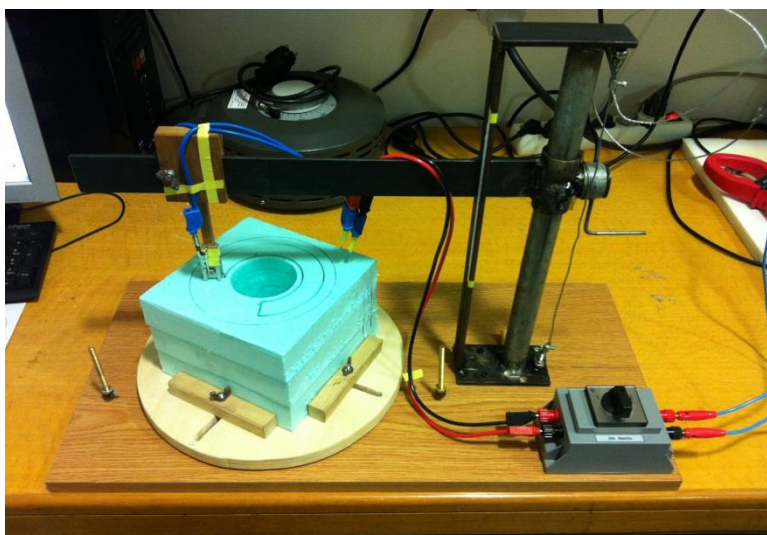
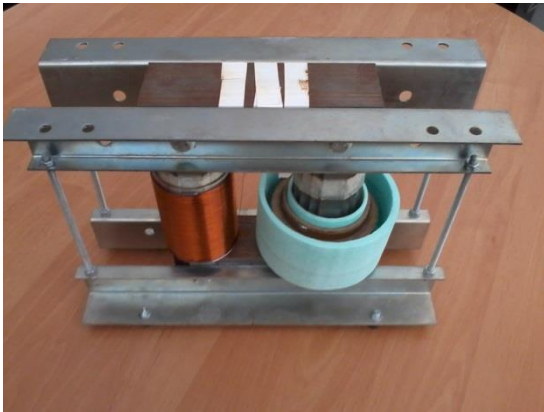


Figura 3.13 – Dispositivo para conceção de crióstatos.



### 3.5 Protótipo Desenvolvido

O protótipo construído, apresentado na Figura 3.14, apresenta um *design* compacto e com versatilidade para adaptação ao circuito de ensaio, presente na Figura 3.2, designadamente em termos de ajuste do número de espiras do primário e do secundário. O crióstato menor, observável na Figura 3.14 a), apesar do primário desenvolvido ocupar integralmente uma coluna, permite a colocação de um enrolamento primário na mesma coluna do secundário, ao contrário do crióstato maior, presente na Figura 3.14 b), que não admite a coexistência do primário e do secundário na mesma coluna.



a) LCS com crióstato menor



b) LCS com crióstato maior

Figura 3.14 – Protótipo do LCS desenvolvido.

### 3.6 Síntese

Em termos genéricos, este capítulo abordou o princípio de funcionamento do protótipo desenvolvido, nomeadamente o circuito elétrico de ensaio no qual será inserido, assim como o desempenho desejado deste na rede de ensaio.

A aquisição de dados, realizada por uma placa de aquisição, permite a recolha com um tempo de amostragem relativamente elevado, o que permite analisar os resultados com elevada precisão temporal.

O desenvolvimento deste tipo de protótipo, de tipologia indutiva e com recurso a fita supercondutora no secundário, requer algum grau de sensibilidade, principalmente na soldadura das fitas, pois trata-se de uma zona considerada crítica devido à presença de pontos de contacto sem propriedades supercondutoras. A geometria circular dos anéis contribui também para uma maior dificuldade na realização das soldaduras, contudo, o recurso aos suportes de Celeron que servem como base de apoio aos anéis SAT fornecem uma maior consistência mecânica. A conceção dos crióstatos apresentados teve por objetivo dotar o LCS de um formato mais compacto e evitar a imersão do núcleo ferromagnético em azoto líquido.



## 4 Resultados e Análise

De seguida apresentam-se e discutem-se os resultados provenientes dos ensaios realizados, nomeadamente, a lei da potência, a característica magnética do núcleo e o desempenho do limitador face à ocorrência de correntes de curto-circuito. Todos os ensaios realizados, à exceção do ensaio da lei da potência, que é feito em regime DC, são efetuados em regime alternado sinusoidal à frequência de 50 Hz. No final, avalia-se a adequabilidade da metodologia de simulação dinâmica de um circuito com limitador, face às evidências experimentais.

Os resultados que seguidamente se apresentam dizem respeito a ensaios laboratoriais realizados, onde se prevê que os mesmos sejam reproduzíveis. Note-se, no entanto, que apesar de se prever a reprodutibilidade dos ensaios, as medidas elétricas podem ser afetadas por erros sistemáticos ambientais, como por exemplo, temperatura, humidade, pressão atmosférica e campos elétricos e/ou magnéticos. A par dos erros sistemáticos ambientais, também os erros aleatórios poderão ter influência nos resultados, designadamente o ruído, que pode ter diversas origens.

### 4.1 Lei da Potência em Fita Supercondutora

A fita supercondutora adquirida, para a conceção do secundário do protótipo, apresenta as características descritas na Tabela 4.1. Esta informação é proveniente do seu fabricante. De notar que, como mencionado previamente, os ensaios realizados e os valores indicativos dizem respeito ao regime contínuo.

**Tabela 4.1 – Características técnicas da fita Innost Bi-2223.**

Medida	Valor
Corrente crítica	90 A
Densidade crítica de corrente de engenharia	93 A/mm <sup>2</sup>
Largura	4,2 (±0,2) mm
Espessura	0,23 (±0,02) mm
Raio mínimo de curvatura	30 mm (5% de degradação em I <sub>C</sub> )

De forma a medir experimentalmente a corrente crítica da fita adquirida, procede-se ao ensaio laboratorial do método dos quatro pontos, em conformidade com a norma (IEC 61788-3, 2006). A amostra preparada para o ensaio, de acordo com as denominações adotadas da Figura 2.11, apresenta as seguintes dimensões:

$$a = 20 \text{ cm}; b = 5 \text{ cm}; c = 6,5 \text{ cm}; d = 1 \text{ cm}; e = 0,4 \text{ cm}; f = 20 \text{ cm}$$

A lei da potência também se pode expressar em função da corrente e da tensão, de forma a prever a corrente crítica da amostra. Assim, analogamente à expressão (2.24), resulta:

$$U(I) = U_c \left( \frac{I}{I_c} \right)^n \quad (4.1)$$

#### 4.1.1 Procedimento Experimental

A montagem experimental, ilustrada na Figura 4.1, baseia-se na leitura da tensão entre dois pontos de contacto, distanciados 5 cm entre si, utilizando-se o microvoltímetro Keithley 2001 para leitura das tensões. A aplicação de uma corrente DC faz-se com recurso à fonte Delta Elektronika SM 15-400.

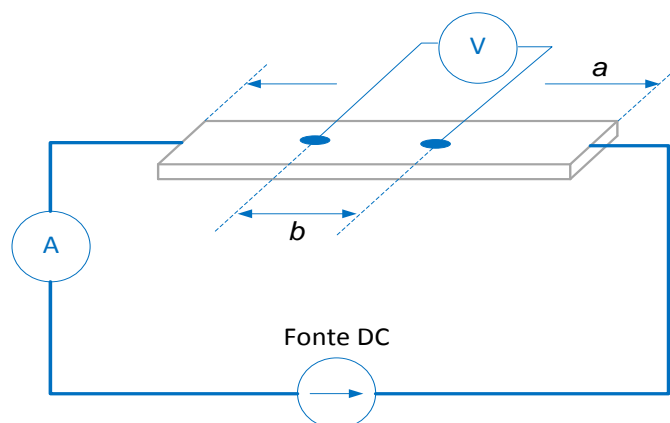


Figura 4.1 – Montagem experimental para determinação da lei da potência.

O método experimental baseia-se na aplicação de uma determinada corrente ao circuito, através da fonte DC, e realização de leituras da corrente no circuito e da tensão aos terminais dos pontos de contacto. De notar que, tanto os pontos de contacto para leitura de tensões, como o estabelecimento do circuito elétrico, através da ligação entre os terminais da fita e a fonte de corrente, tal como se observa na Figura 4.2, se fazem com recurso a soldadura a estanho e por meio de condutores elétricos.

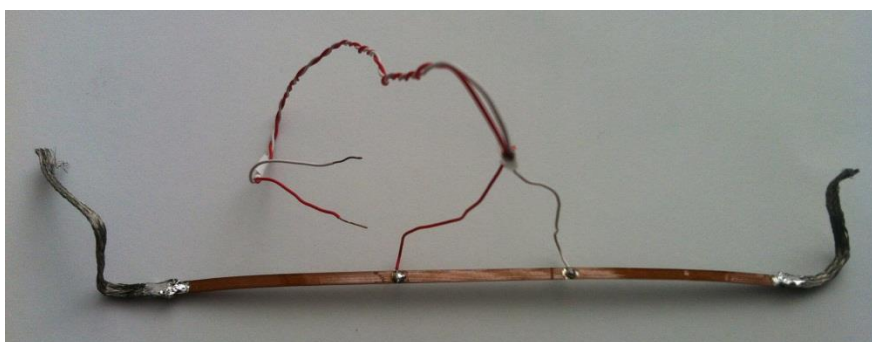


Figura 4.2 – Amostra utilizada para ensaio do método dos quatro pontos.

#### 4.1.2 Resultados e Análise

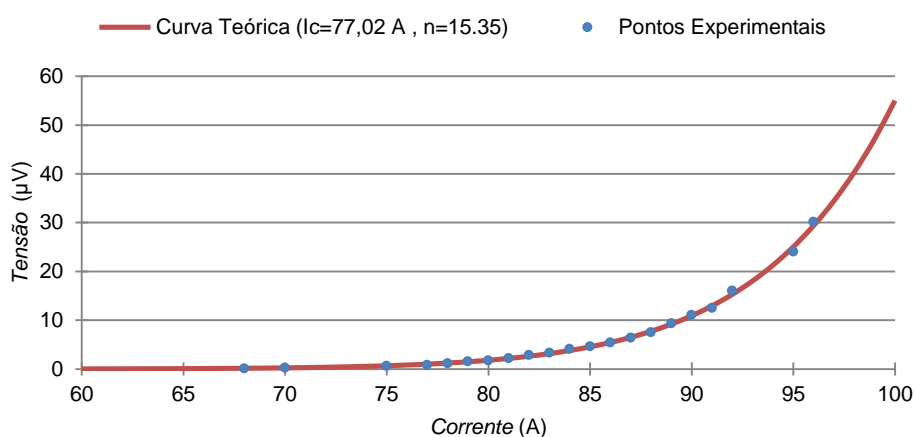
De acordo com (4.1), obtém-se, por ajuste<sup>19</sup>, a curva teórica (4.2) que melhor se aproxima aos pontos experimentais recolhidos através do método dos quatro pontos. Para

<sup>19</sup> Ferramenta *cftool* do Matlab

efeitos de comparação, tanto os pontos experimentais como a curva teórica se apresentam na Figura 4.3.

$$U(I) = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{I}{77,02}\right)^{15,35} \quad (4.2)$$

Verifica-se, segundo a lei da potência e de acordo com o critério 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ , que a corrente crítica na amostra de ensaio corresponde aproximadamente a 77,02 A, tendo o expoente n o valor de 15,35.



**Figura 4.3 – Lei da potência da fita Bi-2223.**

A corrente crítica indicada pelo fabricante, 90 A, não corresponde ao valor alcançado no ensaio experimental efetuado, que é de aproximadamente 77 A. As diferenças poderão ser devidas a diversos fatores. O método de ensaio adotado e/ou a utilização de instrumentação de características diferentes poderá contribuir para as diferenças observadas, isto é, as condicionantes da medida poderão motivar as discordâncias observadas. Além do método de ensaio e instrumentação, fatores como o observador, o local ou as condições de utilização poderão também motivar diferentes aproximações de resultados. Por outro lado, a qualidade da amostra de ensaio poderá também revelar-se como um elemento preponderante na obtenção de diferentes resultados. Todavia, os resultados alcançados não inviabilizam o desenvolvimento do protótipo com base na fita Bi-2223 adquirida.

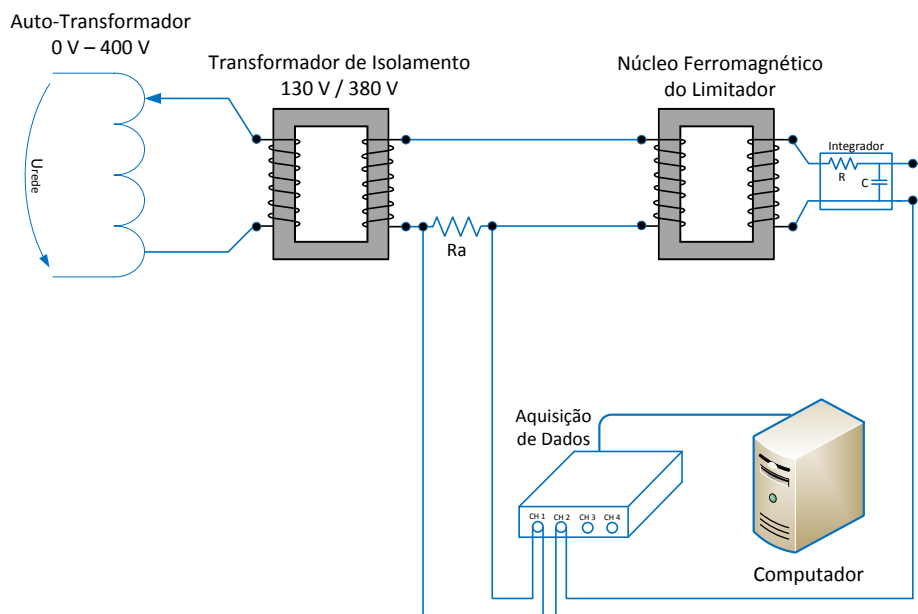
## 4.2 Característica de Magnetização

Pretende-se observar a característica de magnetização da bobina do primário com núcleo ferromagnético, definida através da relação entre o fluxo ligado com o primário  $\psi_0$  e a corrente no primário  $i_{linha}$ , mas também a característica de magnetização do núcleo, que é definida em termos do módulo dos campos da densidade de fluxo  $B$  e do campo magnético  $H$ , que são imagens de  $\psi_0$  e  $i_{linha}$ , respetivamente. Para tal ensaia-se o núcleo para o LCS como se de um transformador se tratasse.

## 4.2.1 Procedimento Experimental

A montagem experimental para ensaio da característica do núcleo ferromagnético encontra-se representada na Figura 4.4. Para a execução do procedimento experimental é necessário:

- i. Auto-Transformador 0 V – 400 V: Permite a aplicação de uma tensão variável aos enrolamentos do transformador de isolamento.
- ii. Transformador de Isolamento: Para fazer isolamento galvânico da montagem experimental relativamente à rede.
- iii. Núcleo Ferromagnético: Elemento sob ensaio, onde é colocado um enrolamento primário de 70 espiras e um enrolamento secundário de 65 espiras.
- iv. Resistência de Amostragem ( $R_a$ ): De valor  $1,1 \Omega$ , permite a medição, de modo indireto, da corrente no circuito.
- v. Integrador: Dispositivo do tipo passivo, formado por um circuito RC, com constante de tempo de 1 s. Tem por objetivo integrar a tensão aos seus terminais.
- vi. Aquisição de Dados: Montagem com condicionamento de sinal e posterior aquisição via placa de aquisição de dados.
- vii. Computador: Realiza a aquisição das leituras da aquisição de dados, gravação e tratamento de dados.



**Figura 4.4 – Montagem experimental para determinação do ciclo de histerese.**

Para observação do ciclo de histerese é necessário que se observem, independentemente um do outro, a corrente de magnetização  $i_{linha}$  e o fluxo ligado  $\psi_0$ . Desta forma, o procedimento experimental consiste na aplicação de uma tensão alternada sinusoidal

ao primário do núcleo ferromagnético, deixando o secundário<sup>20</sup> em vazio. Assim, a corrente de magnetização é medida aos terminais da resistência de amostragem  $R_a$ , enquanto o fluxo ligado é medido a partir da integração<sup>21</sup> da tensão em vazio aos terminais do secundário. As tensões são adquiridas por dois canais da placa de aquisição de dados e posteriormente recolhidas via computador, onde são processadas. O ciclo de histerese, em termos de  $B$  e  $H$ , obtém-se do ciclo de histerese em unidades de  $i_{linha}$  e  $\psi_0$ .

A corrente de excitação,  $i_{linha}$ , é proporcional ao integral de linha de  $H$ , dado pela lei de Ampère:

$$N \cdot i_{linha} = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (4.3)$$

Onde  $N$  representa o número de espiras do primário. Por seu turno, o fluxo ligado,  $\psi_0$ , é proporcional ao integral de superfície do campo  $B$  através da secção do núcleo, dado por:

$$\psi_0 = N \cdot \iint_{Secção} (\mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}}) dS \quad (4.4)$$

Para uma maior informação acerca da obtenção das características de magnetização em núcleos ferromagnéticos recomenda-se a consulta da referência (Gonçalves, 2001). A montagem experimental implementada em laboratório apresenta-se na Figura 4.5.

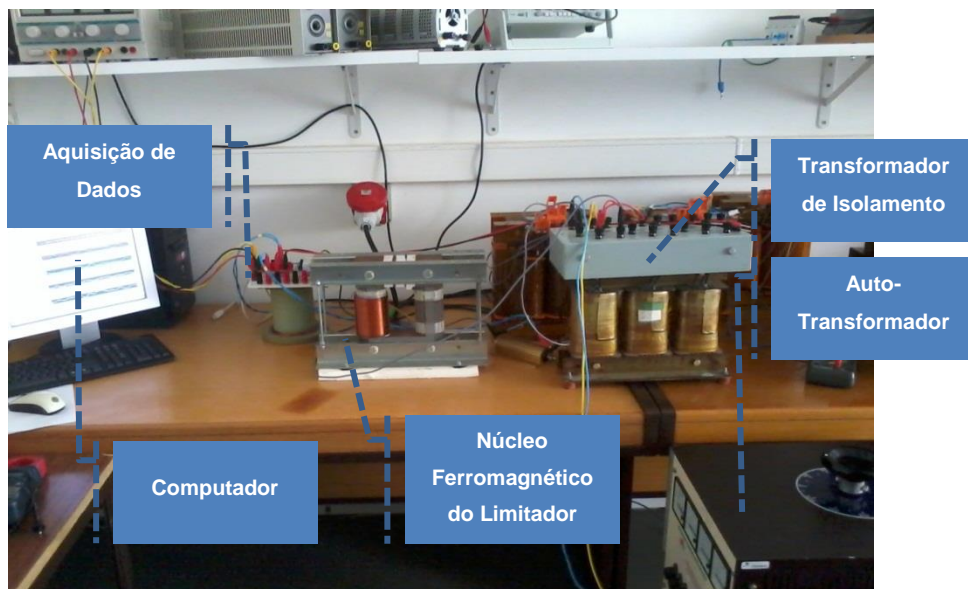


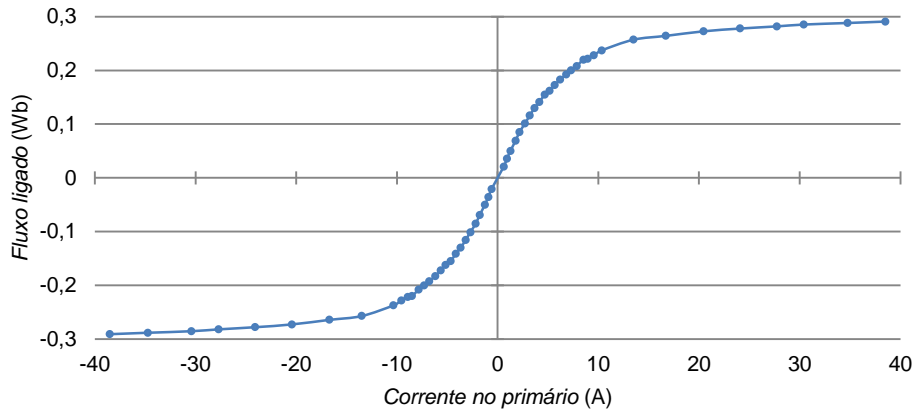
Figura 4.5 – Montagem experimental de ensaio para determinação do desempenho do limitador.

<sup>20</sup> O secundário, neste caso, corresponde à bobina de cobre e não aos anéis SAT.

<sup>21</sup> O integrador passivo encontra-se montado juntamente com a montagem de condicionamento de sinal descrita em 3.3.

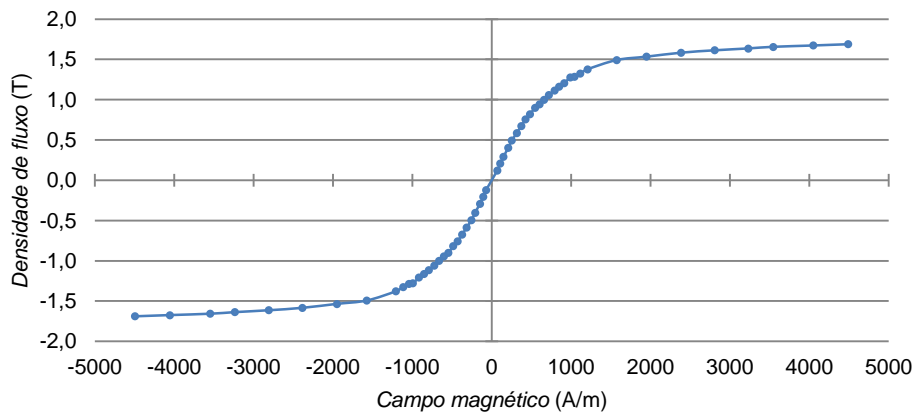
### 4.2.2 Resultados e Análise

A característica do primário, na presença do núcleo ferromagnético, apresenta-se na Figura 4.6. Os pontos experimentais resultam dos valores mínimos e máximos dos conjuntos de pontos ( $\psi_0, i_{linha}$ ) dos vários ciclos de histerese medidos. No total, foram realizadas 28 leituras.



**Figura 4.6 – Característica de magnetização da bobina de 70 espiras com núcleo ferromagnético sem a presença de SAT.**

Por seu turno, a característica de magnetização do núcleo ferromagnético é a que se encontra representada na Figura 4.7. Os pontos experimentais para construção da característica de magnetização resultam dos valores mínimos e máximos dos conjuntos de pontos ( $B, H$ ) dos vários ciclos de histerese medidos, que são imagens da característica do primário com núcleo inserido.



**Figura 4.7 – Característica de magnetização do núcleo ferromagnético sem a presença de SAT.**

Da característica de magnetização do núcleo, verifica-se que a característica é aproximadamente linear até um campo de indução de 1 T, altura em que começa a apresentar saturação conforme o aumento do campo magnético.



### 4.3 Desempenho do Limitador

De forma a observar o desempenho do limitador tanto em situações de funcionamento normal como em situações de falha, torna-se necessário a aplicação de correntes de curto-circuito na rede onde o limitador se encontra inserido, que se apresenta na Figura 4.8. Através da recolha de tensões no circuito de ensaio, torna-se possível avaliar o desempenho do limitador, mas também recolher informação que sirva de auxílio ao desenvolvimento e/ou melhoramento de metodologias de simulação de limitadores. Pretende-se observar o comportamento do dispositivo face à variação do número de espiras do secundário. Adiante também se apresentam e discutem os resultados dos ensaios onde se mantém o número de espiras do secundário fixo e se varia a corrente de curto-circuito.

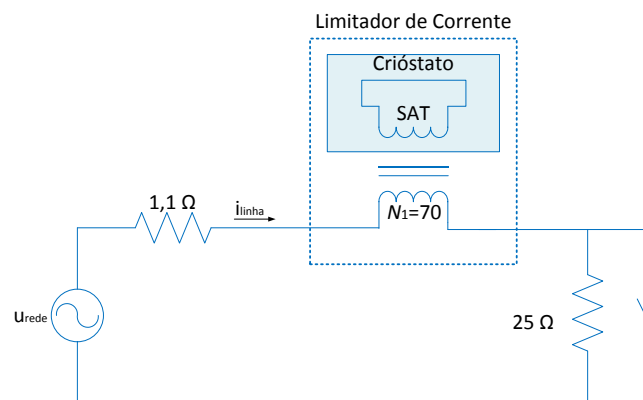
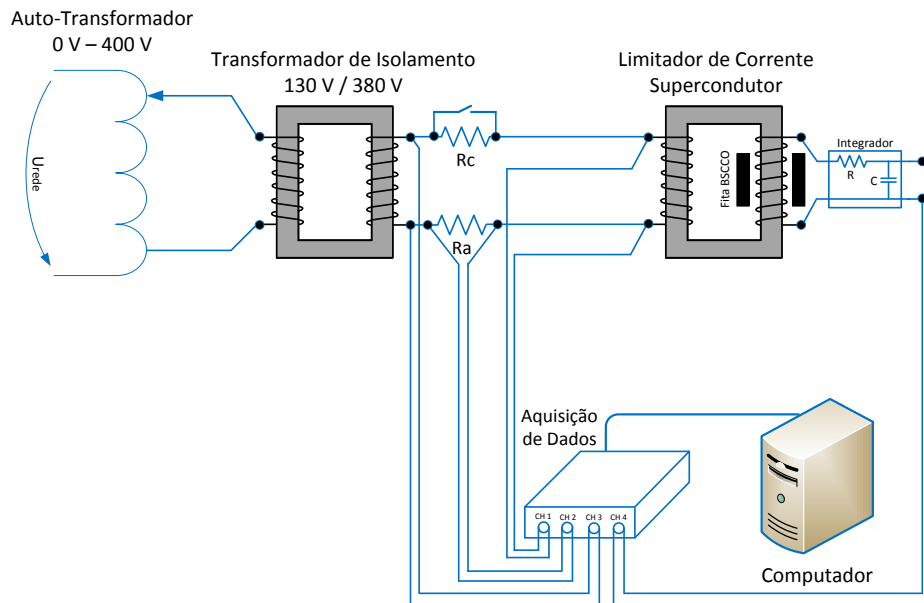


Figura 4.8 – Circuito elétrico de ensaio.

#### 4.3.1 Procedimento Experimental

Para observação do desempenho do limitador, implementa-se a montagem experimental representada na Figura 4.9. Além dos elementos descritos em 4.2.1, utilizam-se também os seguintes elementos:

- i. Anéis SAT: Formados por fita Bi-2223, correspondem ao secundário do LCS.
- i. Resistência de Carga: De valor  $25 \Omega$ , corresponde à carga do circuito em análise.
- ii. Interruptor: Elemento que permite anular a carga, de modo a produzir correntes de curto-circuito.



**Figura 4.9 – Montagem experimental para determinação do desempenho do limitador.**

O procedimento para obtenção dos ciclos de histerese do núcleo ferromagnético, em termos de indução  $B$  e campo  $H$ , e da bobina, em unidades de fluxo ligado  $\psi_0$  e corrente de excitação  $i_{incha}$ , é semelhante ao disposto em 4.2.1. A leitura destas grandezas pode ser feita com recurso a dois canais da bancada de aquisição de dados, pois, como referido,  $B$  é imagem de  $\psi_0$  e  $H$  é imagem de  $i_{incha}$ . Adquirem-se também as tensões aos terminais do secundário do transformador de isolamento, que corresponde à fonte de tensão do circuito elétrico em ensaio, e medem-se também as tensões aos terminais do LCS, de forma a verificar a influência deste no circuito, em situações de funcionamento normal e em funcionamento sob falha. Realizam-se dois tipos de ensaios, onde em ambos se varia o número de espiras no secundário, nomeadamente 1, 2, 3 e 4 espiras. Num tipo de ensaio, pretende-se observar a capacidade de blindagem magnética exercida pelo secundário, enquanto, no outro tipo de ensaio, se pretende observar o comportamento do dispositivo face ao surgimento de correntes de curto-circuito. A montagem experimental implementada em laboratório, para execução dos ensaios descritos, apresenta-se na Figura 4.10.

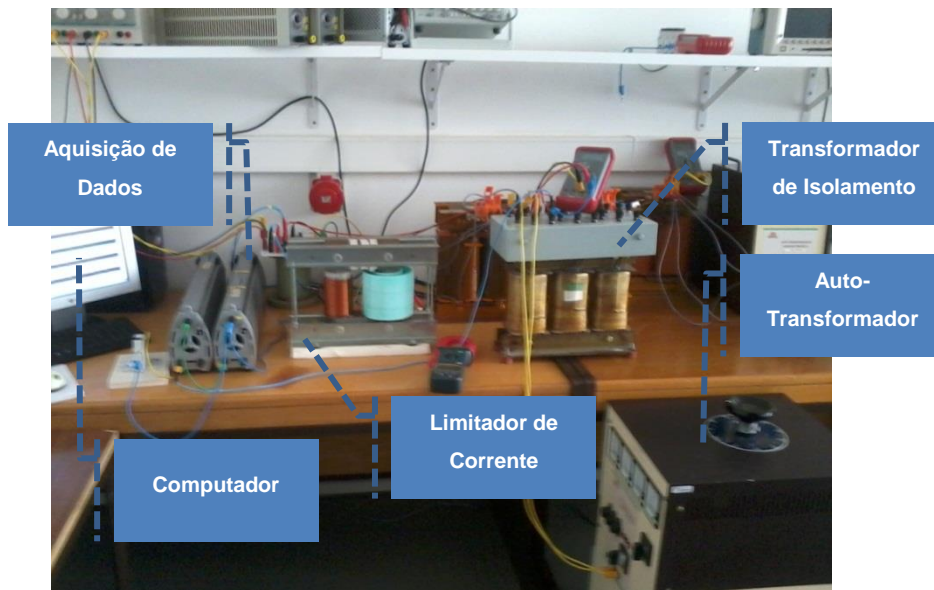


Figura 4.10 – Montagem experimental de ensaio para determinação do desempenho do limitador.

### 4.3.2 Resultados e Análise

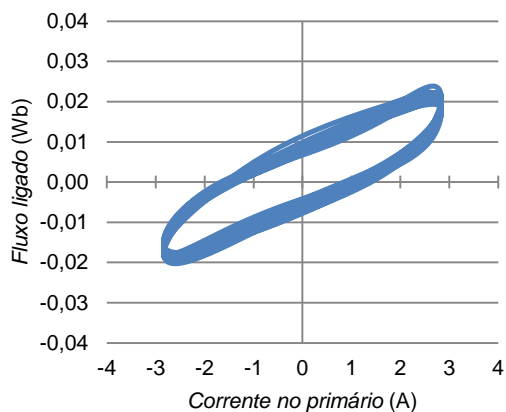
Com base nos resultados de ensaio recolhidos pretende-se apresentar e discutir a eficácia do protótipo na limitação das correntes de curto-circuito, além da sua virtual invisibilidade à rede, em situações de funcionamento normal. Note-se que os resultados apresentados nesta secção são baseados em ensaios onde o número de espiras no secundário do dispositivo é variável de ensaio para ensaio, mas as impedâncias de linha e de carga são fixas, assim como a tensão da fonte de alimentação, que, em condições iniciais, se pretende que tenha um valor alternado sinusoidal de amplitude de valor constante.

#### 4.3.2.1 Blindagem Magnética

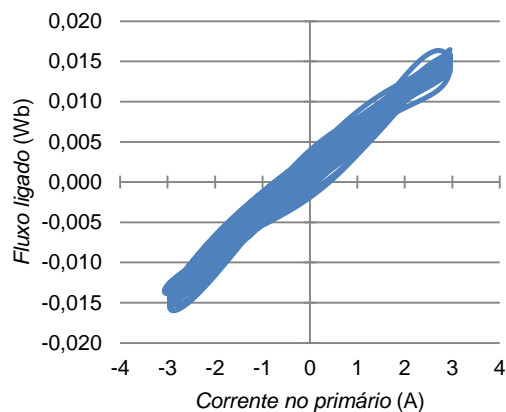
Em situações de funcionamento normal, o protótipo necessita de assegurar que não existe variação de fluxo magnético no núcleo, de forma a não permitir o surgimento de uma impedância no circuito, evitando a ocorrência perdas. Assim, o secundário tem por objetivo blindar o núcleo através das propriedades diamagnéticas dos seus anéis SAT.

Pela Figura 4.11, observa-se a evolução do fluxo ligado com o primário em função da corrente de linha. Os ciclos representados correspondem assim à característica da bobina face à existência de um secundário formado por anéis SAT. A bobina do primário é formada por 70 espiras, ao passo que a bobina para leitura do fluxo é de 65 espiras.

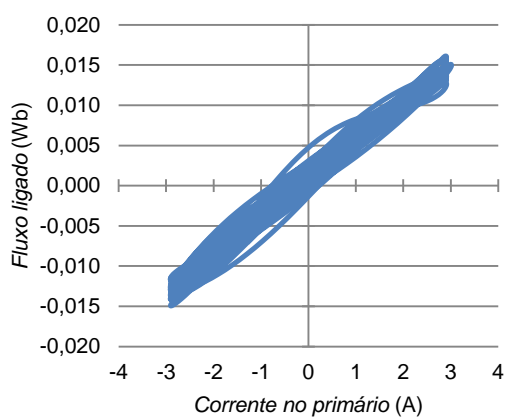
Na Figura 4.11 a), observa-se a característica da bobina face à existência de 1 anel SAT no secundário. É visível a existência de um ciclo, contudo o fluxo ligado é bastante reduzido, na ordem dos 25 mWb máximos. Apura-se que a adição de mais espiras ao secundário permite minimizar a área do ciclo observado na Figura 4.11 a), para valores máximos na ordem dos 15 mWb. Pelos resultados observados através da Figura 4.11 b), c) e d), verifica-se que a característica da bobina se mantém aproximadamente idêntica quer o secundário seja composto por 2, 3 ou 4 espiras. Esta situação será adiante discutida.



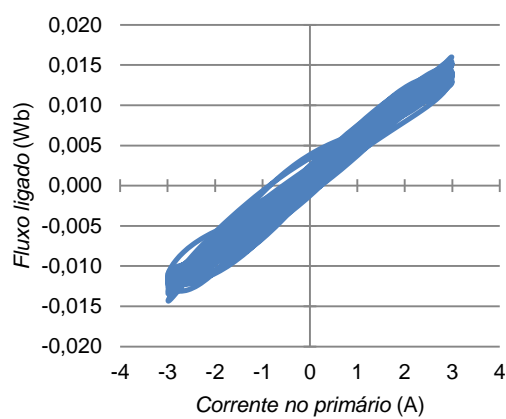
**a) Secundário com 1 anel SAT**



**b) Secundário com 2 anéis SAT**



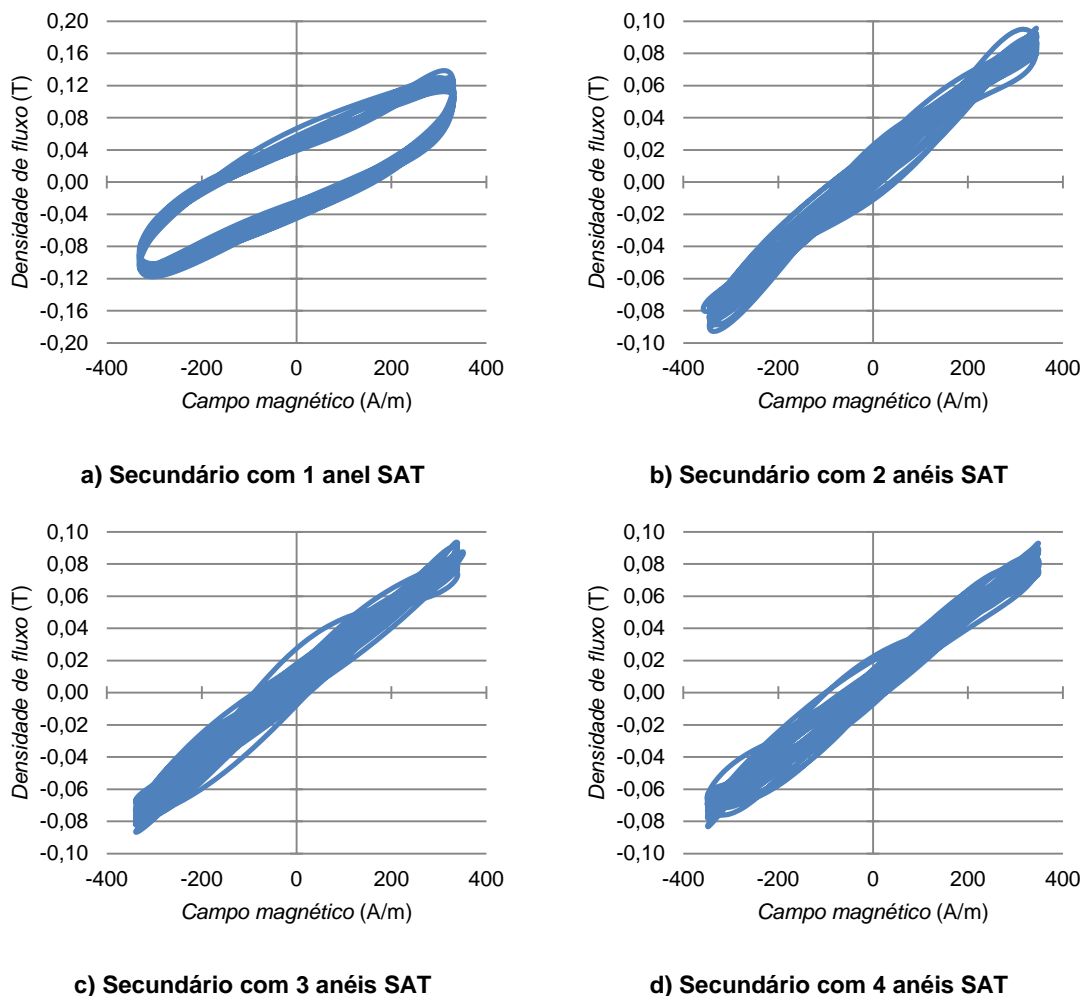
**c) Secundário com 3 anéis SAT**



**d) Secundário com 4 anéis SAT**

**Figura 4.11 – Característica da bobina face à composição do secundário.**

No que diz respeito à característica do núcleo, esta corresponde a uma imagem da característica da bobina, pelo que as conclusões que se retiram são bastante idênticas. A característica do núcleo, com um anel SAT no secundário, Figura 4.12 a), apresenta um ciclo onde o campo de indução máximo é relativamente reduzido, na ordem dos 120 mT, mas é superior aos campos máximos observados nas características do núcleo para 2, 3 ou 4 espiras no secundário, que são da ordem dos 100 mT, tal como se observa pela Figura 4.12 b), c) e d), respetivamente.



**Figura 4.12 – Característica do núcleo ferromagnético face à composição do secundário.**

Face ao valor das correntes de excitação envolvidas no ensaio e de acordo com os resultados obtidos, observa-se que a capacidade de blindagem do núcleo por parte do secundário supercondutor sofre poucas alterações quando o secundário é composto por 2, 3 ou 4 anéis SAT. Assim, em condições de regime normal, onde não se conjuguem elevados valores de corrente, o secundário não necessita de um elevado número de espiras para que a blindagem magnética seja procedida. Note-se que, uma única espira poderá não ser suficiente. Adiante se verão mais resultados.

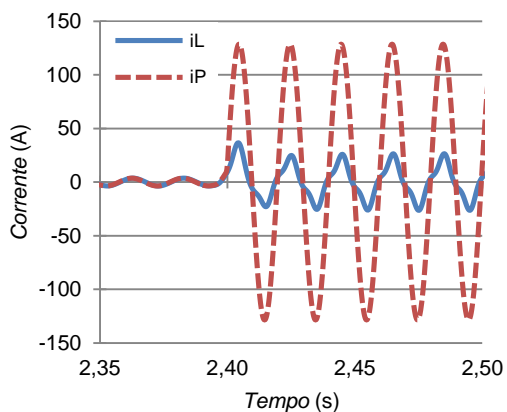
É de referir que, em termos ideais, o declive da característica deveria diminuir consoante o aumento do número de espiras no secundário. Pelos resultados alcançados observa-se que a capacidade de blindagem do núcleo é estagnada a partir do secundário composto por 2 anéis SAT. O comportamento evidenciado encontra a sua explicação nos fenómenos de dispersão magnética, pois, apesar de o secundário blindar o núcleo, o fluxo de dispersão interfere no enrolamento de leitura de fluxo, corrompendo as leituras efetuadas por este. Na secção de trabalhos futuros discutir-se-ão hipóteses para obviar este problema. Em todo o caso, pelos valores medidos, constata-se que os anéis SAT desenvolvidos permitem atingir uma das metas pretendidas, elevada blindagem magnética do núcleo em situações de funcionamento normal.

#### 4.3.2.2 Operação em Situações de Falha

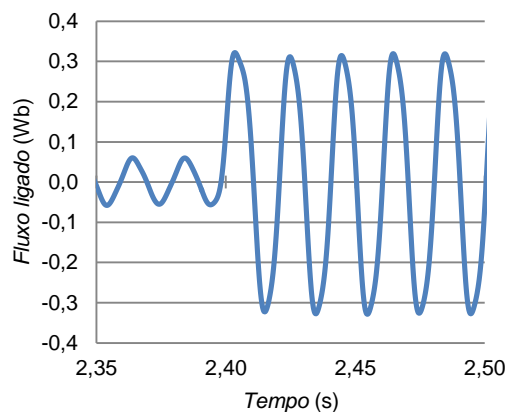
Em situações de falha, o protótipo necessita de assegurar elevada limitação de corrente, no menor intervalo de tempo de resposta possível. Assim, aquando da ocorrência de correntes de curto-circuito, o LCS deverá apresentar uma elevada impedância de modo a que a corrente de curto-circuito seja limitada para níveis que não coloquem em causa a destruição de elementos presentes no circuito. Para efeitos de análise do desempenho do dispositivo, nomeadamente a percentagem de limitação e a percentagem de queda de tensão aos terminais do LCS, exclui-se o primeiro período do sinal após acionamento do curto-circuito devido à impossibilidade de comandar o instante de acionamento do interruptor, pelo que se torna impossível analisar e comparar o primeiro período temporal, pelo facto do tempo de acionamento variar aleatoriamente de ensaio para ensaio.

Na Figura 4.13, observam-se os resultados de ensaio para o LCS com 1 espira no secundário, no momento de transição entre o regime normal e o regime de falha. Em regime de funcionamento normal, verifica-se que a corrente na linha tem de amplitude máxima 3,6 A. Observa-se que o limitador não é idealmente transparente à rede, pois verifica-se a existência de fluxo ligado com o primário, de amplitude máxima de 60,3 mWb, o que motiva a existência de uma queda de tensão aos terminais do limitador, que tem de valor máximo 14,4 V e que corresponde a 10,3% da tensão da fonte, 139,5 V. No entanto, a queda aos terminais do LCS também é influenciada pela impedância de outros elementos do circuito, tais como condutores de cobre ou dispositivos de contacto eléctrico. Relativamente ao ciclo de histerese, observa-se com nitidez a existência de um pequeno ciclo, o que resulta da fraca blindagem magnética efetuada pela única espira SAT presente no secundário, tal como previamente observado na Figura 4.12 a).

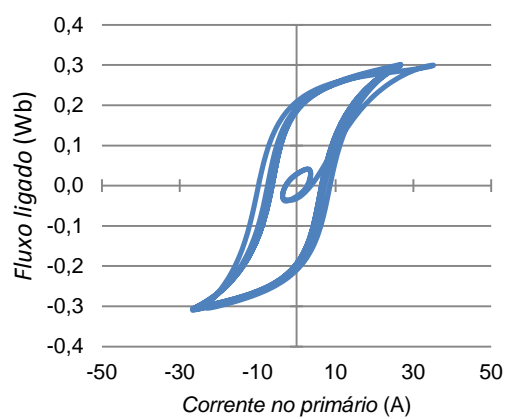
Em regime de falha, o desempenho do LCS é aceitável, pois o tempo de resposta é quase instantâneo. A corrente presumida tem de amplitude máxima 126,8 A, enquanto a corrente limitada tem o valor máximo de 36,6 A, valendo, após o primeiro pico, 26,3 A, que corresponde a cerca de 79,3% de limitação da corrente presumida. Verifica-se também o fenómeno de saturação magnética, evidenciado pelos ciclos de histerese da bobina e do núcleo, mas também pela evolução não sinusoidal da corrente na linha. O fluxo ligado aumenta para valores máximos de 327,5 mWb, sendo que, aos terminais do LCS, se verifica uma queda de tensão máxima na ordem dos 81,3 V, sendo a fonte fornecedora de 123,7 V, o que significa uma queda de tensão de 65,7% aos terminais do LCS relativamente à tensão fornecida. Note-se que a corrente presumida se trata de uma grandeza fictícia, calculada com base na tensão da fonte antes do curto-circuito.



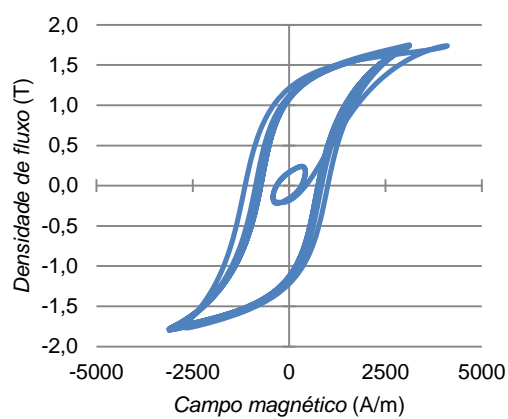
a) Corrente em função do tempo



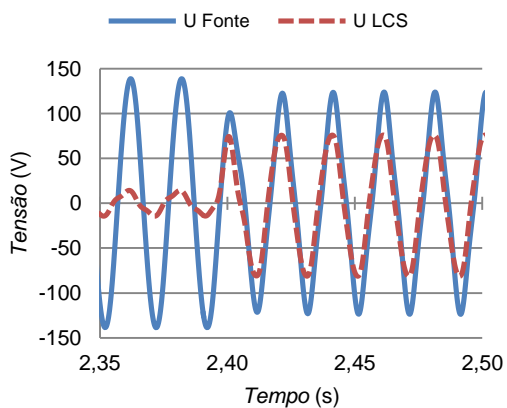
b) Fluxo magnético em função do tempo



c) Histerese da bobina.



d) Histerese do material



e) Tensão em função do tempo

Figura 4.13 – Resultados de operação sob falha, com o protótipo composto por 1 espira SAT no secundário.

Através do recurso a um secundário composto por 2 espiras SAT, verificam-se algumas melhorias relativamente ao caso onde o secundário era composto unicamente por 1 espira, especialmente no que diz respeito à queda de tensão aos terminais do LCS em regime de operação normal.

Na Figura 4.14 apresentam-se os resultados de ensaio para o LCS composto por 2 espiras no secundário. Neste ensaio, em regime normal, a corrente na linha tem de valor

máximo 3,8 A. O fluxo ligado máximo é de 47,8 mWb, o que é relativamente inferior ao caso anterior, inferindo-se que a presença de mais um anel SAT permite uma maior blindagem magnética do núcleo, assim como permite uma menor queda de tensão aos terminais, 7,6 V de valor máximo, sendo fornecido pela fonte 139,9 V.

Na presença de uma corrente de curto-circuito, observa-se que a corrente máxima na linha tem o seu valor máximo no primeiro pico, 29,9 A, tendo a corrente presumida o valor máximo em 127,2 A. Em termos de fluxo ligado, verifica-se o valor máximo de 309,3 mWb. A queda de tensão na fonte, neste regime de operação, é de 116,7 V, sendo que aos terminais do LCS se verificam 80,3 V. Pelos ciclos de histerese, mas também pelo andamento temporal da corrente, verifica-se a existência de saturação do núcleo ferromagnético, prevendo-se assim que os dois anéis SAT, em situação de falha, permitam a circulação de fluxo no ferro. Contudo, por comparação com o caso anterior, o fluxo ligado tem valor máximo inferior, pelo que é de notar uma maior oposição à circulação de fluxo magnético no ferro por parte do secundário composto por 2 anéis SAT.

Os resultados obtidos mostram que a utilização de um secundário de 2 espiras SAT em detrimento de uma única espira permite minimizar a queda de tensão observada aos terminais do LCS, em regime normal. Neste regime de operação, a queda de tensão corresponde aproximadamente a 5,4% da tensão fornecida pela fonte, o que corresponde a uma redução substancial por comparação com os resultados do ensaio do LCS composto unicamente por 1 espira SAT, onde se verifica uma queda de tensão aos terminais do LCS de 10,4% da tensão na fonte. Em regime de falha, a queda de tensão aos terminais do LCS composto por 2 espiras SAT vale aproximadamente 68,8% da tensão da fonte, o que representa uma maior percentagem de queda de tensão por comparação com o ensaio anterior, o que se revela como outro aspeto importante, pois neste regime de operação pretende-se que a maioria da tensão fornecida pela fonte seja absorvida pelo LCS.

No que diz respeito à percentagem de limitação da corrente presumida, tem-se, neste caso, uma percentagem de limitação na ordem dos 82,7%, devido à corrente de linha apresentar uma amplitude de 22,0 A, após o primeiro pico associado ao regime de falha. Por comparação com o ensaio anterior prevê-se que o LCS composto por 2 espiras SAT apresente melhor desempenho na limitação de correntes de curto-circuito.

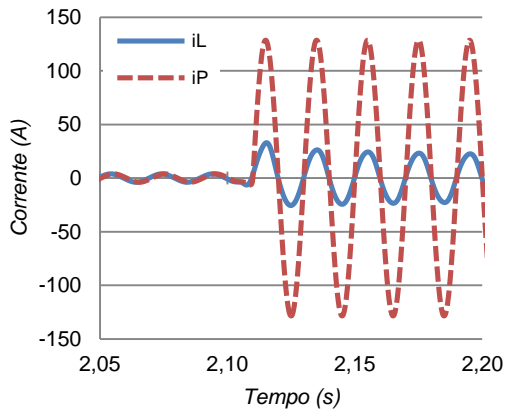




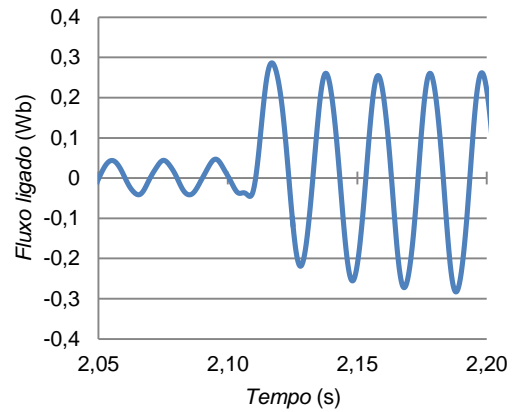
Aquando da ocorrência de um curto-circuito, surge uma corrente máxima na linha de 32,9 A, sendo a corrente presumida de 127,2 A máximos. O fluxo ligado tem o valor máximo de 286,2 mWb, ao passo que, dos 108,5 V máximos fornecidos pela fonte, 79,4 V encontram-se aos terminais do LCS. O aumento do número de espiras no secundário leva ao decréscimo do fluxo ligado, principalmente em situações de falha, pelo que a saturação do núcleo não é tão acentuada, tal como se verifica pelos ciclos de histerese apresentados.

Analisando o desempenho, verifica-se que, em regime de operação normal, a tensão aos terminais do LCS vale na ordem dos 5,2% da tensão fornecida pela fonte, o que representa um decréscimo relativamente aos casos anteriores. Em regime de curto-circuito, a queda de tensão aos terminais do LCS é de aproximadamente 73,2%, o que corresponde a uma subida em relação aos casos anteriores.

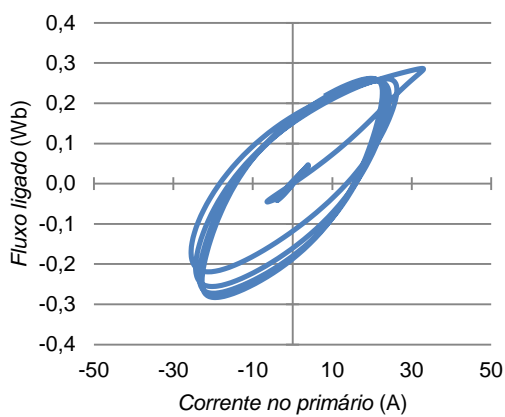
No que diz respeito à percentagem de limitação, aquando da ocorrência de um curto-circuito, observa-se a limitação da corrente presumida em cerca de 80,9%, devido à corrente de linha de amplitude 24,3 A, o que representa menor capacidade de limitação comparativamente aos resultados obtidos com o LCS composto por 2 espiras SAT. De notar, uma vez mais, que se exclui o primeiro pico após acionamento da falha, pelas razões discutidas previamente.



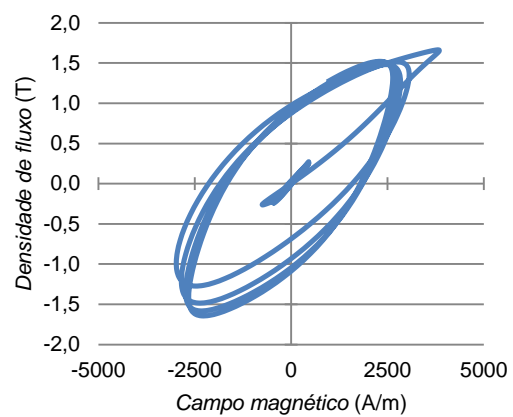
a) Corrente em função do tempo



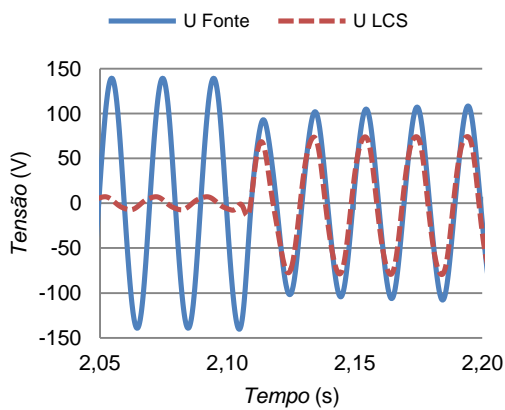
b) Fluxo magnético em função do tempo



c) Histerese da bobina.



d) Histerese do material



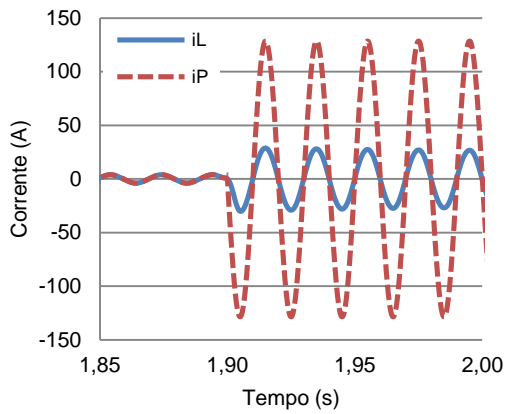
e) Tensão em função do tempo

Figura 4.15 – Resultados de operação sob falha, com o protótipo composto por 3 espiras SAT no secundário.

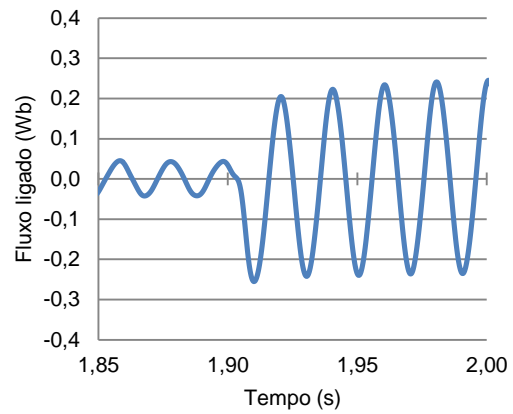
Por fim, na Figura 4.16 apresentam-se os resultados do ensaio do LCS composto por 4 espiras SAT no secundário. Em regime de funcionamento normal, observa-se uma corrente máxima na linha de 3,9 A. O fluxo máximo vale 44,7 mWb, enquanto, aos terminais do limitador se tem 7,2 V dos 140,0 V fornecidos pela fonte. Assim, neste regime, verifica-se que a queda de tensão aos terminais do LCS corresponde a 5,1% da tensão da fonte.

Aquando da ocorrência da falha, a corrente na linha vale 28,7 A, para uma corrente presumida de 127,3 A, que corresponde a uma limitação de aproximadamente 77,5% da

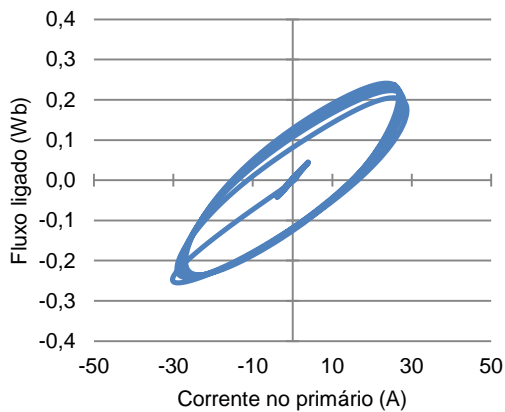
corrente presumida, no entanto, para efeitos de comparação com os casos anteriores, exclui-se o primeiro período após a falha, donde se observa uma corrente máxima de linha de 27,4 A, o que corresponde a uma limitação de aproximadamente 78,5%. O fluxo ligado tem o valor máximo de 255,2 mWb. Aos terminais do LCS tem-se 76,0 V dos 101,8 V fornecidos pela fonte, ou seja, 75,7% da tensão fornecida pela fonte encontra-se aos terminais do LCS.



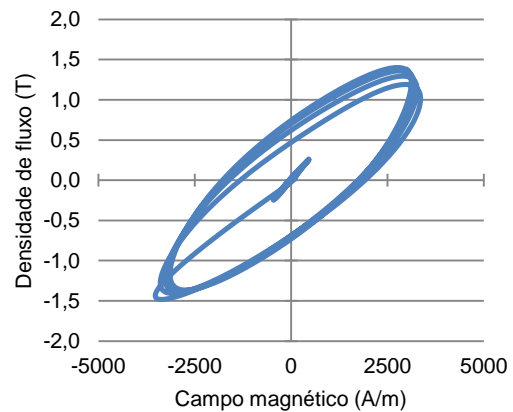
a) Corrente em função do tempo



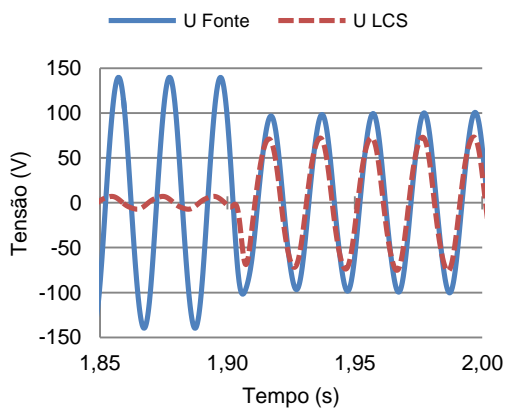
b) Fluxo magnético em função do tempo



c) Histerese da bobina.



d) Histerese do material



e) Tensão em função do tempo

Figura 4.16 – Resultados de operação sob falha, com o protótipo composto por 4 espiras SAT no secundário.

De modo a resumir os resultados alcançados, apresentam-se na Tabela 4.2 os valores máximos absolutos das grandezas medidas nos ensaios, tanto em regime normal como em regime de falha.

**Tabela 4.2 – Valores máximos observados no LCS em operação.**

Nº. de espiras SAT	Funcionamento normal				Funcionamento em falha				
	$i_{linha}$ (A)	$\psi_{LCS}$ (mWb)	$u_{fonte}$ (V)	$u_{LCS}$ (V)	$i_{linha}$ (A)	$i_p$ (A)	$\psi_{LCS}$ (mWb)	$u_{fonte}$ (V)	$u_{LCS}$ (V)
1	3,6	60,3	139,5	14,4	36,6	126,8	327,5	123,7	81,3
2	3,8	47,8	139,9	7,6	29,9	127,2	309,3	116,7	80,3
3	3,9	47,0	139,9	7,3	32,9	127,2	286,2	108,5	79,4
4	3,9	44,7	140,0	7,2	28,7	127,3	255,2	101,8	76,0

Na Tabela 4.3 apresenta-se, em termos percentuais, a comparação entre as quedas de tensão aos terminais do LCS em função do número de espiras do secundário, no caso do regime de operação normal. Tal como analisado anteriormente, verifica-se que a queda de tensão é menor à medida que o número de espiras no secundário é maior.

**Tabela 4.3 – Valores máximos observados no LCS em operação normal.**

Nº. de espiras SAT	Funcionamento normal		
	$u_{fonte}$ (V)	$U_{LCS}$ (V)	% Tensão no LCS
1	139,5	14,4	10,3
2	139,9	7,6	5,4
3	139,9	7,3	5,2
4	140,0	7,2	5,1

Os valores máximos absolutos observados das grandezas medidas, presentes na Tabela 4.2, resultam dos ensaios efetuados onde não é tido em conta o instante temporal de acionamento do interruptor que provoca o curto-circuito. Assim, para efeitos de comparação dos resultados alcançados para diferentes números de espiras no secundário, o transitório do primeiro pico deverá ser excluído, pois a utilização do interruptor, que não é comandado em tempo de disparo, não permite o acionamento da falha para instantes temporais idênticos para diferentes ensaios, não possibilitando a comparação em termos do transitório inicial. Os valores máximos observados, excluindo o transitório inicial, apresentam-se na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Valores máximos observados no LCS em operação, após falha e excluindo o primeiro período do sinal, após acionamento do interruptor.**

Nº. de espiras SAT	Funcionamento em falha						
	$i_{linha}$ (A)	$i_p$ (A)	% Limitação	$\psi_{LCS}$ (mWb)	$u_{fonte}$ (V)	$u_{LCS}$ (V)	% Tensão no LCS
1	26,3	126,8	79,3	327,5	123,7	81,3	65,7
2	22,0	127,2	82,7	309,3	116,7	80,3	68,8
3	24,3	127,2	80,9	283,0	108,5	79,4	73,2
4	27,4	127,3	78,5	240,8	100,4	76,0	75,7

Pelas evidências experimentais observadas, para os níveis de tensão e corrente utilizados no ensaio, o limitador precisará somente de 2 espiras SAT no secundário, para desempenhar eficazmente as suas funções, isto é, elevado poder de limitação.

## 4.4 Avaliação de Resultados para Potencial Validação de uma Metodologia para Simulação Dinâmica de um Circuito com Limitador

A metodologia para simulação do comportamento dinâmico de um circuito com limitador, apresentada em 2.6.3, fora validada pelo autor através da comparação com resultados obtidos por um programa de elementos finitos. Pelas simulações efetuadas, verifica-se elevada concordância de resultados entre o programa de elementos finitos e a metodologia proposta, com a vantagem de que o tempo de simulação através da metodologia fora substancialmente menor comparativamente ao programa. Estando a metodologia validada em termos de simulação, torna-se útil validar a mesma em termos práticos, isto é, comparar resultados experimentais com os resultados de simulação obtidos pela metodologia, de modo a observar a adequabilidade desta para simulação de limitadores. Face à dificuldade encontrada em medir as correntes máximas induzidas nas bobinas supercondutoras, como será adiante discutido, esta secção pretende fundamentalmente avaliar os resultados experimentais obtidos para uma potencial validação da metodologia de modelização de limitadores indutivos.

### 4.4.1 Característica Magnética do Ferro com o Primário

A determinação, por ajuste<sup>22</sup>, dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $d$ , da característica do primário, com núcleo de ferro mas sem supercondutor, apresentada analiticamente em (2.26), faz-se com base nos resultados experimentais obtidos, apresentados na secção 4.2. O melhor ajuste aos resultados experimentais conduzem aos parâmetros:

$$a = 1,23 \times 10^{-9}; b = 0,3717; c = 433,3; d = 1,066$$

Na Figura 4.17 apresenta-se a comparação entre os resultados experimentais e os resultados previstos, segundo os parâmetros determinados, da excursão  $\psi_0(i_{linha})$ . Embora não completamente sobrepostas, as características observadas apresentam razoável semelhança. Com base nos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $d$  determinados e nas características das partes constitutivas do limitador torna-se possível a determinação do seu ciclo de histerese máximo.

---

<sup>22</sup> Ferramenta *cftool* do Matlab.

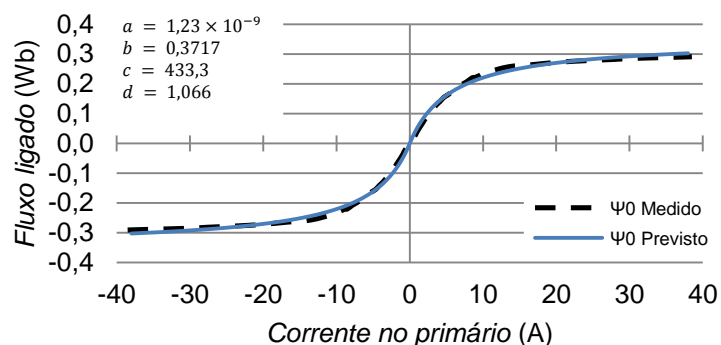


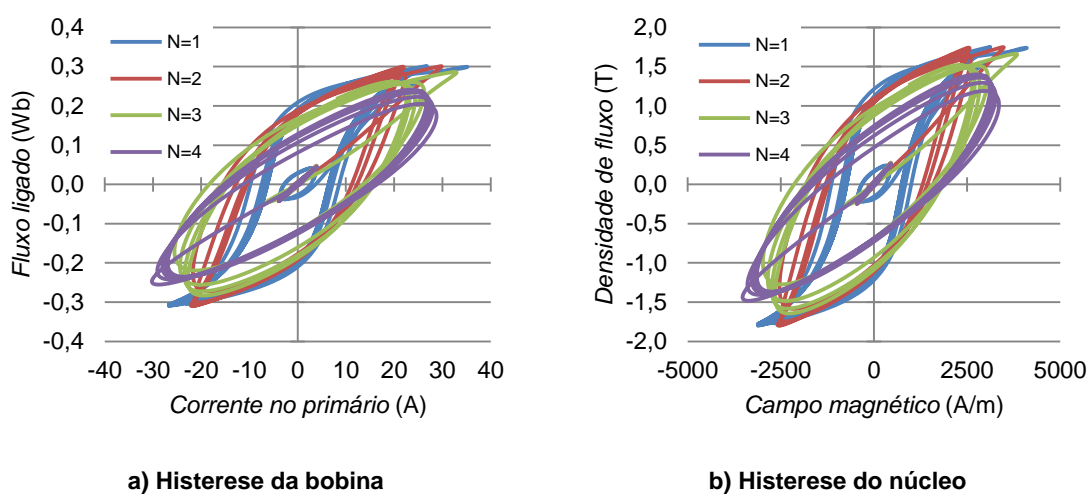
Figura 4.17 – Característica do primário, com núcleo de ferro mas sem supercondutor.

#### 4.4.2 Ensaio do Limitador com Variação do Número de Espiras Supercondutoras

O número de espiras no secundário, como observado em 4.3, tem influência no comportamento do protótipo tanto no regime de operação normal como em falha. No que concerne aos ciclos de histerese, estes apresentam diferenças notórias, tal como se verifica pela Figura 4.18, onde a sobreposição dos ciclos de histerese evidencia as diferenças.

No regime de funcionamento normal, os ciclos de histerese obtidos, à exceção da característica observada quando o limitador é composto por uma única espira no secundário, apresentam razoável semelhança, pelos motivos debatidos anteriormente em 4.3.2.1, isto é, evidências de fluxo de dispersão.

No regime de funcionamento em curto-circuito, é de notar o fenómeno de saturação magnética nos casos em que o secundário é composto por 1 e por 2 espiras SAT. Contudo, este fenómeno deixa de ser observado nos ensaios onde o secundário é composto por mais do que 2 espiras, tornando-se evidente a redução do fluxo ligado máximo, à medida que o número de espiras no secundário aumenta.



a) Histerese da bobina

b) Histerese do núcleo

Figura 4.18 – Comparação dos ciclos de histerese obtidos para 1, 2 3 e 4 espiras no secundário.

Na Figura 4.19, observa-se a sobreposição da característica de magnetização do núcleo ferromagnético com os ciclos de histerese obtidos nos ensaios. Nota-se a tendência

para que, à medida que o número de espiras no secundário aumenta, o ciclo de histerese deixa de evoluir paralelamente à característica de magnetização. De notar que a característica de magnetização é obtida na ausência de qualquer elemento supercondutor, pelo que, a evolução do ciclo de histerese de forma não paralela à característica de magnetização faz prever a existência de fenómenos de blindagem magnética, o que, em situação de falha, não é plenamente desejável, pois, neste caso, deve-se permitir a penetração de fluxo no núcleo.

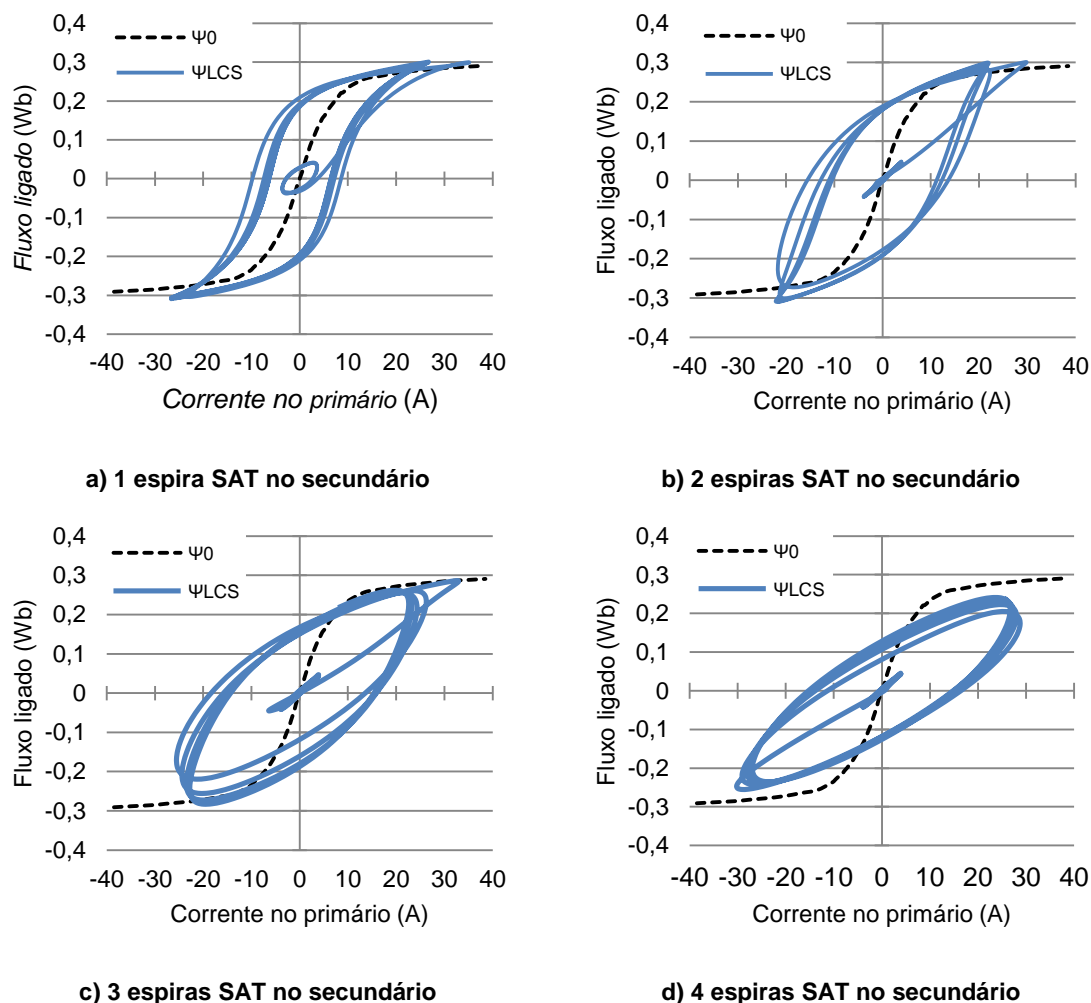


Figura 4.19 – Comparação da curva de 1ª magnetização com a histerese proveniente do LCS em operação.

#### 4.4.3 Ensaio do Limitador com Variação da Impedância de Linha

O comportamento do dispositivo em regime de falha, mantendo o número de espiras no secundário mas variando os níveis de curto-circuito, depende fundamentalmente da tensão da fonte e da impedância da linha. Mantendo a tensão da fonte fixa em  $84 V_{ef}$ , o número de espiras SAT no secundário fixo em 2 espiras, mas variando a impedância da linha, para valores resistivos de  $0,55 \Omega$ ,  $1,1 \Omega$  e  $2,2 \Omega$ , resulta, em curto-circuito, correntes presumidas de 216 A, 108 A e 54 A, respetivamente. As correntes de curto-circuito são substancialmente limitadas pelo dispositivo, tal como se observa pela Figura 4.20, onde se sobrepõem os ciclos de histerese do limitador,  $\psi_{LCS}$ , para os diferentes níveis de curto circuito. No mesmo gráfico,



apresenta-se também a característica da bobina com núcleo, mas sem secundário SAT,  $\psi_0$ , onde é evidente a evolução paralela das características  $\psi_{LCS}$  relativamente a  $\psi_0$ .

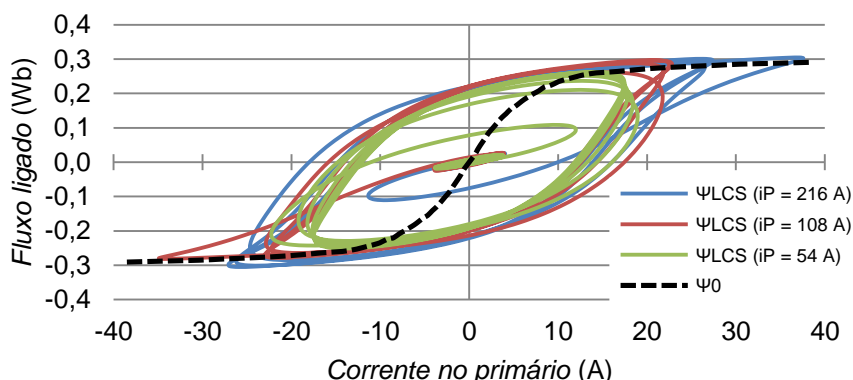


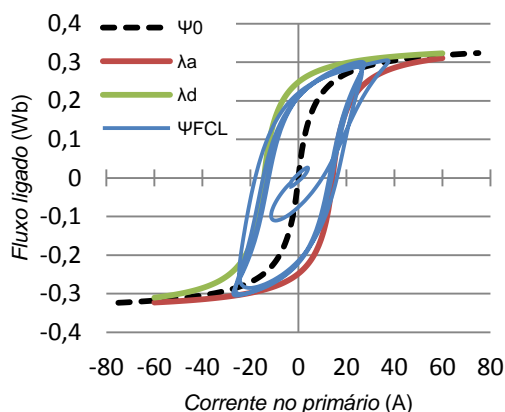
Figura 4.20 – Resultados do ensaio do limitador com variação da impedância de linha resistiva.

#### 4.4.4 Construção do Ciclo Máximo de Histerese

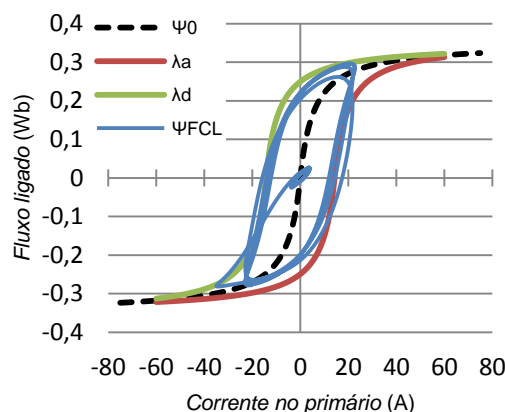
A determinação da máxima corrente no secundário SAT do limitador, sob ação de um campo externo, pode ser facilmente determinada, em supercondutores maciços, através de uma bobina de Rogowski. No entanto, caso o secundário seja composto por anéis SAT formados por fita, tal medição encontra dificuldades, não só em termos de dimensões e geometria, mas também devido à elevada dispersão eletromagnética, que prejudica as leituras com a bobina de Rogowski. De notar a diferença entre corrente crítica e corrente máxima no supercondutor, pois são grandezas diferentes.

Embora encontrando dificuldades em determinar a corrente máxima na bobina supercondutora,  $I_{SAT}^*$ , pode-se inferir acerca da adequabilidade da metodologia para modelização do comportamento dinâmico do dispositivo, através da consideração de hipóteses para a máxima corrente na bobina supercondutora, partindo, para tal, pelos resultados de ensaio obtidos. Deste modo, apesar de não se poder proceder à validação da metodologia, é possível prever a potencial validação desta. Em termos futuros será fundamental desenvolver um método para medição das correntes máximas em bobinas supercondutoras, de modo a validar totalmente a metodologia.

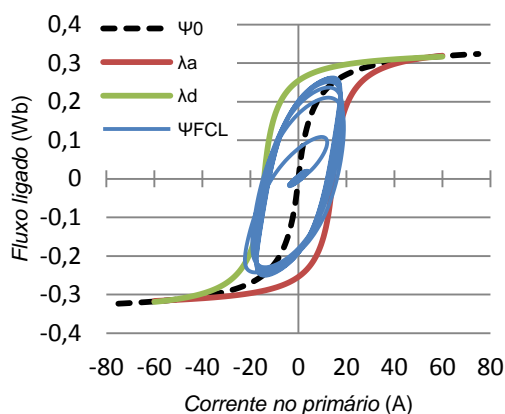
Na Figura 4.21 apresenta-se a comparação de resultados do ensaio do limitador com variação da impedância de linha e a simulação pela metodologia adotada. O ciclo  $\psi_0(i_{linha})$  resulta dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  determinados em 4.4.1. Para simulação do ciclo de histerese máximo do dispositivo,  $\psi_{LCS}^*(i_{linha})$ , numa linha de  $0,55 \Omega$  em curto-circuito e corrente presumida de 216 A, definem-se os parâmetros de (2.29) como  $I_{SAT}^* = 1000 \text{ A}$  e  $I_{cc} = 216 \text{ A}$ . Para simulação numa linha de  $1,1 \Omega$  em curto-circuito e corrente presumida de 108 A, definem-se  $I_{SAT}^* = 1000 \text{ A}$  e  $I_{cc} = 108 \text{ A}$ . Por fim, para simular simulação numa linha de  $2,2 \Omega$  em curto-circuito e corrente presumida de 54 A, definem-se  $I_{SAT}^* = 1000 \text{ A}$  e  $I_{cc} = 54 \text{ A}$ . Note-se que, face à impossibilidade de medição, o parâmetro  $I_{SAT}^*$  corresponde a um valor hipotético, que apenas tem por objetivo possibilitar a simulação e assim a averiguar o potencial da metodologia.



a) Resistência de linha de 0,55 Ω e corrente presumida de 216 A.



b) Resistência de linha de 1,1 Ω e corrente presumida de 108 A.



c) Resistência de linha de 2,2 Ω e corrente presumida de 54 A.

Figura 4.21 – Comparação de resultados do ensaio do limitador com variação da impedância de linha através do ensaio laboratorial e da simulação pela metodologia adotada.

Pela comparação entre resultados de simulação e resultados experimentais, é possível identificar razoáveis semelhanças. A evolução dos ciclos de histerese experimentais de forma sobreposta aos ramos ascendente e descendente do ciclo máximo simulado,  $\psi_{LCS}^*$ , abre uma janela de otimismo em relação à validação da metodologia de simulação do comportamento dinâmico de limitadores. Para tal, torna-se premente o desenvolvimento de um mecanismo de medição da corrente máxima induzida em anéis supercondutores formados por fita Bi-2223, de modo a caracterizar completamente todas as partes constitutivas do limitador de corrente.

## 4.5 Síntese

Neste capítulo apresentaram-se e analisaram-se os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais efetuados e também se fez referência a uma metodologia de simulação do comportamento dinâmico de limitadores indutivos.

Para comparação com os valores divulgados pelo fabricante acerca da corrente crítica da fita Bi-2223 adquirida, executou-se o método dos quatro pontos, à luz da norma

internacional (IEC 61788-3, 2006). Dos pontos experimentais obtidos, pela lei da potência, determina-se a corrente crítica da amostra ensaiada.

Do ensaio em vazio do núcleo ferromagnético, como se de um transformador se tratasse, obteve-se a característica de magnetização deste, assim como a característica da bobina com o núcleo inserido.

Procedeu-se também ao ensaio do protótipo, de forma a verificar a sua *performance*. Inserido num circuito elétrico, registaram-se tensões elétricas no circuito e no protótipo, de modo a permitir a avaliação do desempenho do dispositivo, tanto em situações de funcionamento normal, como em situações de curto-circuito.

Por fim, abordou-se o potencial de uma metodologia de simulação do comportamento dinâmico de limitadores, contribuindo com resultados experimentais.



## 5 Conclusões e Trabalho Futuro

Findo o desenvolvimento do trabalho, torna-se necessário tecer as conclusões retiradas deste, assim como prever o trabalho necessário em termos futuros. O trabalho desenvolvido apresentou resultados dos ensaios em laboratório do protótipo de um limitador de corrente supercondutor, baseado em fita SAT Bi-2223.

As propriedades da fita supercondutora utilizada, nomeadamente em termos da lei da potência, foram medidas de acordo com o padrão (IEC 61788-3, 2006), sendo possível determinar a corrente crítica desta.

A fim de observar o comportamento do dispositivo, tanto nos regimes de funcionamento normal como em falha, um circuito elétrico sob proteção do limitador fora sujeito a diversos ensaios onde se provocaram correntes de curto-circuito. De modo a observar a capacidade de blindagem assim como o poder de limitação, o número de espiras do secundário SAT fora variado.

Por último, de modo a avaliar o potencial de uma metodologia para simulação dinâmica de um circuito com limitador, foram obtidos resultados experimentais e posteriormente comparados com resultados de simulação.

### 5.1 Conclusões

O limitador de corrente desenvolvido permitiu atingir os objetivos previstos inicialmente. Tendo como propósito fins laboratoriais, o ensaio do protótipo desenvolvido permitiu retirar algumas conclusões importantes, além de que os resultados alcançados poderão ajudar ao desenvolvimento futuro destes dispositivos, assim como contribuir para o desenvolvimento de metodologias de simulação de limitadores indutivos. Considera-se a utilização de anéis formados por fita supercondutora no secundário do núcleo do LCS como uma opção com viabilidade, uma vez que permite a adaptação do LCS às características da rede, através da escolha do número de espiras, assim como o escalamento de limitadores para qualquer dimensão física.

A existência de fenómenos de blindagem magnética é evidente, pois, pelos ensaios efetuados, obtêm-se resultados onde se verifica reduzida variação de fluxo magnético no núcleo.

Os resultados alcançados revelam-se bastante satisfatórios, principalmente ao nível da limitação da corrente na linha em regime de falha, obtendo-se limitações entre 78,5% e 82,7% da corrente presumida. Em regime de operação normal, o LCS não se apresenta totalmente transparente à rede, verificando-se, ainda que reduzida nalguns casos, queda de tensão aos seus terminais, entre 5,1% e 10,3% da tensão da fonte. Contudo, é de notar que os condutores elétricos utilizados no circuito de ensaio não têm impedância desprezável, pelo que parte das perdas resultam da impedância dos condutores elétricos utilizados e respetivos contactos e não do limitador em si. Uma forma de minimizar a impedância dos condutores elétricos do circuito passa pela otimização do circuito, nomeadamente redução do comprimento dos condutores e aumento da sua secção.

O desempenho do LCS, sendo o enrolamento secundário composto por anéis SAT à base de fita Bi-2223, abre uma janela de otimismo face ao potencial desenvolvimento de limitadores baseados nesta tipologia uma vez que, sendo a fita Bi-2223 de primeira geração, a utilização de fita de segunda geração poderá contribuir para a melhoria dos resultados alcançados.

## 5.2 Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido, essencialmente laboratorial, permite verificar e comprovar o potencial dos LCS nesta tipologia. No entanto, de forma a permitir a otimização destes dispositivos torna-se necessário o recurso a fita 2G, pois esta apresenta um desempenho substancialmente superior, quando comparado com a fita 1G.

Terá de ser dado um enfoque em metodologias de desenvolvimento e simulação de LCS indutivos, de forma a prever o seu desempenho nas mais diversas redes de energia. As evidências experimentais observadas permitem concluir que o recurso à metodologia proposta em (Pina, 2010) tem viabilidade para simular eficazmente o desempenho dinâmico de limitadores indutivos. De modo a validar a metodologia, torna-se necessário o contributo de um maior número de resultados experimentais, nomeadamente a medição das correntes máximas induzidas, neste caso, nos anéis supercondutores. Tal tarefa poderá ser desenvolvida com recurso a dispositivos com sensibilidade por efeito de Hall, ou mesmo através de uma sonda de Rogowski. No entanto, dadas as dimensões e geometria dos anéis SAT, assim como o circuito indutor, os elementos de medição terão de ser adaptados a tais dimensões e geometria. Mediante este tipo de ensaio, além do contributo através da medida das correntes máximas induzidas nos anéis SAT, torna-se também possível observar o efeito de blindagem destes, o que permite proceder a uma comparação com os resultados obtidos em 4.3.2.1 e assim obter conclusões na presença de uma maior quantidade de resultados experimentais.

Uma vez que o protótipo desenvolvido apenas foi ensaiado numa rede monofásica, à escala laboratorial poderá ainda ser desenvolvido e ensaiado um LCS indutivo para redes trifásicas e também proceder a vários ensaios para observar a percentagem de limitação do dispositivo para diferentes redes, níveis de tensão/corrente, etc...

A deteção de *quench*, constitui outra meta importante, uma vez que a potencial destruição de supercondutores por efeitos térmicos deverá ser precavida. O escalamento de LCS para maiores potências encontra-se previsto, pelo que será necessário desenvolver mecanismos de deteção de *quench*.

Embora os suportes de apoio dos anéis SAT, construídos à base de Celeron, tenham cumprido com os requisitos previstos inicialmente, isto é, interferência nula em fenómenos eletromagnéticos, elevada resistência mecânica, reduzida expansão/compressão do material em função da temperatura deste e facilidade de alojamento dos anéis, verificou-se a existência de fenómenos térmicos potencialmente destrutivos nos anéis SAT caso sejam expostos a falhas de longa duração, nomeadamente o elevado aumento da temperatura dos anéis, evidenciado através da exagerada evaporação do azoto. Prevê-se que a construção de

suportes de apoio com perfurações intercaladas ao longo das paredes do suporte possam permitir uma maior refrigeração dos supercondutores, permitindo, desta forma, minimizar potenciais riscos de destruição dos supercondutores.

Por outro lado, os fenómenos térmicos observados poderão também ser obviados através da melhoria das soldaduras efetuadas, ou, do recurso a solda de melhor qualidade, reduzindo assim a componente resistiva dos anéis SAT.

Por último, tendo em consideração os resultados evidenciados em 4.3.2.1, torna-se necessário o ensaio do dispositivo com primário e secundário colocados na mesma coluna, de modo a verificar se o fenómeno de blindagem magnética apresenta melhorias, ou seja, se a perturbação por fluxo de dispersão diminui. A redução do diâmetro dos anéis SAT e do circuito primário, de forma a minimizar o entreferro entre estes e o núcleo, constitui uma melhoria adicional.





# Referências

## Referências Bibliográficas

- Barros, N. (2011). *Análise do Impacto da Integração de Energias Renováveis em Redes de Distribuição*. M. Sc. Thesis. Universidade do Porto.
- Bauml, K., & Kaltenborn, U. (2011). Inductive Shielded Superconducting Fault Current Limiter - A New Cost Effective Solution for Industrial Network Applications. Germany: Schneider Electric Energy.
- Bean, C. P. (1962). Magnetization of Hard Superconductors. *Physical Review Letters*, (pp. 250-253).
- Bean, C. P. (1964). Magnetization of High-Field Superconductors. *Reviews for Modern Physics*, (pp. 31-39).
- Bock, J., Breuer, F., Walter, H., Elschner, S., Kleimaier, M., Kreutz, R., & Noe, M. (2005). CURL 10: Development and field test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP BSCCO-2212. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15, (pp. 1955-1960).
- Ceballos, J. M. (2010). *Analysis of AC losses in superconducting electrical components for application in the design of electrical systems*. Ph. D. Thesis. University of Extremadura.
- Ginzburg, V. L., & Landau, L. D. (1965). *On the Theory of Superconductivity*. . Gordon and Breach, Science Publishers.
- Gonçalves, A. (2001). *Ensaio de um Transformador*. PAPCC, Faculdade de Ciências e Tecnologia, DEE, Caparica.
- Hewitson, L. G., Brown, M., & Balakrishnan, R. (2004). *Practical Power Systems Protection*. Elsevier.
- IEC 61788-3. (2006). International Standard IEC 61788-3.
- Jiayi, H., Chuanwen, J., & Rong, X. (2008). A review on distributed energy resources and microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2472-2483.
- Kado, H., Ichikawa, M., Shibuya, M., Kojima, M., Kawahara, M., & Matsumura, T. (2005). Inductive Type Fault Current Limiter Using Bi-2223 Thick on MgO Cylinder With Bi-2212 Buffer Layer. *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol. 15, NO. 2, (pp. 2051-2054).
- Kim, Y. B., Hempstead, C. F., & Strnad, A. R. (1962). Critical Persistent Currents in Hard Superconductors. *Physical Review Letters*, (pp. 306-309).
- Kim, Y. B., Hempstead, C. F., & Strnad, A. R. (1963). Magnetization on Critical Supercurrents. *Physical Review*, (pp. 528-536).
- Klein, H. (2010). CC Based FCL's. Progress in Performance and Prototyping. *Braunschweiger Supraleiterseminar*.
- Kozak, J., & Janowski, T. (2003). Applications of HTS Fault Current Limiters in Power Network.
- Kreutz, R., Bock, J., Breuer, F., Juengst, K., Kleimaier, M., Klein, H., . . . Weck, K. (2005). System Technology and Test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA Resistive High-Tc

- Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, (pp. 1961-1964).
- Lamas, J. (2009). *Projeto e Construção de Limitador de Corrente Supercondutor Utilizando Fitas de YBCO*. M. Sc. Thesis. Universidade de São Paulo. .
- Lima, C. (2005). Notas de Aulas de Estrutura da Matéria - Superfluidez e Supercondutividade. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- London, F., & London, H. (1935). The Electromagnetic Equations of the Supraconductor. *Royal Society of London Proceedings Series A*, 149, pp. 71-88.
- Lopes, J. P. (2006). Impacto da integração da geração eólica nas redes eléctricas. *Seminário de Energia Eólica*. Universidade do Porto.
- Majoroš, M., Janšak, L., Sello, S., & Zannella, S. (1997). Transient Analysis of Inductive Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, 2, pp. 989-992.
- Marouchkine, A. (2004). *Room Temperature Superconductivity*. Cambridge International Science Publishing.
- Meerovich, V., & Sokolovsky, V. (2007). Thermal regimes of HTS cylinders operating in devices for fault current limitation. *Superconductor Science and Technology*, 20, 5, pp. 457-462.
- Noe, M., Hobl, A., Tixador, P., Martini, L., & Dutoit, B. (2012). Conceptual Design of a 24 kV, 1 kA Resistive Superconductin Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 22, No. 3.
- Parks, R. D. (1969). *Superconductivity*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Paul, W., Lakner, M., Rhyner, J., Unternahrer, P., Baumann, T., Chen, M., . . . Guérig, A. (1997). Test of 1.2 MVA high-T<sub>c</sub> superconducting fault current limiter. *Supercond. Sci. Technol.* 10, 914-918.
- Pina, J. M. (2010). *Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Ph. D. Thesis. Universidade Nova de Lisboa.
- Poole, C. (2000). *Handbook of Superconductivity*. Academic Press.
- Pronto, A. (2011). *Análise de Perdas em Sistemas de Energia que Empregam Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Ph. D. Thesis. Universidade Nova de Lisboa.
- Sass, F. (2011). *Mancais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração*. M. Sc. Thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Schaffer, J. (2000). Tiggered Current Limiters for Crossing Bus Ties Bypassing Reactors and Improving Power Quality. *System Protection Divisiona, G&W Electric Company*.
- Schmitt, H. (2003). *Fault Current Limiters*. Report on the Activities of CIGRE WG A3.10, Siemens AG.
- Sheahen, T. (2002). *Introduction to High Temperature Superconductivity*. Kluwer Academic Publishers.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Chubraeva, L., & Vajda, I. (2010). An improved design of an inductive fault current limiter based on a superconducting cylinder. *Superconductor Science and Technology*. IOP Publishing.

- Sotelo, G. (2007). *Modelagem de supercondutores aplicada ao projeto de mancais magnéticos*. Ph. D. Thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Stavrev, S. (2002). *Modelling of High Temperature Superconductors for AC Power Applications*. Ph. D. Thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Tleis, N. (2008). *Power Systems Modelling and Fault Analysis - Theory and Practice*. Newnes.
- Willén, D. W., & Cave, J. R. (1995). Short circuit test performance of inductive high T<sub>c</sub> superconducting fault current limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 5, 2, pp. 1047-1050.
- Yamaguchi, H., & Kataoka, T. (2008). Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter With Shunt Impedance and Inductive Load. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18, 2, pp. 668-671.
- Zong, X. H., Wang, J. X., Sun, J., & Wang, Y. N. (2003). Study on inductive high-T<sub>c</sub> superconducting fault current limiters. *Physica C: Superconductivity*, 386, pp. 522-526.



## Referências Iconográficas

- Figura 2.1 Adaptado da imagem original de Kamerlingh Onnes
- Figura 2.2 Adaptado de (Marouchkine, 2004)
- Figura 2.3 Original do autor
- Figura 2.4 Adaptado de (Stavrev, 2002)
- Figura 2.5 Original do autor
- Figura 2.6 Original do autor
- Figura 2.7 Original do autor
- Figura 2.8 Adaptado de (Lima, 2005)
- Figura 2.9 Original do autor
- Figura 2.10 Adaptado de (Sotelo, 2007)
- Figura 2.11 Original do autor
- Figura 2.12 a) Retirado de <http://www.can-superconductors.com/products/tubes-for-current-limiters/>. Último acesso em 8 de março de 2012
- Figura 2.12 b) Retirado de <http://shop.can-superconductors.com/8-levitation-disks/>. Último acesso em 8 de março de 2012
- Figura 2.13 a) Retirado de [http://www.innost.com/products\\_htswires.asp](http://www.innost.com/products_htswires.asp). Último acesso em 12 de abril de 2012.
- Figura 2.13 b) Retirado de <http://www.suptech.com/home.php>. Último acesso em 12 de abril de 2012
- Figura 2.14 a) Retirado de [http://www.nexans.de/eservice/Germany-en/navigate\\_-\\_211/Products.html](http://www.nexans.de/eservice/Germany-en/navigate_-_211/Products.html). Último acesso em 12 de abril de 2012
- Figura 2.14 b) Retirado de <http://www.htstriax.com/cabledesign.html>. Último acesso em 12 de abril de 2012
- Figura 2.15 Retirado de <http://www.abb.pt/product/db0003db004279/c125739900636470c1256f3c002df294.aspx?productLanguage=pt&country=PT>. Último acesso em 28 de fevereiro de 2012
- Figura 2.16 Retirado de <http://www.alstom.com/assetmanagement/DownloadAsset.aspx?ID=1b310f31-5d81-4721-85b1-4a54062b87f2&version=1c01f3c79d9340448035134404462ae71.pdf&lang=2057>. Último acesso em 1 de março de 2012
- Figura 2.17 Adaptado de (Kozak & Janowski, 2003)
- Figura 2.18 Retirado de <http://www.nexans.de>. Último acesso em 23 de março de 2012
- Figura 2.19 Retirado de (Noe, Hobl, Tixador, Martini, & Dutoit, 2012)
- Figura 2.20 Retirado de (Paul, et al., 1997)
- Figura 2.21 Retirado de (Kado, et al., 2005)
- Figura 2.22 Retirado de <http://www.prizz.fi/linkkitiedosto.aspx?taso=2&id=584&sid=1112>.

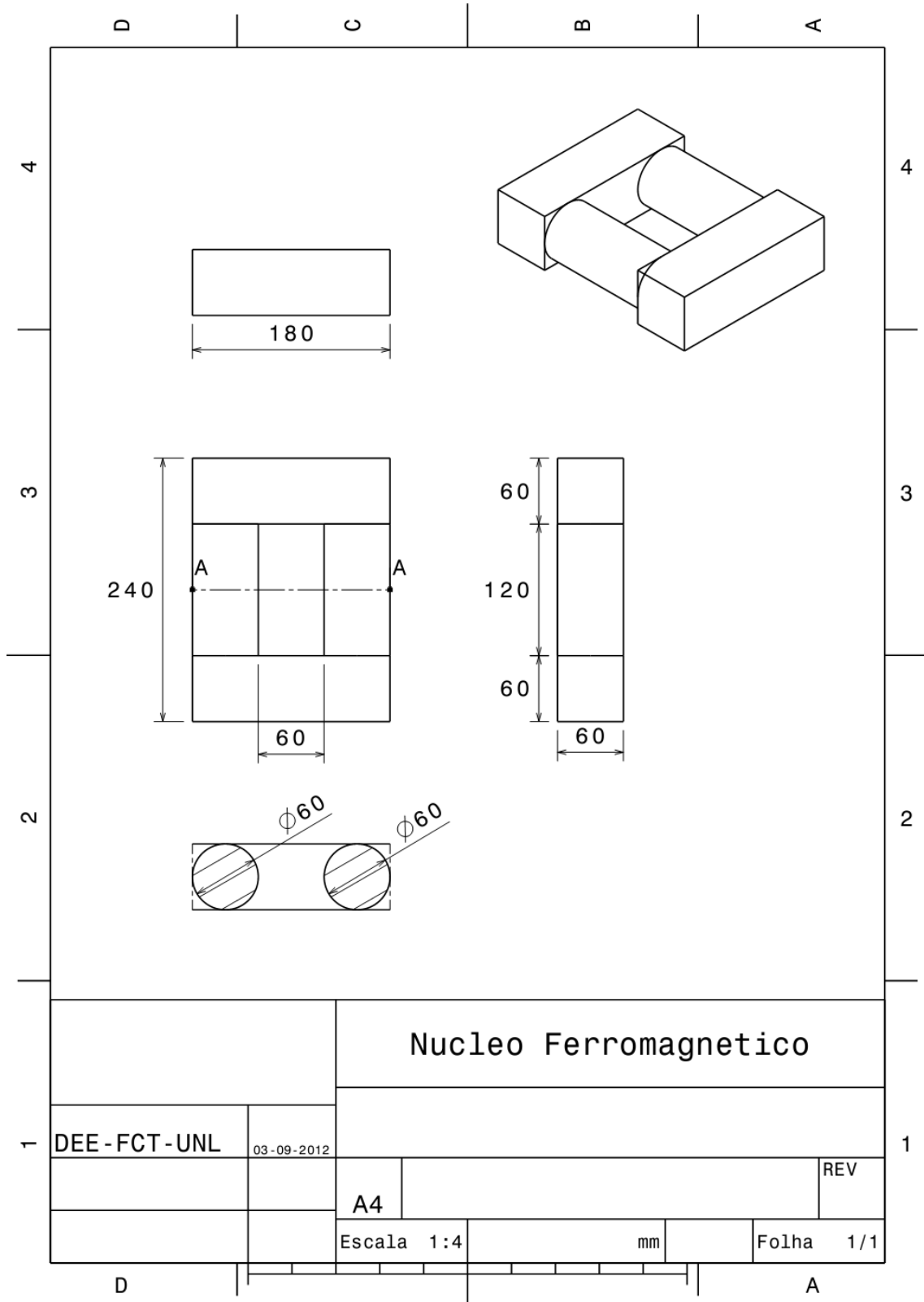
Último acesso em 10 de setembro de 2012

Figura 2.23	Original do autor
Figura 2.24	Original do autor
Figura 3.1	Original do autor
Figura 3.2	Original do autor
Figura 3.3	Original do autor
Figura 3.4	Original do autor
Figura 3.5	Retirado de <a href="http://www.ni.com/white-paper/6208/en">http://www.ni.com/white-paper/6208/en</a> Último acesso em 03 de setembro de 2012
Figura 3.6	Original do autor
Figura 3.7	Original do autor
Figura 3.8	Cedido por Nuno Vilhena
Figura 3.9	Original do autor
Figura 3.10	Original do autor
Figura 3.11	Original do autor
Figura 3.12	Original do autor
Figura 3.13	Original do autor
Figura 3.14	Original do autor
Figura 4.1	Adaptado de (Pronto, 2011)
Figura 4.2	Original do autor
Figura 4.3	Original do autor
Figura 4.4	Adaptado de (Pronto, 2011)
Figura 4.5	Original do autor
Figura 4.6	Original do autor
Figura 4.7	Original do autor
Figura 4.8	Original do autor
Figura 4.9	Original do autor
Figura 4.10	Original do autor
Figura 4.11	Original do autor
Figura 4.12	Original do autor
Figura 4.13	Original do autor
Figura 4.14	Original do autor
Figura 4.15	Original do autor
Figura 4.16	Original do autor
Figura 4.17	Original do autor
Figura 4.18	Original do autor
Figura 4.19	Original do autor
Figura 4.20	Original do autor
Figura 4.21	Original do autor

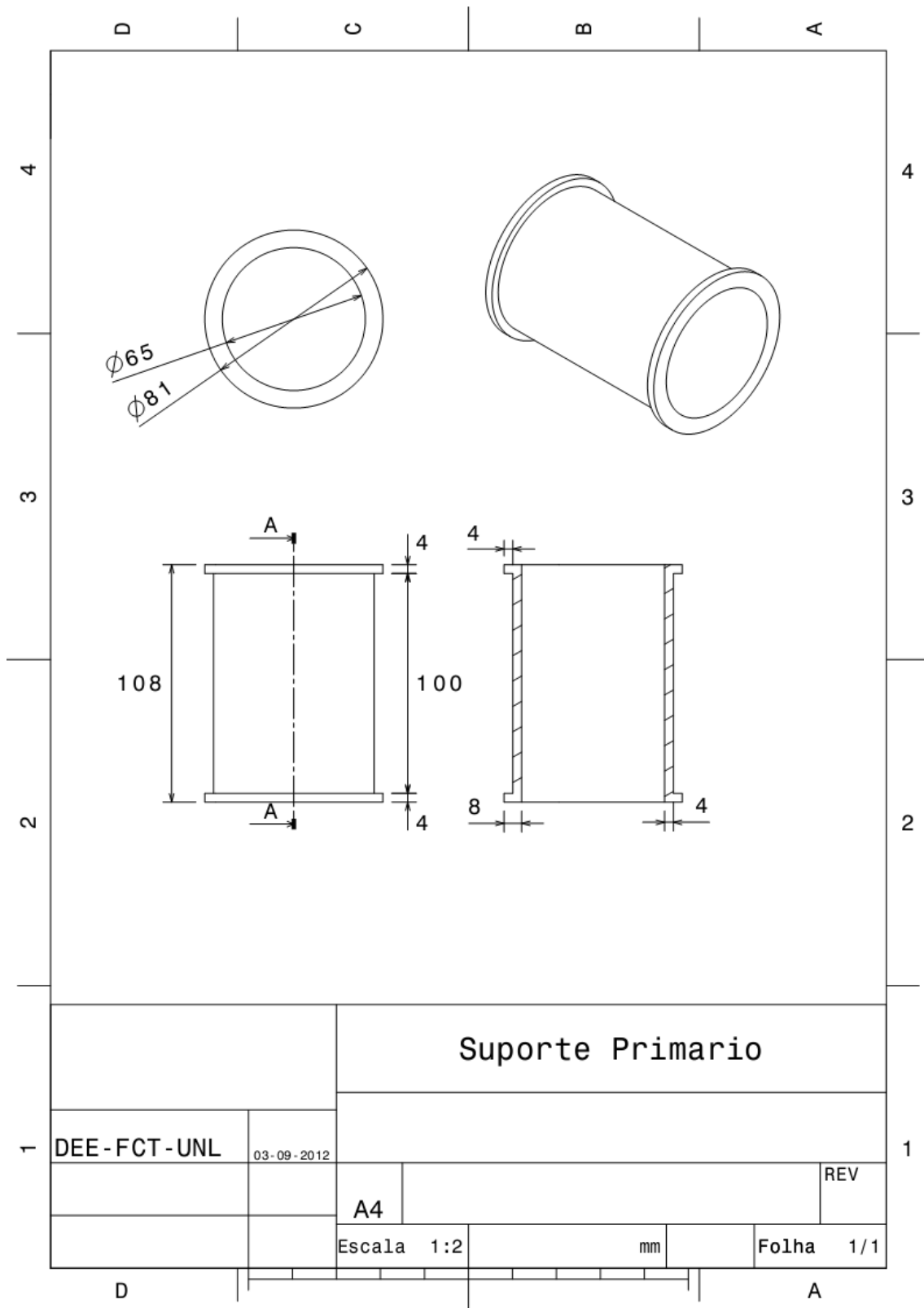
# Apêndices

## Apêndice 1 – Desenho Técnico

### Apêndice 1.1 – Núcleo Ferromagnético

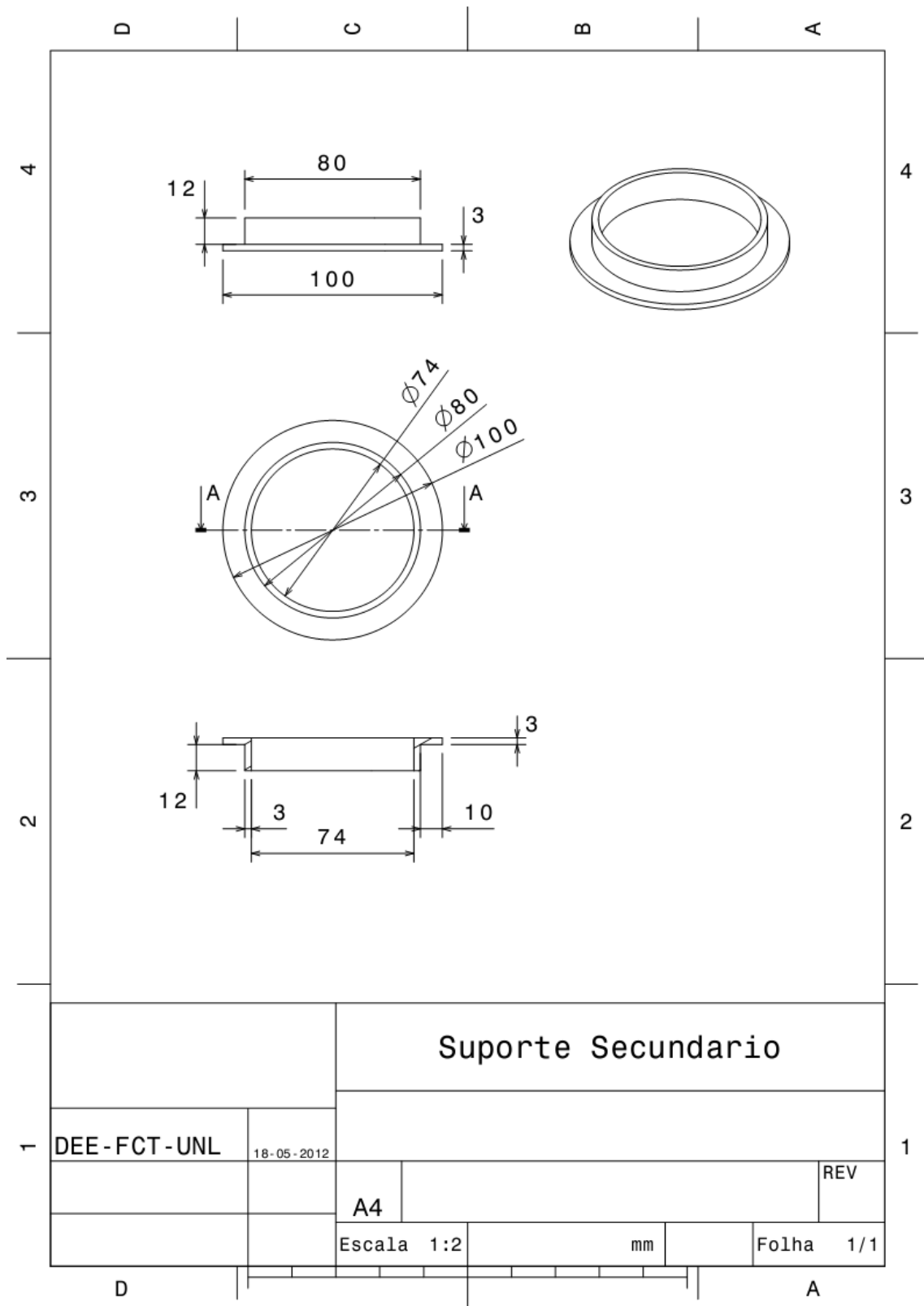


## Apêndice 1.2 – Suporte do Primário

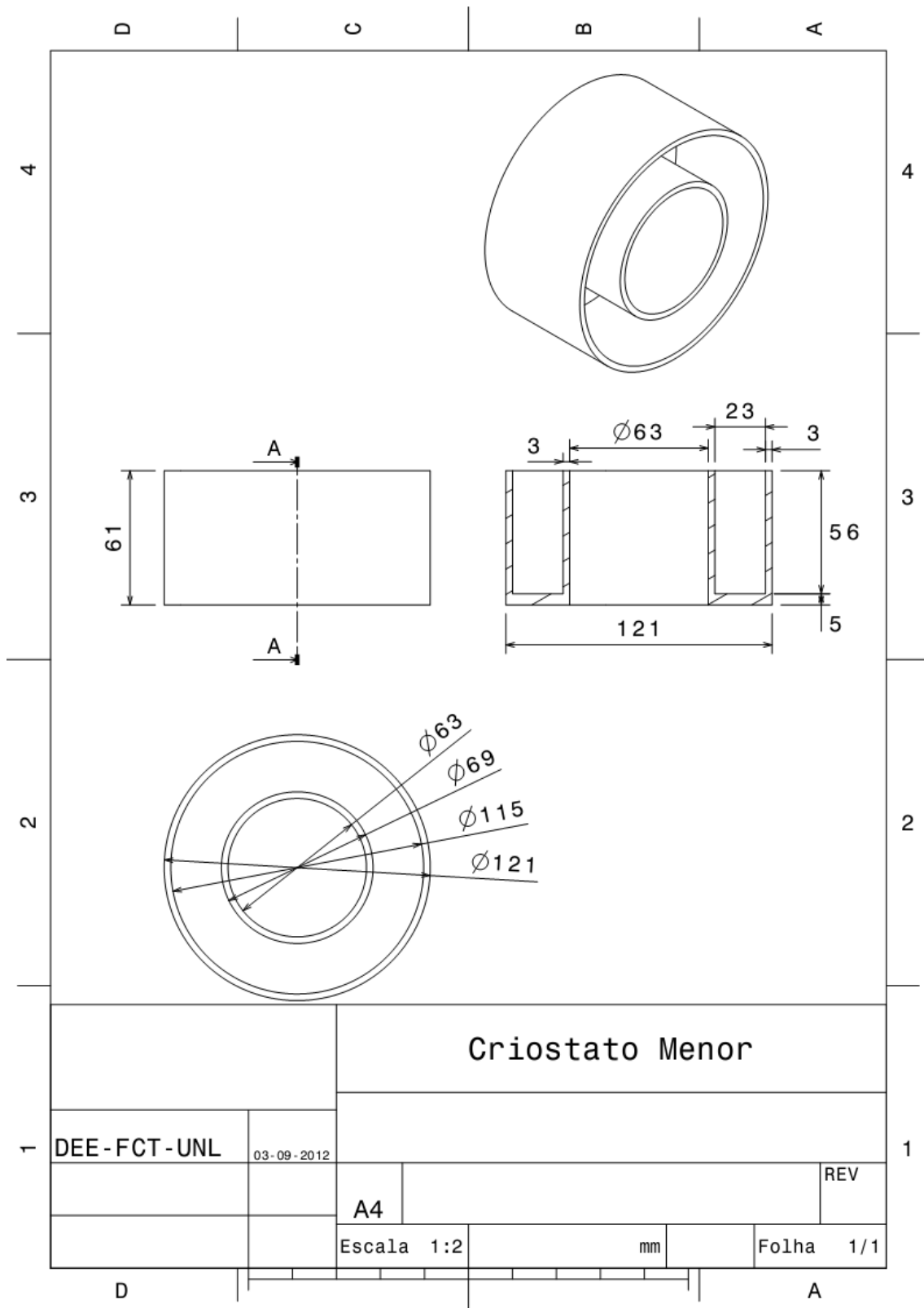




### Apêndice 1.3 – Suporte do Secundário



## Apêndice 1.4 – Crióstato Menor



### Apêndice 1.5 – Criostato Maior

