



Pedro Miguel Monsanto Barroso

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores

Projeto, Ensaio e Comparação de Limitadores de Corrente Supercondutores Trifásicos Indutivos

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

Orientador: João Miguel Murta Pina, Prof. Doutor, FCT/UNL

Co-orientador: Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, Prof. Doutora, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rui Manuel
Leitão Santos Tavares-
FCT/UNL

Arguente: Prof. Doutor Pedro Miguel
Ribeiro Pereira – FCT/UNL

Vogal: Prof. Doutor João Miguel
Murta Pina – FCT/UNL

Projeto, Ensaio e Comparação de Limitadores de Corrente Supercondutores Trifásicos Indutivos Copyright © Pedro Miguel Monsanto Barroso, 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 Henrique

À Ana

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer aos meus orientadores, Professor João Murta Pina e Professora Anabela Pronto pela introdução ao tema da supercondutividade e pela oportunidade de poder realizar um tema motivante, pela sua disponibilidade em ajudar e pelo conhecimento transmitido durante a elaboração desta dissertação.

Aos professores do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade Nova de Lisboa pela aprendizagem de conceitos e de conhecimento que me permitiram terminar a dissertação e aplica-los no futuro.

Aos meus colegas de laboratório, Pedro Arsénio, Nuno Vilhena e Nuno Amaro que sempre mostraram disponibilidade para ajudar, aconselhar nos momentos com maior stress e pela sua imensa paciência. Pelos momentos descontraídos que permitiram desviar a atenção do trabalho quando era necessário.

Aos meus pais pelo imenso sacrifício, apoio dado e pelos seus conselhos que me permitiram ultrapassar os obstáculos ao longo dos anos.

À Ana pelo seu infinito apoio nos melhores e nos piores momentos, pelo sacrifício da minha ausência durante muitos dias e pela motivação que me deu diariamente.

Aos meus amigos e colegas que durante estes anos sempre estiveram comigo, pelos bons tempos e pelos tempos mais difíceis.

Sumário

O aumento progressivo da rede elétrica e sua complexidade, devido essencialmente à geração distribuída renovável provoca um maior número de correntes de curto-circuito e com maior intensidade. A maioria das soluções atuais que lidam com esta situação, com agravamento progressivo rapidamente se encontram subdimensionadas, tais como disjuntores e fusíveis, devido ao aumento de carga. A divisão de barramentos e construção de novas subestações são as opções que poderão ser tecnicamente mais vantajosas, no entanto, o seu custo é extremamente elevado.

A tecnologia da supercondutividade permite que os limitadores de corrente supercondutores tenham vantagens relativamente às soluções existentes. Em regime de funcionamento normal, a impedância destes dispositivos é desprezável do ponto de vista da rede. Após a ocorrência de uma falha na rede, o limitador de corrente supercondutor tem a capacidade de limitar a corrente de curto-circuito no primeiro ciclo. Estas características aproximam-se do dispositivo ideal para lidar com defeitos na rede.

Nesta dissertação procede-se à aplicação de uma metodologia de dimensionamento de um limitador de corrente supercondutor do tipo transformador, à sua construção e ensaio em laboratório. Foram aplicadas duas topologias do limitador preparado para funcionar num sistema trifásico. O objetivo é prever, estudar o seu comportamento e comparação entre as duas topologias.

Termos Chave:

Supercondutividade

Limitador de corrente supercondutor trifásico

Correntes de curto-circuito

Redes de energia elétrica

Abstract

The gradual increase and complexity of the power system, related essentially to the expansion of the renewable generation that induces a great number of short circuits and its intensity. The majority of the current solutions that deals with this situation, with gradual intensification quickly finds under dimensioned, such as circuit breakers and fuses, due to increasing load. The bus division and construction of new power substations are the options that could technically be more advantageous, however its cost is extremely high.

The technology of the superconductivity allows that the superconducting limiters have advantages over the existing solutions. In normal operation, these devices are negligible in the power network. In fault regime, the superconducting limiter has the capability to limit the short circuit in the first cycle. These characteristics come close to the ideal device for handling faults in the powergrid.

This dissertation proceeds to the application of a from a design methodology of a superconducting limiter, to its construction and testing in laboratory. Two topologies of the limiter had been applied to work in a three-phase system. The main objective is to predict, study their behavior and comparison between the two topologies.

Keywords:

Superconductivity

Three-phase superconducting fault current limiter

Short circuit current

Powergrid

Índice de Matérias

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objectivos.....	1
1.3	Organização da dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Contexto Histórico da Supercondutividade	5
2.2	Propriedades dos Supercondutores.....	7
2.2.1	Resistividade Nula	7
2.2.2	Diamagnetismo Perfeito	8
2.2.3	Espaço de fases T-J-H	9
2.3	Tipos de Supercondutores.....	10
2.3.1	Supercondutores do tipo I	10
2.3.2	Supercondutores do tipo II	11
2.4	Modelização de Supercondutores.....	12
2.4.1	Modelos de Estado Crítico	12
2.4.2	Lei da Potência E-J	12
2.5	Formas Físicas dos Supercondutores.....	12
2.5.1	Blocos Maciços.....	13
2.5.2	Fitas	14
2.6	Defeitos na Rede Eléctrica	15
2.6.1	Curto-Circuitos Simétricos.....	16
2.6.2	Curto-Circuitos Assimétricos	18
2.6.2.1	Falha Fase-Terra	18
2.6.2.2	Falha Fase-Fase	19
2.6.2.3	Falha Fase-Fase-Terra	20

2.7	Estado da Arte	21
2.7.1	Soluções Convencionais para a Limitação de Correntes de Curto-Circuito	23
2.7.2	Limitadores de Corrente Supercondutores	25
2.7.2.1	Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo	26
2.7.2.2	Limitador de Corrente Supercondutor Indutivo do Tipo Transformador	27
2.7.2.3	Modelização do LCS Indutivo do Tipo Transformador	30
2.7.2.4	Limitador de Corrente Supercondutor Indutivo de Núcleos Saturados	31
2.7.2.5	Limitador de Corrente Supercondutor Retificador	32
2.8	Síntese	33
3	METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DO LIMITADOR	35
3.1	Introdução	35
3.2	Requisitos Necessários	36
3.3	Cálculo dos Enrolamentos	36
3.3.1	Dimensionamento do Enrolamento Primário.....	36
3.3.2	Dimensionamento do Enrolamento Secundário	37
3.4	Dimensionamento do Núcleo	37
3.4.1	Coeficiente de Utilização da Janela	37
3.4.1.1	Isolamento dos condutores.....	38
3.4.1.2	Factor de Preenchimento.....	38
3.4.1.3	Coeficiente de Área Efectiva da Janela	39
3.4.1.4	Factor de isolamento.....	39
3.4.2	Dimensões da Janela	39
3.4.3	Secção.....	40
3.4.4	Construção do Ciclo Máximo de Histerese	43
3.5	Síntese	43
4	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	45
4.1	Introdução	45

4.2	Núcleo	45
4.3	Enrolamento Primário.....	47
4.4	Enrolamento Secundário.....	47
4.5	Crióstato	49
4.6	Placa de Aquisição de Dados	50
4.7	Ciclo Máximo de histerese	52
4.8	Síntese.....	53
5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	55
5.1	Correntes de Curto-Circuito Presumidas	56
5.1.1	Curto-Circuito Fase-Terra.....	56
5.1.2	Curto-Circuito Fase-Fase	57
5.1.3	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra	58
5.1.4	Curto-Circuito Trifásico	58
5.2	Procedimento Experimental	59
5.3	Resultados Obtidos	60
5.3.1	Falha Fase-Terra	61
5.3.2	Falha Fase-Fase.....	62
5.3.3	Falha Fase-Fase-Terra.....	64
5.3.4	Falha Trifásica	66
5.4	Análise de Resultados.....	68
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	73
6.1	Conclusões.....	73
6.2	Trabalhos Futuros.....	74
	BIBLIOGRAFIA.....	75
	ANEXOS.....	77

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Valores medidos por Onnes que indicam o decréscimo repentino da resistência.	5
Figura 2.2 - Comparação de comportamento em ACN e APC de um cilindro supercondutor de um cilindro condutor perfeito.	9
Figura 2.3 - Figura exemplificativa de como poderá ser espaço de estados T-J-H de um supercondutor.	10
Figura 2.4 - Gráfico que demonstra a magnetização de um supercondutor do tipo I em função do campo magnético aplicado.	11
Figura 2.5 - Gráfico que demonstra a magnetização de um supercondutor do tipo II em função do campo magnético aplicado.	11
Figura 2.6 - Blocos maciços de supercondutores da CAN superconductors. a) Cilindro supercondutor em Bi-2223. b) Clindro de Bi-2223 usado para condutores de corrente. c) Bloco maciço usado para levitação magnética.	13
Figura 2.7 - Bloco maciço a levitar um magneto permanente.	14
Figura 2.8 - a) Exemplo de fita supercondutora de 1G da InnoST. b) Exemplo de fita supercondutora 2G da Suptech.	14
Figura 2.9 - Descrição da fita 2G por camada da Superpower.	15
Figura 2.10 - Exemplo de um cabo supercondutor da Suptech. Adaptado de Suptech.	15
Figura 2.11 - Rede com três barramentos	16
Figura 2.12 – Esquema equivalente monofásico da rede de três barramentos	17
Figura 2.13 - Esquema reduzido final, equivalente de Thévenin da rede vista a partir do barramento 3.	17
Figura 2.14 - Curto-circuito fase-terra aos terminais de um gerador.	18
Figura 2.15 - Esquema de ligações de curto-circuito fase-terra	19
Figura 2.16 - Curto-circuito fase-fase.	19
Figura 2.17 - Esquema de ligações para o curto-circuito fase-fase.	20
Figura 2.18 - Curto-circuito fase-fase-terra.	20
Figura 2.19 - Esquema de ligações para o curto-circuito fase-fase-terra por fase.	21
Figura 2.20 - Locais de instalação de limitadores de corrente.	22
Figura 2.21 - Diagrama de correntes no SEE.	23
Figura 2.22 - a) Bobine com núcleo de ar da Trench.	24
Figura 2.23 - Diversas configurações que o LCS poderá tomar.	26

Figura 2.24 - Circuito equivalente de um LCS Resistivo.....	27
Figura 2.25 - Perspectiva frontal de duas configurações de LCS. a) LCS de blindagem magnética. b) LCS do tipo transformador com fita supercondutora.	28
Figura 2.26 - Circuito com esquema equivalente de um LCS indutivo	28
Figura 2.27 - LCS trifásico produzido pela ABB.....	29
Figura 2.28 – LCS com núcleo de ar.....	30
Figura 2.29 - Formato e características principais do ciclo máximo de histerese.	31
Figura 2.30 - Circuito com um LCS de núcleos saturados.....	32
Figura 2.31 - LCS de núcleos saturados da Zenergy Power instalada na Rede Edison, Sul da Califórnia.....	32
Figura 2.32 - Circuito com um LCS Retificador.....	33
Figura 2.33 - LS do tipo retificador.	33
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia de dimensionamento do LCS.....	35
Figura 3.2 - Forma dos enrolamentos. a) tem um coeficiente teórico de 0.785. b) tem um coeficiente teórico de 0.97.....	39
Figura 3.3 - Indica que CMM são calculados nas várias iterações.....	42
Figura 3.4 - Componentes ascendentes com variação do número de espiras do secundário.....	43
Figura 4.1 - Tipologia dos núcleos utilizados. a)Tipologia trifásica do tipo Shell. b) Tipologia trifásica tradicional	46
Figura 4.2 - Medidas horizontais e verticais da janela e colunas do núcleo ferromagnético. As unidades das medidas indicadas são mm.	46
Figura 4.3 - Enrolamentos Primários do LCSTI	47
Figura 4.4 - Enrolamento secundário onde a fita se encontra suportada numa estrutura de celeron..	48
Figura 4.5 - Representação de como é feita a junção da fita para formar uma espira.....	49
Figura 4.6 - Molde em aço inoxidável que permite colocar a fita no forno	49
Figura 4.7 - Crióstatos utilizados no protótipo.....	50
Figura 4.8 - Processo de fabrico do crióstato.....	50
Figura 4.9 - Placa de aquisição NI-6008.....	51
Figura 4.10 - Montagem substractora com amplificador operacional.....	51
Figura 4.11 - Montagem substractora com integração	52
Figura 4.12 - Implementação das montagens para o acondicionamento de sinal obtida a partir dos ensaios.	52

Figura 4.13 - Ciclo máximo de histerese calculado a partir das características do LCSTI.....	53
Figura 5.1 - Esquema de ensaio do LCSTI.....	55
Figura 5.2 - Esquema Unifilar do circuito de ligação à rede	56
Figura 5.3 - Ensaio da corrente presumida no defeito fase-terra.....	57
Figura 5.4 - Curvas das correntes de curto-circuito fase-fase	57
Figura 5.5 - Forma de onda do ensaio de correntes presumidas na falha fase-fase-terra.....	58
Figura 5.6 - Resultados do ensaio de curto-circuito trifásico	58
Figura 5.7 - Ensaio onde é obtido a corrente na linha e fluxo no núcleo ferromagnético.....	59
Figura 5.8 - Ensaio onde é obtido a tensão de fase e aos terminais do primário.....	60
Figura 5.9 - Montagem experimental de ensaio do desempenho do LCSTI	60
Figura 5.10 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito fase-terra. a) Núcleo do tipo <i>Shell</i> b) Núcleo tradicional.	61
Figura 5.11 - Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha fase-terra. a) Tipologia <i>Shell</i> . b) Tipologia tradicional.	62
Figura 5.12 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito fase-fase. a) Núcleo do tipo <i>Shell</i> b) Núcleo tradicional.	63
Figura 5.13 - Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha fase-fase. a) Tipologia <i>Shell</i> . b) Tipologia tradicional.	64
Figura 5.14 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito fase-fase- terra. a) Núcleo do tipo <i>Shell</i> b) Núcleo tradicional.	65
Figura 5.15 - Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha fase-fase-terra. a) Tipologia <i>Shell</i> . b) Tipologia tradicional.....	66
Figura 5.16 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito trifásico. a) Núcleo do tipo <i>Shell</i> b) Núcleo tradicional.	67
Figura 5.17 – Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha trifásica. a) Tipologia <i>Shell</i> . b) Tipologia tradicional.....	68
Figura 5.18 - Enrolamento secundário após os ensaios	71

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Número de interrupções acidentais registadas na rede MT, duração e origem.....	16
Tabela 2.2 - Tabela com vantagens e desvantagens das soluções tradicionais para as falhas no SEE..	25
Tabela 3.1 - Valores de coeficiente de isolamento com isolamento simples.....	38
Tabela 3.2 - Valores que o parâmetro <i>kd</i> pode tomar em função do número de degraus do núcleo..	42
Tabela 4.1 - Especificações de fita 2G fabricada pela Superpower	47
Tabela 4.2 - Especificações da placa de aquisição de dados	51
Tabela 5.1 - Resultados obtidos no LCSTI do tipo <i>shell</i>	69
Tabela 5.2 - Resultados obtidos no LCSTI tradicional	70

Simbologia

	Descrição	Unidades
α	Operador de rotação $e^{j2\pi/3}$	Adim.
β	Precisão entre duas iterações	m
$A_{crióstato}$	Área ocupada por crióstato do supercondutor	m^2
A_j	Área da janela do núcleo ferromagnético	m^2
B	Vetor densidade fluxo magnético	T
B	Densidade fluxo magnético	T
D_c	Diâmetro do condutor	m
E	Vetor campo elétrico	$V \cdot m^{-1}$
E_c	Critério de campo elétrico para definição da corrente crítica	$V \cdot m^{-1}$
fmm	Força magnetomotriz	$A \cdot e$
H	Campo magnético	$A \cdot m^{-1}$
H_c	Campo magnético crítico	$A \cdot m^{-1}$
H_{c1}	Campo magnético crítico inferior	$A \cdot m^{-1}$
H_{c2}	Campo magnético crítico superior	$A \cdot m^{-1}$
$h_{crióstato}$	Altura do crióstato do supercondutor	m
h_j	Altura da janela do núcleo ferromagnético	m
I	Corrente elétrica	A
I_a	Corrente elétrica da fase a	A
I_b	Corrente elétrica da fase b	A
I_c	Corrente elétrica crítica	A
I_{cc}	Corrente elétrica de curto-circuito	A
I_{cca}	Corrente elétrica de curto-circuito da fase a	A
I_{ccc}	Corrente elétrica de curto-circuito da fase c	A
I_d	Corrente elétrica da componente simétrica direta	A
I_h	Corrente elétrica da componente simétrica homopolar	A
I_i	Corrente elétrica da componente simétrica inversa	A
I_{inic}	Corrente elétrica para início de limitação	A

I_L	Corrente elétrica de pico da linha	A
I_p	Corrente elétrica de pico de curto-circuito	A
I_{nom}	Corrente elétrica nominal	A
I_{fm}	Corrente elétrica de curto-circuito junto a um barramento	A
I_{SAT}^*	Corrente elétrica do supercondutor	A
I_{SC}^*	Corrente elétrica crítica de fita supercondutora	A
I_3^{CC}	Corrente elétrica de curto-circuito trifásico	A
J	Densidade de corrente elétrica	$A \cdot m^{-2}$
J_c	Densidade de corrente elétrica crítica	$A \cdot m^{-2}$
J_{cu}	Densidade de corrente elétrica do cobre	$A \cdot m^{-2}$
\mathbf{J}_n	Vetor densidade de corrente elétrica normal	$A \cdot m^{-2}$
\mathbf{J}_s	Vetor densidade de corrente elétrica supercondutora	$A \cdot m^{-2}$
K_u	Coefficiente de utilização de janela	Adim.
L_{fita}	Largura da fita supercondutora	m
l_j	Largura da janela do núcleo ferromagnético	m
l_m	Caminho médio magnético	m
\mathbf{M}	Vetor magnetização	$A \cdot m^{-1}$
N_p	Número de espiras do primário	Adim.
N_s	Número de espiras do secundário	Adim.
N_{cu}	Número de camadas de condutor no primário	Adim.
R	Resistência elétrica	Ω
R_L	Resistência elétrica de linha	Ω
R_c	Resistência elétrica de carga	Ω
R_m	Raio da coluna do núcleo ferromagnético	m
r_{int}	Raio interior do crióstato do supercondutor	m
r_{ext}	Raio exterior do crióstato do supercondutor	m
S_1	Coefficiente de isolamento do condutor	Adim.
S_2	Fator de preenchimento	Adim.
S_3	Coefficiente de área efetiva de uso da janela	Adim.

S_4	Coeficiente Isolamento de enrolamentos múltiplos	Adim.
S_m	Secção da coluna do núcleo ferromagnético	m^2
S_p	Secção do condutor do primário	m^2
T_c	Temperatura crítica	K
U^0	Tensão elétrica pré-defeito	V
U_a	Tensão elétrica da fase a	V
U_b	Tensão elétrica da fase b	V
U_c	Tensão elétrica da fase c	V
U_e	Tensão elétrica por espira	V
U_{fonte}	Tensão elétrica gerada em uma fase	V
U_{LCS}	Tensão elétrica aos terminais do primário	V
U_s	Tensão simples	V
u_o	Tensão de saída das montagens com amplificadores operacionais	V
μ_0	Permeabilidade magnética do vázuo ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$)	$H \cdot m^{-1}$
ω	Frequência	$rad \cdot s^{-1}$
χ_m	Suscetibilidade magnética	Adim.
Z_d	Impedância da componente simétrica direta	Ω
Z_{def}	Impedância equivalente de defeito	Ω
Z_h	Impedância da componente simétrica homopolar	Ω
Z_i	Impedância da componente simétrica inversa	Ω
Z_{THV}	Impedância equivalente de Thévenin	Ω
σ_n	Condutividade elétrica	$S \cdot m/mm^2$
ψ_0	Fluxo ligado com o primário	Wb
ψ_{LCS}	Fluxo ligado do limitador	Wb

Notações

1G	Fita supercondutora de primeira geração
2G	Fita supercondutora de segunda geração
ACN	Arrefecimento em campo magnético nulo
APC	Arrefecimento na presença de campo magnético
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
AC	<i>Alternating current</i>
DC	<i>Direct current</i>
AT	Alta tensão (entre 45 kV e 110 kV)
MT	Média tensão (entre 1 kV e 45 kV)
BT	Baixa tensão (abaixo de 1 kV)
CC	Curto-circuito
CMM	Caminho médio magnético
BSCCO	<i>Bismuth strontium calcium copper oxide</i>
YBCO	<i>Yttrium barium copper oxide</i>
(RE)BCO	<i>Rare earth barium copper oxide</i>
LCCC	Limitador de corrente de curto-circuito
LCS	Limitador de corrente supercondutor
LCSTI	Limitador de corrente supercondutor trifásico indutivo
Pb	Elemento Chumbo
SAT	Supercondutor de alta temperatura
SEE	Sistema de energia elétrica
Ta	Elemento Tântalo
Bi-2223	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$
Y-123	YBCO na sua fase supercondutora
PAD	Placa de aquisição de dados
NI	<i>National Instruments</i>
XPS	Plástico do tipo poliestireno estruído
FMM	Força magnetomotriz

1 Introdução

1.1 Motivação

O desenvolvimento do mundo contemporâneo aumenta a dependência da energia elétrica, aumentando o seu consumo. O aumento da produção de energia renovável cria pontos de injeção nos mais variados locais da rede de distribuição de energia, chamada geração distribuída. Estes pontos injetores encontram-se diretamente ligados à rede de alta tensão (AT) e à rede de média tensão (MT), tornando o trânsito de energia nestes sistemas mais complexa e de forma crescente. O aumento da carga e da sua concentração pode gerar sobrecargas em linhas aéreas e cabos subterrâneos, sendo mais um contributo para o aumento da complexidade das redes atuais.

Os defeitos que acontecem na rede de distribuição moderna têm maior frequência e maior intensidade. Esta situação tende a danificar os vários equipamentos instalados na rede provocando avarias com maior intensidade e de forma regular. A reparação ou aquisição de novos equipamentos frequentemente, torna a gestão da rede de distribuição uma tarefa muito difícil. Algumas das proteções atuais são eficazes para eliminar as falhas, no entanto, é sempre necessário o corte de energia aos seus utilizadores, enquanto outras opções são demasiado dispendiosas e demoradas na sua instalação, tais como a construção de novas subestações.

Os limitadores de corrente de curto-circuito são dispositivos que permitem reduzir as correntes que aumentam de forma abrupta nas linhas que sofrem falhas. Os dispositivos atuais que permitem limitar as correntes de curto-circuito (CC) em regime de funcionamento normal têm elevadas perdas na rede. Em regime de falha, a sua limitação é reduzida, pois estes dispositivos limitam apenas as correntes homopolares de terra e após o defeito. Após a falha, os dispositivos atuais de limitação necessitam de tempo de recuperação para estar novamente aptos para limitar correntes de CC.

Uma nova tecnologia que surgiu no início do século XX, a supercondutividade, permitiu o desenvolvimento de várias aplicações. Os limitadores de corrente supercondutores (LCS) são dispositivos que estão em série com a linha. Em regime normal de funcionamento são invisíveis na rede, ou seja, a sua impedância é baixa tendo perdas reduzidas ou desprezáveis. Em regime de falha, têm uma forte capacidade de limitação das correntes de CC no primeiro ciclo de onda e não necessitam de tempo de recuperação após o defeito.

1.2 Objetivos

O objetivo da dissertação é o projeto de um limitador de corrente trifásico indutivo de tipo transformador que será construído com um enrolamento secundário em fita supercondutora ligada em curto-circuito, com duas topologias de limitador. A construção de protótipos permite efetuar ensaios numa rede de energia à escala de laboratório, permitindo a comparação dos resultados entre as duas topologias.

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Estudo teórico do funcionamento do LCS.
- Metodologia de dimensionamento do LCS.
- Previsão do seu ciclo máximo de histerese.
- Execução de ensaios laboratoriais de modo a obter dados relativos aos comportamentos do LCS.
- Análise e comparação dos ensaios laboratoriais.
- Análise do desempenho na generalidade do LCS ensaiado.

1.3 Organização da dissertação

Os sete capítulos que organizam esta dissertação estão dispostos da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução

O capítulo permite enquadrar a motivação da dissertação, indicando os seus objetivos e sua organização.

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Na revisão bibliográfica, descreve-se o desenvolvimento das tecnologias baseadas em materiais supercondutores desde a sua descoberta. Enuncia as principais propriedades deste tipo de materiais e as suas potenciais aplicações. É feita uma revisão dos conceitos de defeitos na rede e apura-se a forma como são calculados as correntes de curto-circuito das redes de energia.

Os variados tipos de LCCC (limitadores de correntes de curto-circuito) são descritos, desde das soluções convencionais até aos limitadores de correntes supercondutores. Faz-se uma breve descrição, aplicação e são dados exemplos de implementação.

- Capítulo 3: Metodologia de dimensionamento do núcleo

Neste capítulo, descreve-se de que forma é projetado o limitador possibilitando calcular as dimensões, elementos e previsão do seu comportamento através do cálculo do ciclo máximo de histerese.

- Capítulo 4: Construção do Protótipo

O fabrico dos vários elementos constituintes é descrito de forma minuciosa, enunciando os materiais pelos quais são compostos e que processos foram necessários para obter a sua forma final. São apresentados os equipamentos necessários para acondicionar a aquisição de sinal obtido dos vários ensaios experimentais.

- Capítulo 5: Procedimento Experimental, Resultados Obtidos e Discussão

Neste capítulo, é apresentada a montagem experimental, os resultados obtidos e sua consequente discussão. Os resultados são comparados entre as duas topologias utilizadas.

➤ Capítulo 6: Conclusão e Trabalho Futuro

No último capítulo, faz-se uma reflexão através dos resultados obtidos, assim como uma previsão dos trabalhos futuros que poderão ser realizados tendo em vista a melhoria da tecnologia desenvolvida.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, irá ser abordado o contexto histórico da descoberta da supercondutividade, das suas conhecidas propriedades, os tipos existentes e da sua modelização. Dado que o tema desta dissertação se insere num sistema trifásico, são revistos os tipos de falhas existentes.

2.1 Contexto Histórico da Supercondutividade

Após alcançar o seu objetivo de obter hélio líquido em 1908, o físico Heike Kamelingh Onnes ao estudar as propriedades da resistividade dos materiais a baixas temperaturas em 1911, verificou numa amostra de mercúrio em forma de tubos capilares, que à temperatura de ebulição do hélio (4.2K) a resistência da amostra desaparecia de forma abrupta tal como é demonstrada na Figura 2.1, onde o eixo das ordenadas se tem como grandeza a resistência elétrica, cuja unidade é o Ohm (Ω) e no eixo das abcissas encontra-se representada a temperatura na qual a unidade é o Kelvin (K).

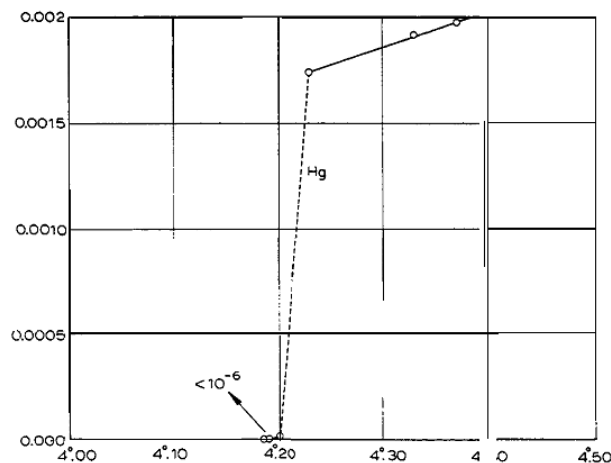


Figura 2.1 - Valores medidos por Onnes que indicam o decréscimo repentino da resistência. Retirado de (Onnes, 1913)

Heike Onnes afirmou que tinha encontrado num novo estado físico, dado ter propriedades elétricas específicas, chamado estado de supercondutividade. Segundo o físico, o mesmo estado só aconteceria alcançando uma temperatura abaixo da temperatura crítica (T_c). Foram sendo feitas as mesmas experiências em outros materiais que permitiam alcançar o estado superconductor, tal como o chumbo (Pb) e tântalo (Ta). Posteriormente, conferiu-se que existem outros fatores que determinam o estado de supercondutividade para além da temperatura crítica (T_c) como é o caso do campo magnético crítico (H_c) e da densidade de corrente crítica (J_c).

Durante os anos seguintes, descobriram-se mais materiais, até que em 1933 Walther Meissner e Robert Ocsenfeld ao fazer uma experiência para observar o que aconteceria ao campo magnético perto de um superconductor à medida que este ia sendo arrefecido até à sua temperatura crítica, verificaram que o campo magnético era repellido quando era ultrapassada a temperatura crítica. Este efeito ficou conhecido como o efeito Meissner.

Em 1934, os físicos C. J. Gorter e H. Casimir aplicaram as propriedades de superfluido do hélio à supercondutividade, o modelo de dois fluidos que consiste em considerar a condução dos elétrons feita em duas frações, uma em estado normal e outra em estado supercondutor. Este modelo dá uma base física para a compreensão da supercondutividade.

Para explicar o efeito Meissner a nível macroscópico, Fritz London e Heinz London, mais conhecidos como os irmãos London, criaram equações onde existe uma relação entre a corrente no supercondutor e o campo magnético e que, para além do campo magnético ser expulso, existe uma penetração de campo magnético a uma distância muito próxima da superfície.

O avanço seguinte, relativamente a uma compreensão teórica referente ao comportamento dos supercondutores veio em 1950, com Lev Davidovich Landau e Vitaly Lazarevich Ginzburg, ficando célebre como a teoria de Ginzburg-Landau. A sua abordagem baseou-se num modelo já concebido por Landau, onde não existem os portadores supercondutores acima da temperatura crítica, mas sim abaixo da temperatura crítica.

A teoria BCS proposta por Jonh Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer em 1957, tenta explicar a supercondutividade a nível microscópico, em que os pares de Cooper são a base desta teoria. Os pares de Cooper são formados por pares de elétrons em maior número num supercondutor, onde os dois elétrons se encontram presos e deslizam através do supercondutor e cujo efeito resistivo, que se verifica num condutor dito normal, não afeta a condução num supercondutor. Esta teoria faz com que os seus preponentes ganhem o prémio Nobel da Física em 1972.

Brian Josephson, em 1962, previu que entre dois supercondutores separados com uma barreira dielétrica muito fina ou outro material que não seja supercondutor, existe nessa camada uma corrente espontânea que está diretamente relacionada com a diferença de valores dos dois supercondutores. Este fenómeno tem como designação Efeito de Josephson que foi comprovado experimentalmente por Philip Anderson e Jonh Rowell em 1963.

Em 1986, dois cientistas europeus conseguiram ultrapassar de forma notável a barreira de temperatura crítica que existia relativamente aos materiais estudados até à data que seria de 23.2 K. Georg Bednorz e Alex Müller, no laboratório de investigação da IBM em Zurique, encontraram um material que excedia a temperatura crítica dos 30 K, que se encontrava na classe dos materiais cerâmicos mais especificamente óxidos de cobre. Estes materiais seriam chamados de supercondutores de alta temperatura (SAT). Não seria de esperar que estes compostos cerâmicos seriam supercondutores de alta temperatura dado no seu estado normal serem dielétricos. Desde desta descoberta, têm sido divulgados novos supercondutores com temperaturas críticas mais elevadas, tais como BSCCO e YBCO que entram no estado supercondutor em temperaturas acima da temperatura de ebulição do azoto (77 K). Esta descoberta permitiu que a supercondutividade pudesse ter aplicações comerciais. Tais temperaturas críticas criaram dúvidas nas teorias convencionais, tais como a teoria BCS, que só seria aplicável à temperatura dos supercondutores convencionais (Blundell, 2009). O prémio Nobel da Física foi atribuído a Bednorz e a Müller em 1987.

2.2 Propriedades dos Supercondutores

Para compreender as aplicações da supercondutividade, é necessário verificar algumas propriedades macroscópicas dos supercondutores. Para além da resistividade nula, a característica mais evidente que está na origem da descoberta da supercondutividade, interessa também estudar o diamagnetismo perfeito conhecido como efeito de Meissner como fonte principal do interesse da realização desta dissertação. Como já indicado anteriormente, não é apenas a temperatura que influencia o estado de supercondutividade, mas também o campo magnético (H) e a densidade de corrente (J). Iremos verificar de que forma é que estas grandezas se relacionam e que implicações terão.

2.2.1 Resistividade Nula

Esta propriedade macroscópica, descoberta por Onnes, acontece quando o material supercondutor é arrefecido abaixo de uma dada T_c . A resistividade do material decresce tendo uma transição brusca. Esta situação pode ser explicada pela teoria dos dois fluidos, onde temos o supercondutor composto por eletrões supercondutores e eletrões em estado normal. O comportamento dos eletrões é explicado a nível microscópico pela teoria BCS. Os pares de Cooper têm uma ligação estável entre si, mas fraca e onde uma pequena interação entre eletrões teria um menor custo energético para dois eletrões formarem um par. Existindo num supercondutor uma harmonia entre a rede cristalina e o par de Cooper, faz com que não existam colisões entre os eletrões e a rede cristalina do material. Nos eletrões de estado normal existe uma J , que obedece à lei de Ohm. Em corrente contínua (DC) não existindo campo elétrico (E) não existe J . Tal como se pode verificar na expressão seguinte:

$$J_n = \sigma_n E \quad (2.1)$$

Em corrente alternada (AC) existe campo elétrico e, portanto, existem correntes obedecendo à Lei de Ohm e tendo assim perdas de Joule.

Para verificar a resistividade nula num supercondutor, é necessário fazê-lo pela densidade de fluxo magnético (B) de um anel fechado de forma a medir correntes persistentes. A resistência nula implicaria que a corrente permanecesse no anel indefinidamente. Verificou-se experimentalmente que não existia decaimento de corrente durante largos períodos de tempo. Existem medições experimentais que indicam resistência elétrica num supercondutor na ordem de $10^{-22} \Omega\text{cm}$ (Sarangi & Chockalingam, 2005).

2.2.2 Diamagnetismo Perfeito

O diamagnetismo perfeito, no caso específico da supercondutividade, tem como nome Efeito de Meissner. Esta propriedade indica que a suscetibilidade magnética (χ_m) é $\chi_m = -1$. Indicando que não existe \mathbf{B} , pois a magnetização (\mathbf{M}) é o inverso no campo \mathbf{H} como se pode verificar na expressões (2.2), (2.3) e (2.4).

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}(1 + \chi_m) \quad (2.2)$$

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

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

Quando é aplicado um campo \mathbf{B} , as suas linhas contornam o supercondutor como alternativa a trespassar o objeto.

Existem dois aspetos essenciais associados ao diamagnetismo perfeito na supercondutividade: a exclusão de fluxo e a expulsão de fluxo. Se um material for arrefecido com campo magnético nulo (ACN) abaixo da T_c e de seguida se colocar um campo magnético externo que é excluído pelo supercondutor, o campo não consegue penetrar o material. Ao nível da expulsão de fluxo, ou seja, se o material for arrefecido na presença de campo magnético (APC) alcançando temperaturas inferiores à de T_c , este irá expulsar o campo magnético do seu interior. Quer na situação ACN ou APC, após a remoção do campo, não existe fluxo remanescente no supercondutor. Num condutor perfeito, o comportamento de exclusão é idêntico ao do supercondutor, no entanto, o condutor perfeito não apresenta expulsão. Na situação APC, o condutor perfeito permite ser penetrado por campo magnético enquanto este se encontra com temperatura menor que T_c . Quando o campo é removido, há campo remanescente que circula pelo condutor perfeito. Situação que poderá ser verificada na Figura 2.2.

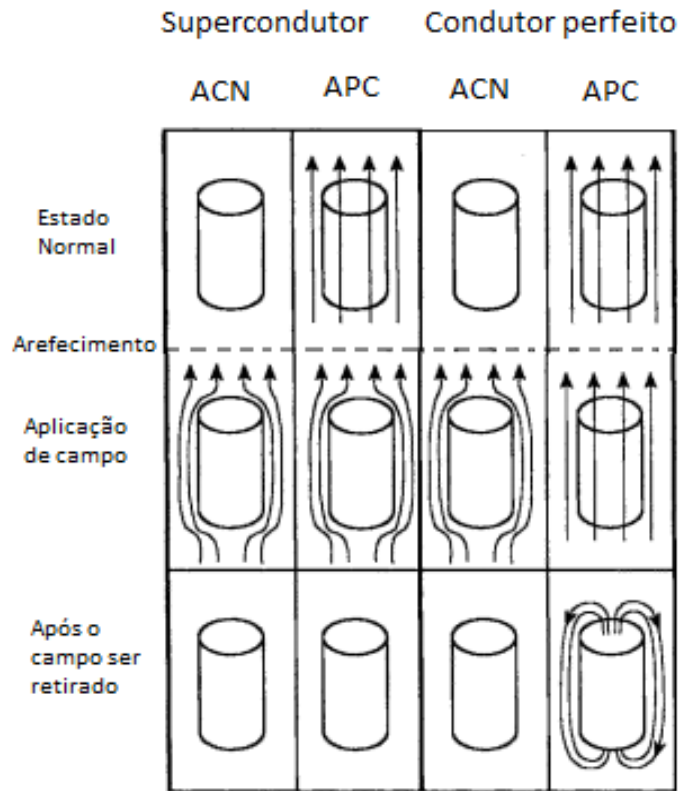


Figura 2.2 - Comparação de comportamento em ACN e APC de um cilindro supercondutor de um cilindro condutor perfeito. Adaptado de (Poole, Farach, Creswick, & Prozorov, 2007).

2.2.3 Espaço de fases T-J-H

Para além da temperatura, o supercondutor para se manter nesse estado da matéria tem outras grandezas que poderão afetar esse mesmo estado. Essas grandezas são a densidade de corrente J_c , e o campo magnético H_c . A supercondutividade perder-se-á ao ultrapassar o valor crítico de qualquer dimensão. Poderá, então dizer-se, que o estado supercondutor estará confinado a um espaço que tenha como dimensões as grandezas já referidas. Na Figura 2.3 ilustra-se como este espaço poderá existir.

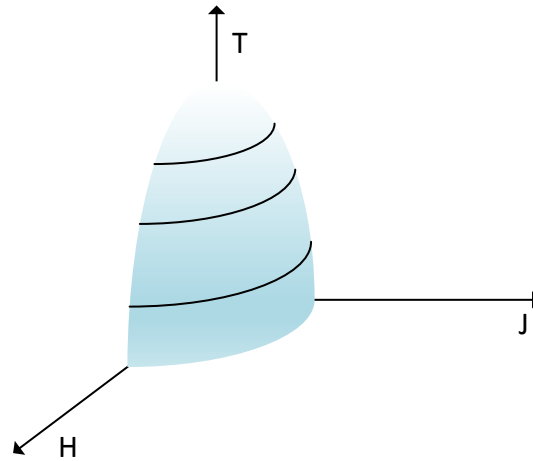


Figura 2.3 - Figura exemplificativa de como poderá ser espaço de estados T-J-H de um supercondutor.

Pode-se concluir que só existe supercondutividade no material se cumprir três condições, ou seja, se for ultrapassado J_c ou H_c ou T_c perde-se o estado supercondutor. A expressão (2.5) mostra de uma forma mais explícita as condicionantes do estado de supercondutividade.

$$\begin{cases} T < T_c \\ H < H_c \\ J < J_c \end{cases} \quad (2.5)$$

2.3 Tipos de Supercondutores

Neste subcapítulo, far-se-á uma descrição dos vários tipos de supercondutores existentes. Temos supercondutores do tipo I e II onde ambos são condutores perfeitos de corrente elétrica e no qual irá verificar-se que a sua principal diferença se encontra nas suas características magnéticas. Estes dois tipos têm uma forma diferente de transição entre o seu estado supercondutor e o seu estado normal e em que o tipo II é o grupo onde se inserem os supercondutores de alta temperatura (SAT), sendo os mais utilizados atualmente.

2.3.1 Supercondutores do tipo I

Este tipo de supercondutor é caracterizado por ter dois estados magnéticos: o estado Meissner e o estado normal. No estado Meissner, a penetração do , fluxo magnético é apenas superficial existindo assim uma blindagem magnética. Esta situação deve-se às correntes de blindagem que existem na superfície do supercondutor. Quando é atingido H_c o supercondutor deixa de ser um diamagnético perfeito, passando a ser um material paramagnético e perdendo o seu estado supercondutor de forma abrupta. Situação que se observa na Figura 2.4.

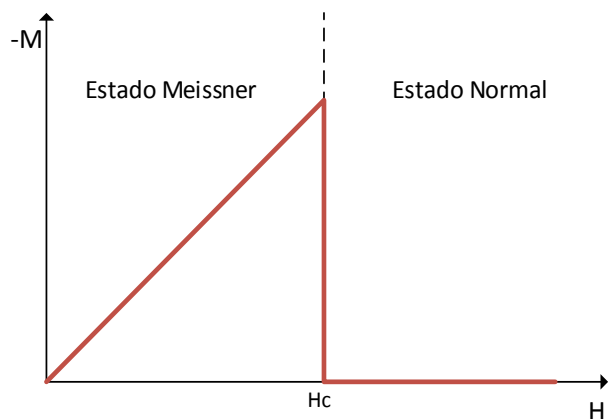


Figura 2.4 - Gráfico que demonstra a magnetização de um supercondutor do tipo I em função do campo magnético aplicado.

2.3.2 Supercondutores do tipo II

Os supercondutores do tipo II caracterizam-se por ter três estados de magnetização. À semelhança dos supercondutores do tipo I estes têm o estado Meissner e o estado normal. A principal diferença encontra-se na transição entre estes dois estados, onde temos o estado misto. As fronteiras do estado misto são os valores de dois campos magnéticos críticos, H_{c1} e H_{c2} . O supercondutor encontra-se no estado Meissner se $H < H_{c1}$ e encontra-se no estado normal se $H > H_{c2}$. No estado misto, há a perda do diamagnetismo perfeito, no entanto, a perda da magnetização do material não é tão brusca como acontece no supercondutor do tipo I, como se observa na Figura 2.5. No aumento do valor do campo magnético aplicado, o mesmo vai penetrando uniformemente o supercondutor até se tornar paramagnético, ou seja, o material volta ao estado normal.

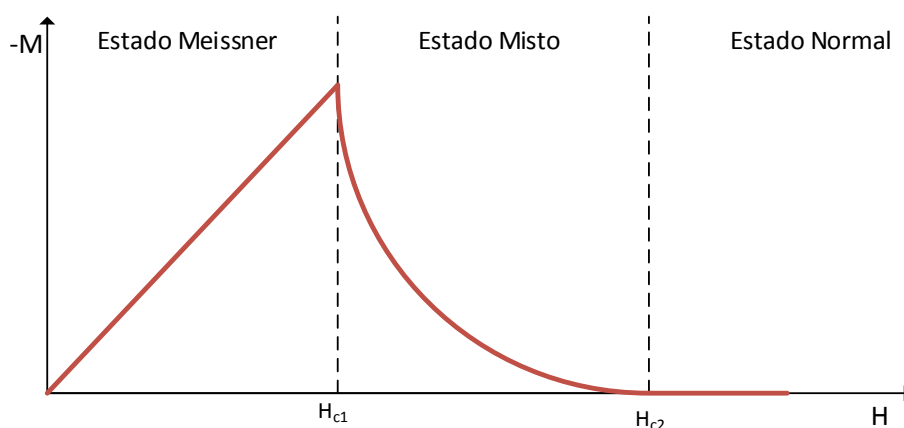


Figura 2.5 - Gráfico que demonstra a magnetização de um supercondutor do tipo II em função do campo magnético aplicado.

Os SAT incluem-se nos supercondutores do tipo II (Burns, 1992), o que para além de ter uma T_c geralmente acima da temperatura de ebulição do azoto e as características magnéticas já descritas, torna a sua aplicação apelativa. Ver-se-á mais adiante as várias formas que os SAT poderão tomar para serem usados nas mais variadas aplicações.

2.4 Modelização de Supercondutores

Para compreender melhor o comportamento dos supercondutores, nomeadamente dos SAT que se incluem nos supercondutores do tipo II, irá rever-se superficialmente alguns modelos. Entre eles, iremos abordar os modelos de estado crítico e a lei de potência E-J.

2.4.1 Modelos de Estado Crítico

Os modelos de estado crítico apenas tentam explicar o comportamento dos supercondutores de uma forma macroscópica, desvalorizando, em parte, os fenómenos microscópios da supercondutividade. Sendo que a maioria das propriedades dos supercondutores são reversíveis, outras propriedades são irreversíveis. O modelo de Bean é um modelo simples, no entanto, clarifica a penetração do campo magnético de forma progressiva num supercondutor do tipo II (Bean, 1962). Este modelo tem sido utilizado para explicar resultados experimentais e tem tido concordância com esses resultados, apesar de partir de pressupostos que não correspondem à realidade (Poole et al., 2007), assumindo que a corrente no supercondutor tem sempre o valor crítico. Existem mais modelos de estado crítico, nomeadamente o modelo de Kim (Kim, Hempstead, & Strnad, 1962).

2.4.2 Lei da Potência E-J

Nos supercondutores do tipo II, a corrente presente não é sempre a corrente crítica, no entanto, o material apresenta restividade no seu estado misto e não tem a transição abrupta que se regista nos supercondutores do tipo I.

A lei da potência é definida da seguinte forma (Brandt, 1998):

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2.6)$$

Na equação anterior, E_c é o campo elétrico quando é atingido a densidade de corrente crítica, n é um fator de forma no qual $n = 1$ corresponde à aplicação da lei de Ohm no estado misto de um supercondutor do tipo II e com $n \rightarrow \infty$ é equivalente com o modelo de estado crítico de Bean, indicado anteriormente. O n que se utiliza normalmente para os SAT será entre 20 a 50 e nos supercondutores de baixa temperatura serão valores superiores a 50 (Stavrev, Grilli, & Dutoit, 2002).

2.5 Formas Físicas dos Supercondutores

Para poder aplicar-se o conceito de supercondutividade, é necessário ver quais são as mais variadas formas que estes materiais podem adotar, de forma a poderem ser usadas as suas propriedades e ter o efeito desejado na sua implementação. Dado os SAT poderem ter o seu estado de supercondutividade a temperaturas elevadas, são disponibilizadas comercialmente em forma de bloco maciço e fita.

2.5.1 Blocos Maciços

Os blocos maciços são geralmente fabricados em BSCCO ou YBCO e poderão ter a forma de tubo ou de blocos maciços como está indicado na Figura 2.6. Estes supercondutores podem ser monocristalinos e policristalinos, no qual o material monocristalino tem uma corrente crítica (I_c) superior. Essa situação deve-se aos limites do grão no material policristalino onde a supercondutividade fica debilitada.

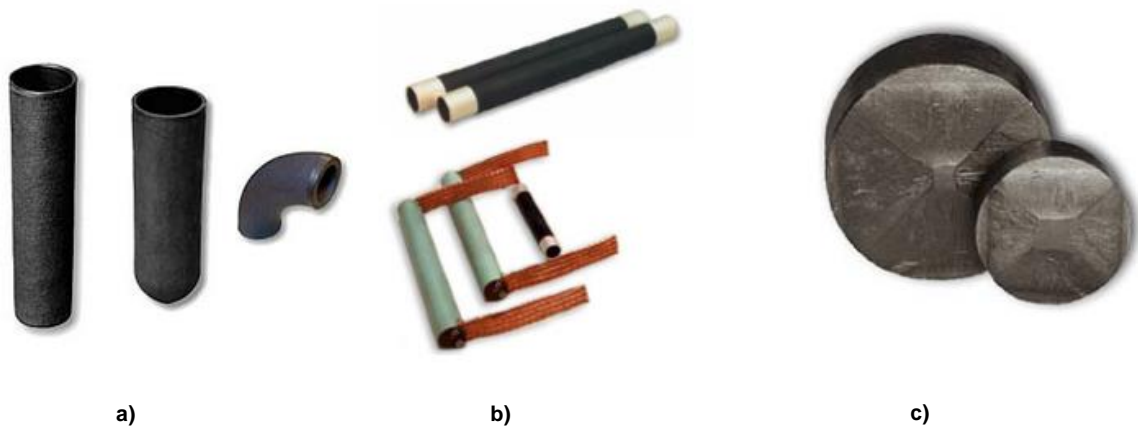


Figura 2.6 - Blocos maciços de supercondutores da CAN superconductors. a) Cilindro supercondutor em Bi-2223. b) Cilindro de Bi-2223 usado para condutores de corrente. c) Bloco maciço usado para levitação magnética. Retirado de <http://www.can-superconductors.com>, último acesso a 1 de setembro de 2014.

Os tubos são usados para os limitadores de corrente supercondutor (LCS) e condutores de corrente elétrica, têm a composição de Bi-2223 onde a sua T_c é de 110K temperatura muito superior à da ebulição do azoto líquido. Este material cerâmico é usado devido aos fracos campos magnéticos usados.

Os blocos maciços em YBCO são utilizados para a levitação magnética de um magneto permanente, como se pode visualizar na figura 2.7, devido a existir um ancoramento de fluxo magnético no estado misto. O material que compõe os blocos maciços tem uma T_c de 90K. Um bloco maciço com 77mm de diâmetro e uma altura de 19mm tem a capacidade de levantar 60Kg à temperatura de 77K.



Figura 2.7 - Bloco maciço a levantar um magneto permanente. Retirado de <http://www.institutotesla.org/propulsion.html>. Último acesso dia 1 de Setembro de 2014.

2.5.2 Fitas

Neste formato, os supercondutores têm uma maior flexibilidade e robustez mecânica que os blocos maciços, tendo em conta que são compostos cerâmicos, sendo estes muitos frágeis mecanicamente. Pode-se separar as fitas entre as fitas de primeira geração (1G) e de segunda geração (2G), como se verifica na Figura 2.8

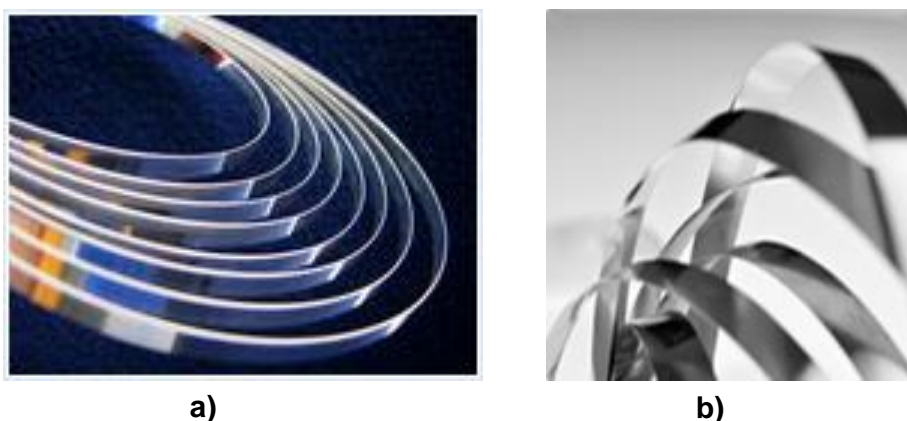


Figura 2.8 - a) Exemplo de fita supercondutora de 1G da InnoST. Retirado de <http://www.innost.com/index.php?m=index&a=actionClass&actype=channel&fid=35>, último acesso dia 1 de setembro de 2014. b) Exemplo de fita supercondutora 2G da Suptech. Retirado http://www.suptech.com/locations_austin.php, último acesso dia 1 de setembro de 2014.

As fitas 1G são geralmente compostas por BSCCO onde a composição poderá ser Bi-2212 ou Bi-2223. Estas são compostas por filamentos de SAT incorporado numa matriz de prata. Este tipo de fitas permite manter as suas propriedades supercondutoras até um certo raio de flexão.

As fitas 2G são compostas por depósitos finos de condutores e supercondutores, contendo também um substrato, como ilustra a Figura 2.9. O composto geralmente usado na camada supercondutora é YBCO, no entanto, poderá ser com (RE)BCO, composto que poderá ter várias terras raras. Estas fitas têm J_c , H_c , T_c , muito superiores às fitas de 1G. O raio de flexão é também inferior às das fitas 1G, sendo assim uma fita com maior flexibilidade.

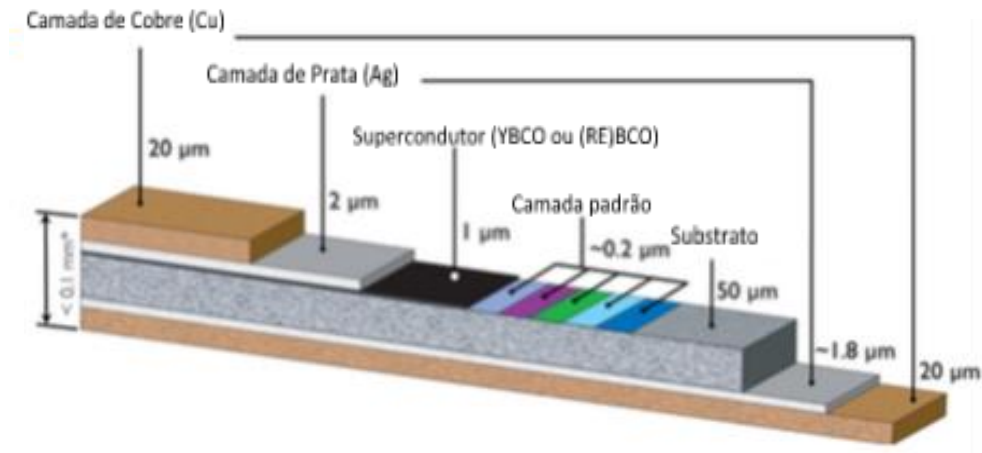


Figura 2.9 - Descrição da fita 2G por camada da Superpower. Adaptado de <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>, último acesso dia 1 de Setembro de 2014.

As fitas têm como aplicações bobines e cabos. Nos cabos, a fita supercondutora tem uma forma helicoidal para evitar a diminuição da sua contração devido à diminuição de temperatura. Caso a fita tenha uma forma longitudinal, a contração é superior. A geração de fita utilizada nos cabos, tanto poderá ser 1G ou 2G, no qual a fita 2G terá as suas vantagens, já anteriormente referidas, no entanto, o custo é certamente superior. A estrutura do cabo encontra-se ilustrada na Figura 2.10.

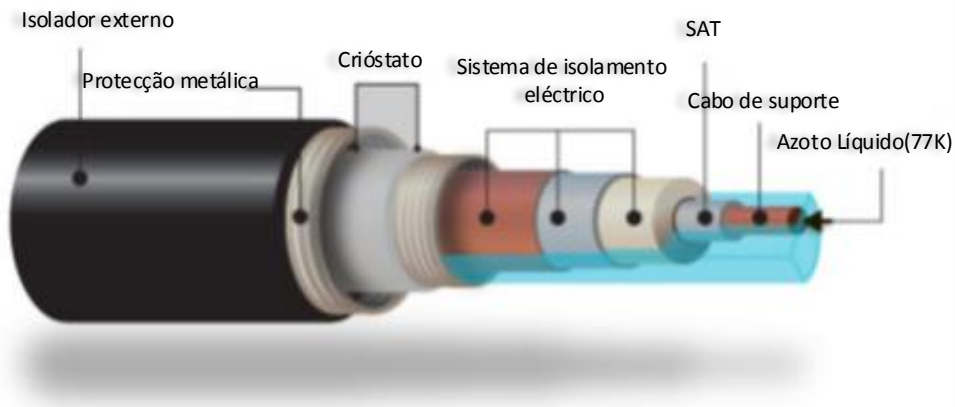


Figura 2.10 - Exemplo de um cabo supercondutor da Suptech. Adaptado de Suptech. Adaptado de http://www.suptech.com/transmission_cables_r.php, último acesso dia 1 de setembro de 2014.

2.6 Defeitos na Rede Elétrica

A falha nos Sistemas de Energia Elétrica (SEE) é uma situação anormal do próprio sistema. Estas falhas provocam correntes de curto-circuito (I_{cc}), com um valor muito superior ao da corrente nominal, resultantes de um defeito. As causas associadas a estas falhas em linhas aéreas são as descargas atmosféricas, embates de aves, de árvores e contacto entre linhas. No caso das linhas ou de dispositivos subterrâneos, como transformadores ou máquinas elétricas, o CC é provocado por defeitos nos isolamentos dos condutores (Paiva, 2011). Podemos observar na tabela 2.1 as falhas registadas na rede de média tensão (MT) de Portugal no ano de 2013, no qual existe um número

elevado de interrupções registadas. Esta situação deve-se, essencialmente, à maioria da rede MT ser linha aérea e mais suscetível às condições meteorológicas.

Tabela 2.1 - Número de interrupções acidentais registadas na rede MT, duração e origem. Adaptado de (EDP Distribuição, 2014).

Interrupções acidentais MT	Tempos [min]	Origem das Interrupções		Total
		Rede MT	Outras	
Interrupções Acidentais de Curta Duração	$t < 3$	21 665	63	21 728
Inferiores a 1 min (religação Automática)	$t < 1$	12 881	18	12 829
Intervalo de 1 a 3 min	$1 < t < 3$	8 854	45	8 899
Interrupções Acidentais de Longa Duração	$t > 3$	5 385	109	5 494
Total		27 050	172	27 222

Os CC estão divididos em simétricos e assimétricos. Os CC assimétricos estão associados a falhas fase-terra, também designadas falhas monofásicas, falhas fase-fase ou ainda fase-fase-terra. A falha mais comum é a monofásica (Paiva, 2011). Os CC simétricos estão associados à falha trifásica, ou seja, fase-fase-fase ou ainda fase-fase-fase-terra. É importante quantificar a I_{cc} para o dimensionamento das protecções para os SEE.

2.6.1 Curto-Circuitos Simétricos

Dado este tipo de curto-circuito estar associado a falhas trifásicas, irá considerar-se o esquema unifilar. O cálculo da corrente de curto-circuito trifásico (I_3^{CC}) é feito em vazio. Na Figura 2.11 temos um exemplo de uma rede com três barramentos no qual será demonstrado o método de cálculo da I_3^{CC} tendo um defeito no barramento 3.

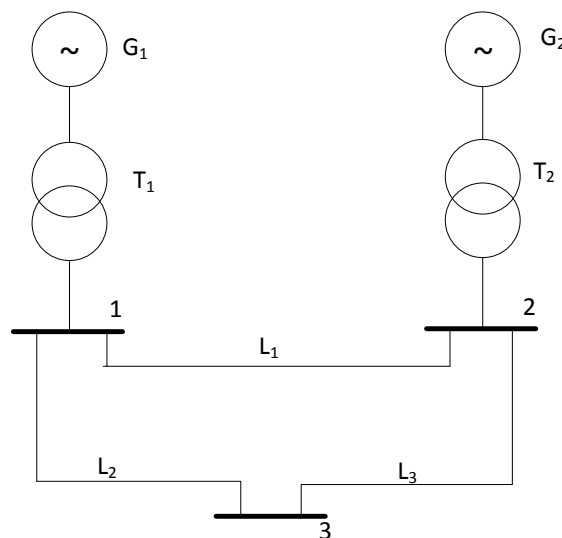


Figura 2.11 - Rede com três barramentos

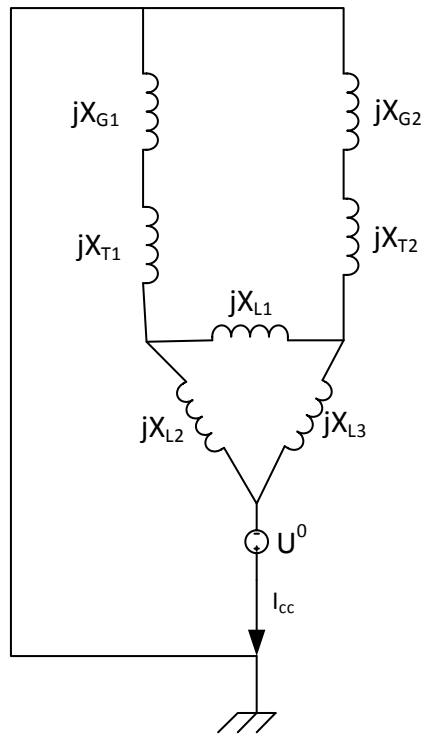


Figura 2.12 – Esquema equivalente monofásico da rede de três barramentos

O esquema monofásico, como se pode observar na Figura 2.12, contém as indutâncias das linhas e as impedâncias de CC dos transformadores e dos geradores. Calculando uma impedância equivalente, ficamos com um circuito equivalente de Thévenin, como se verifica na Figura 2.12. Esta transição exemplifica como se reduz um esquema complexo para um esquema simplificado.

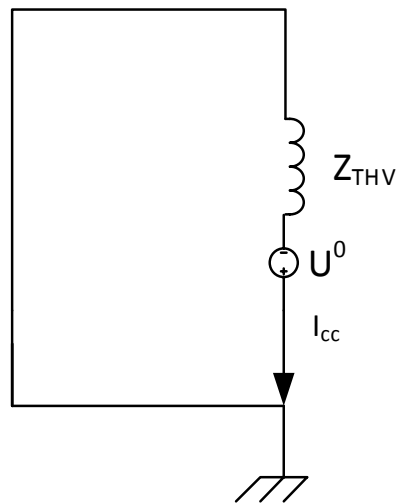


Figura 2.13 - Esquema reduzido final, equivalente de Thévenin da rede vista a partir do barramento 3.

O valor de corrente de curto-circuito trifásico é calculada da seguinte forma:

$$I_3^{cc} = \frac{U^0}{Z_{THV}} \quad (2.7)$$

2.6.2 Curto-Circuitos Assimétricos

À semelhança dos curto-circuitos simétricos, calcula-se a corrente de curto-circuito através da redução da rede. A partir do teorema de Fortescue, é possível representar um sistema trifásico desequilibrado num circuito monofásico onde se tem três componentes distintos: direto, inverso e homopolar, onde a sua relação com as correntes das fases é descrita através do sistema de equações seguinte:

$$\begin{cases} I_d = \frac{I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c}{3} \\ I_i = \frac{I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c}{3} \\ I_h = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \end{cases} \quad (2.8)$$

No sistema de equações (2.8) tem-se I_d , I_i , I_h , sendo as correntes elétricas dos esquemas direto, inverso e homopolar respetivamente; I_a , I_b e I_c das correntes elétricas das fases respetivas e α um operador de rotação com o valor de $e^{j2\pi/3}$, que permite a defasagem para uma única fase. Considerando a geração em vazio e considerando que o neutro do gerador se encontra ligado à terra, analisamos as falhas: fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra.

2.6.2.1 Falha Fase-Terra

Neste tipo de falha podemos ter um esquema de como o circuito se fecha, como ilustra a Figura 2.14. Dado que as fases b e c não são afetadas, tem-se por consequência que as componentes simétricas da corrente de curto-circuito fase-terra são iguais, indicado na equação seguinte:

$$I_d = I_i = I_h = \frac{I_a}{3} \quad (2.9)$$

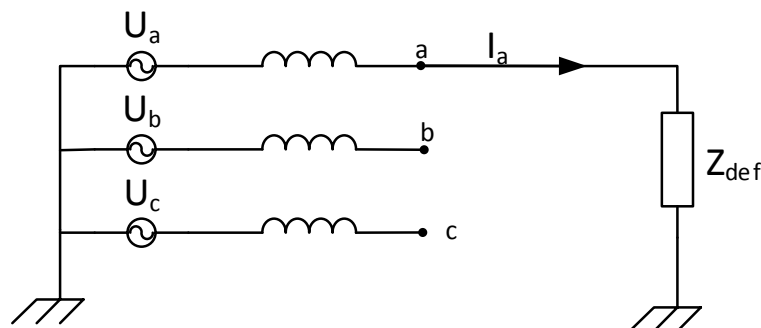


Figura 2.14 - Curto-circuito fase-terra aos terminais de um gerador. Adaptado de (Paiva, 2011).

Considerando um defeito franco, ou seja $Z_{def}=0$, tem-se os esquemas equivalentes direto, inverso e homopolar e a forma como estão ligados tal como demonstra a Figura 2.15.

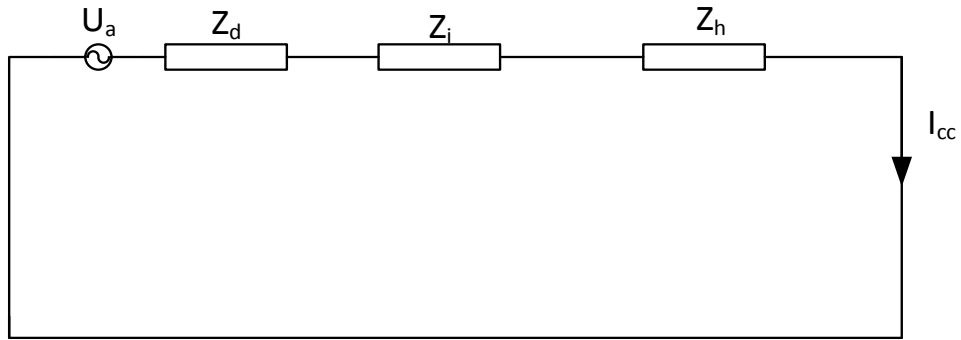


Figura 2.15 - Esquema de ligações de curto-circuito fase-terra

A corrente de curto-circuito fase-terra é dada por:

$$I_{cc} = \frac{U_a}{Z_d + Z_i + Z_h} \quad (2.10)$$

2.6.2.2 Falha Fase-Fase

Neste tipo de falha, podemos ter um esquema de como o circuito se fecha, como ilustra a Figura 2.16. Dado que a fase não é afetada, tem-se por consequência que as componentes simétricas da corrente de curto-circuito fase-terra são iguais, conforme indicado na equação seguinte:

$$\begin{cases} I_d = -I_i = j \frac{I_b}{\sqrt{3}} \\ I_h = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

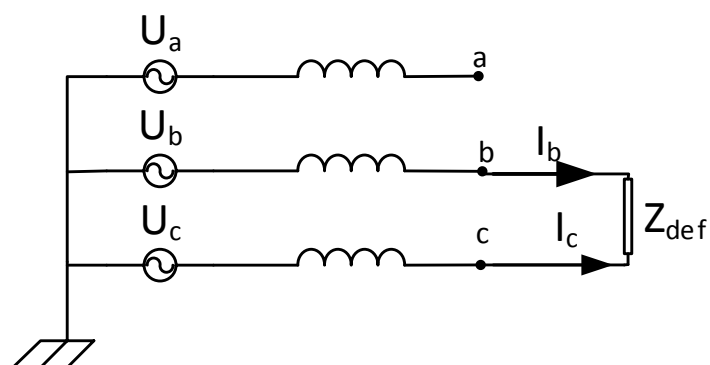


Figura 2.16 - Curto-circuito fase-fase. Adaptado de (Paiva, 2011).

Considera-se o defeito como sendo franco, ou seja $Z_{def}=0$, tem-se os esquemas equivalentes direto, inverso e de como estão ligados conforme demonstra a Figura 2.17. A impedância homopolar

não está presente, pois como se verifica na equação (2.11), a corrente da componente homopolar é nula.

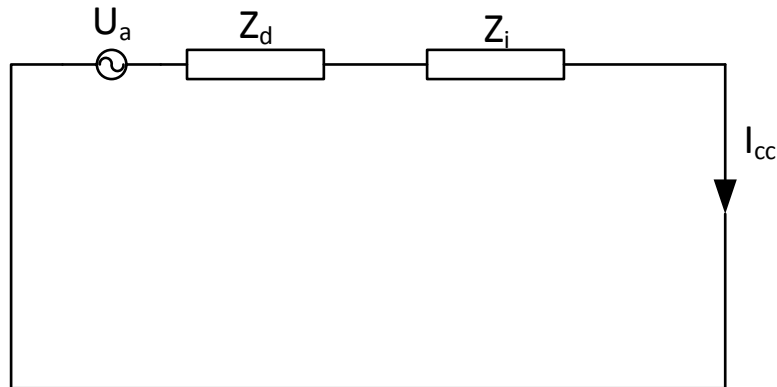


Figura 2.17 - Esquema de ligações para o curto-circuito fase-fase

A corrente de curto-circuito fase-fase é dada por:

$$I_{cc} = -j \frac{\sqrt{3}U_a}{Z_d + Z_i} \quad (2.12)$$

2.6.2.3 Falha Fase-Fase-Terra

Neste tipo de falha podemos ter um esquema de como o circuito se fecha, como ilustra a Figura 2.18. à semelhança do curto-circuito fase-fase fase a não é afetada, tem-se consequentemente as componentes simétricas da corrente de curto-circuito fase-terra são iguais, tal como indicado na equação seguinte:

$$I_d + I_i + I_h = 0 \quad (2.13)$$

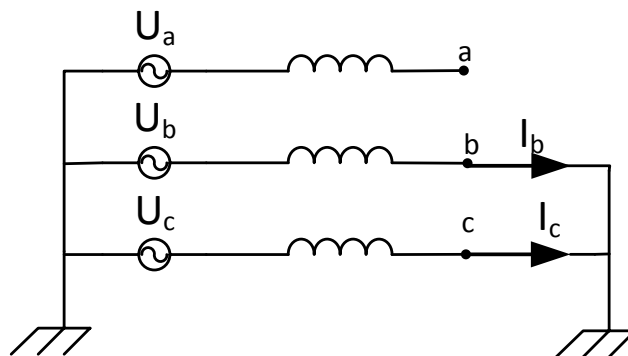


Figura 2.18 - Curto-circuito fase-fase-terra. Adaptado de (Paiva, 2011).

Os esquemas equivalentes direto, inverso e homopolar estão ligados entre si. Na Figura 2.19 pode-se verificar como se encontram ligados.

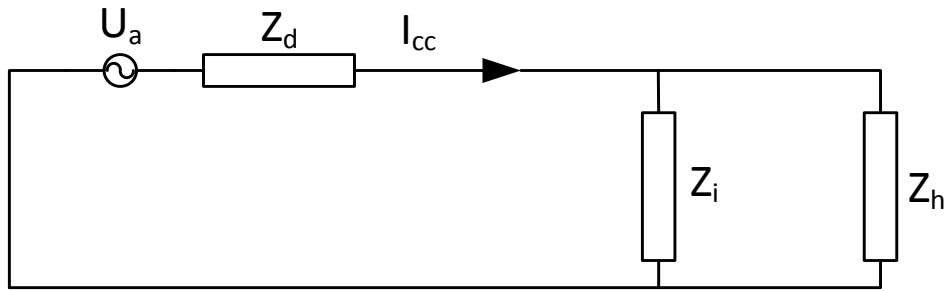


Figura 2.19 - Esquema de ligações para o curto-circuito fase-fase-terra por fase.

$$I_{ccb} = U_a \frac{(\alpha^2 - 1)Z_i + (\alpha^2 - \alpha)Z_h}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \quad (2.14)$$

$$I_{ccc} = U_a \frac{(\alpha - 1)Z_i + (\alpha - \alpha^2)Z_h}{Z_d Z_i + Z_d Z_h + Z_i Z_h} \quad (2.15)$$

A corrente de curto-circuito fase-fase-terra é dada por cada fase em curto-circuito:

2.7 Estado da Arte

As formas de lidar com as falhas no SEE têm vindo a tornar-se mais complexas, devido principalmente ao aumento da geração distribuída que aumenta as correntes de CC. Em Portugal, no ano de 2013 existiu um ligeiro aumento de potência instalada relativa a 2012, nas linhas aéreas e subterrâneas, postos de transformação e subestações (EDP Distribuição, 2014). Este aumento da potência instalada, prevê um aumento do consumo de energia, o que traduz a tendência que se tem verificado nos últimos anos. Em alguns casos, as falhas mais graves podem gerar correntes dezenas ou mesmo centenas de vezes maior que a corrente elétrica em regime nominal. Este tipo de falhas poderá causar dentro dos disjuntores um arco elétrico incontrollável que poderá danificar seriamente o dispositivo, ou no pior cenário, inutilizar o próprio disjuntor e equipamento a que poderão estar ligados (Weinstock, 2000). O desenvolvimento tecnológico e a exigência solicitada aos dispositivos de potência têm aumentado significativamente o seu tamanho, custo e peso.

Os limitadores de corrente poderão ser instalados em diversos locais, quer na rede de distribuição, quer na rede de transporte. Os locais de possível instalação são entre os barramentos de uma subestação, ligações a fontes de produção, linhas de distribuição ou de transporte, ramais de entrada e saída dos transformadores e cargas críticas (Kalsi & Malozemoff, 2004). Podemos visualizar alguns pontos de instalação na Figura 2.20.

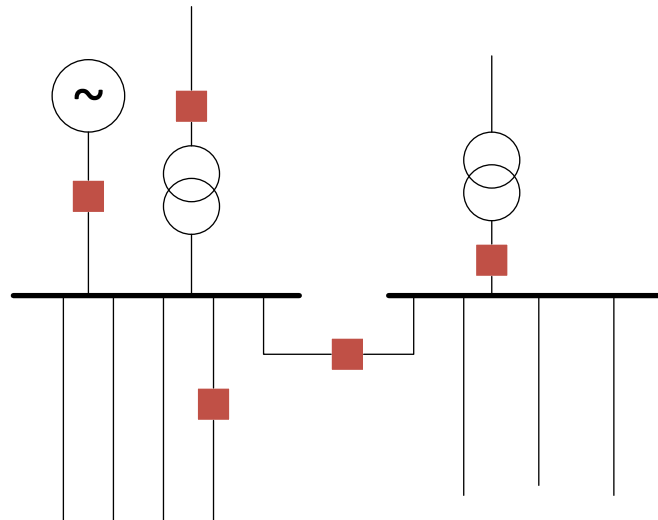


Figura 2.20 - Locais de instalação de limitadores de corrente. Adaptado de (Kalsi & Malozemoff, 2004).

Atualmente, existem várias soluções que tentam resolver este problema, no entanto, estas soluções convencionais tendem a ser dispendiosas ou limitadas, além de que no seu funcionamento em regime normal, tendem a ter grandes perdas de energia. Uma solução promissora serão os limitadores de corrente supercondutor (LCS), pois estes revelam uma rápida limitação. Já foram concebidos vários protótipos de LCS que foram colocados em funcionamento na rede de energia, como irá verificar-se mais adiante.

Um limitador de corrente ideal, segundo vários peritos, deverá cumprir as seguintes características (Weinstock, 2000):

- Ter impedância zero ou desprezável em regime nominal
- Em condições de falha, fornecer impedância suficientemente alta
- Rápida deteção e inicialização da ação de limitação, que será menor que um ciclo
- Retornar rapidamente à operação normal após a limitação da falha
- Poder limitar com sucesso duas falhas consecutivas dentro de um período de quinze segundos
- Ter tamanho e peso reduzido
- O seu custo ser minorado
- O equipamento ser totalmente automatizado
- Deverá ter alta fiabilidade e durabilidade.

Os requisitos de um limitador de corrente para se instalar numa rede de distribuição, poderá ter as seguintes especificações (Weinstock, 2000):

- Tensão nominal entre 12 kV e 17 kV
- Corrente elétrica eficaz em regime nominal entre os 600 A e 2400 A.
- Redução da corrente de curto-circuito entre 20% e 80%.
- Rápida resposta (menor que 8 ms) e recuperação da falha
- A corrente máxima da falha estar entre 20 kA e 40 kA.
- Deverá suportar sobretensões de 110 kV

Para se poder classificar um evento de falha, terá que se verificar como é feita a classificação em regimes com os vários valores que a corrente elétrica pode tomar na rede. A corrente elétrica na linha até ao seu valor nominal (I_{nom}), indica que se encontra em regime nominal. Entre I_{nom} e o seu dobro encontra-se em regime de sobrecarga. A seguir ao regime de sobrecarga, a corrente encontra-se em regime de falha, este regime começa a partir de $2I_{nom}$, como poderá ilustrar Figura 2.21. Pode-se ainda salientar que a corrente toma o seu maior valor nos defeitos juntos aos barramentos (I_{fm}) (Gromoll & Ries, 1999).

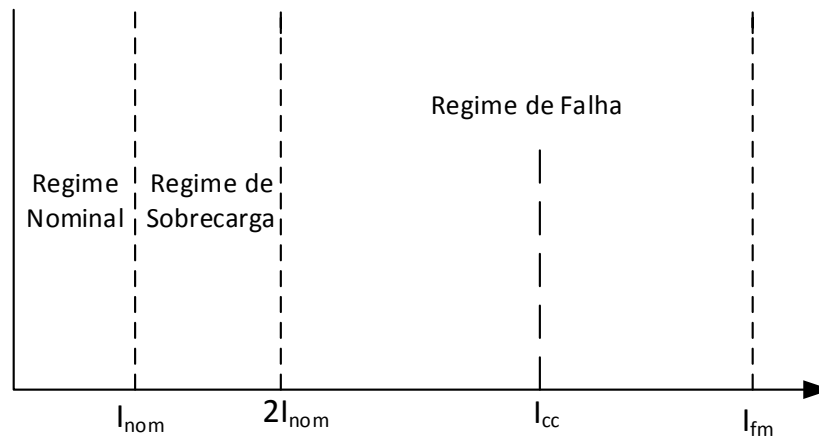


Figura 2.21 - Diagrama de correntes no SEE. Adaptado de (Sokolovsky, Meerovich, Vajda, & Beilin, 2004).

2.7.1 Soluções Convencionais para a Limitação de Correntes de Curto-Circuito

As soluções existentes, atualmente, têm várias formas de proteger o SEE, com vários níveis de efetividade. Algumas destas soluções têm um custo elevado, outras poderão pôr em causa a fiabilidade do SEE. No entanto, faz-se uma descrição destes recursos já existentes (Kovalsky et al., 2005).

A construção de novas subestações tem um custo mais elevado, devido aos equipamentos adicionais que é necessário instalar. Corrige os problemas de alimentação de cargas no curto-prazo e permite dar espaço ao crescimento do SEE.

A divisão ou construção de barramentos que separa as fontes de energia tornam as correntes de CC com valores mais reduzidos do que os barramentos que incluem os nós na totalidade. Esta solução, de facto, tem esse efeito, mas também existem menos fontes de energia a sustentar a carga.

A atualização e a multiplicação dos disjuntores da rede é outra solução encontrada, pois quando se dá a falha mais do que um disjuntor poderá ser afetado. O inconveniente desta opção é não limitar a corrente, ou seja, o circuito é interrompido cortando o fornecimento de energia.

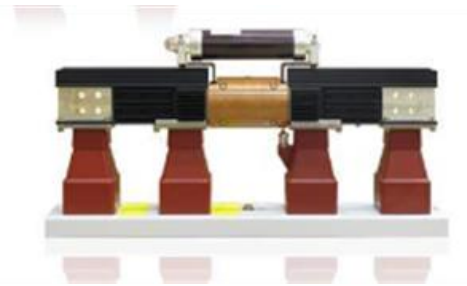
O uso de transformadores de alta impedância e bobines com núcleo de ar limitam a corrente durante a falha, devido ao aumento da impedância. Em regime nominal da linha, verifica-se queda de tensão nos seus terminais, o que faz com que tenha perdas no seu normal funcionamento. Na ligação

com outros sistemas, poderá causar alguma instabilidade no SEE. Na Figura 2.22a ilustra-se bobines com núcleo de ar da empresa Trench, que possui limitadores que poderão ir até aos 765 kV.

Os limitadores de corrente pirotécnico ou limitadores- I_s usam descargas químicas e fusíveis no primeiro quarto de ciclo. Quando existe falha, a maior percentagem da corrente de curto-circuito passa pelo fusível, destruindo e protegendo o circuito. É uma solução que apresenta bons resultados, mas tem um custo dispendioso e é necessário trocar o fusível manualmente após a falha. A Figura 2.22b apresenta um limitador I_s da empresa ABB, que possui gamas de funcionamento entre 750 V e 40.50 kV e capaz de limitar entre 140 kA e 210 kA.



a)



b)

Figura 2.22 - a) Bobine com núcleo de ar da Trench. Retirado de (Trench, 2009). b) Limitador I_s da ABB. Retirado de (ABB, 2011).

À semelhança dos disjuntores, os fusíveis de alta tensão não limitam a corrente, apenas interrompem o circuito. Esta solução não é passível de ser reposta sem a substituição do fusível no local, pois este fica fundido.

De forma a entender melhor as vantagens e desvantagens de algumas soluções convencionais, veja-se a tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Tabela com vantagens e desvantagens das soluções tradicionais para as falhas no SEE. Adaptado de (Leung, 1997).

Solução	Vantagens	Desvantagens
Disjuntores	<ul style="list-style-type: none"> • Provada a sua eficácia • Fiável 	<ul style="list-style-type: none"> • Interrompe o fornecimento de energia • Dispendioso • Performance limitada até 100kA • Durabilidade
Transformadores de alta impedância	<ul style="list-style-type: none"> • Prática comum 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineficiência no sistema • Perdas elevadas
Fusíveis	<ul style="list-style-type: none"> • Uso simples • Provada a sua eficácia 	<ul style="list-style-type: none"> • Suporta correntes de curto-circuito muito baixas • Requer substituição manual
Bobines com núcleo de ar	<ul style="list-style-type: none"> • Provada a sua eficácia • Abordagem tradicional 	<ul style="list-style-type: none"> • Quedas de tensão elevadas • Perdas substanciais durante o regime nominal • Requer instalação de condensadores para compensar fator de potência
Divisão de barramentos	<ul style="list-style-type: none"> • Abordagem provada • Método usado para zonas em que o seu crescimento é muito acelerado 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz a fiabilidade da rede • Operação do sistema é menos flexível • Custo excessivo numa linha adicional • Custo adicional para adicionar disjuntores

2.7.2 Limitadores de Corrente Supercondutores

Os LCS têm sido apontados como uma das principais aplicações na área da energia. Em geral, os LCS são colocados em série com os disjuntores, no caso de os defeitos não serem temporários, é necessário o corte do fornecimento de energia. Os primeiros LCS foram construídos com supercondutores de baixa temperatura aproximando-se dos requisitos necessários para a sua aplicação. No entanto, o seu sucesso comercial estaria longe, devido às baixas temperaturas em que seria necessário manter o supercondutor. Ao surgirem os SAT, a situação alterou-se, várias companhias iniciaram o fabrico de SAT. Manter o supercondutor à temperatura desejável era muito mais acessível, onde os sistemas de criogenia são muito mais eficientes.

Os LCS têm tido várias propostas de configurações tais como: LCS resistivo, LCS Indutivo e LCS retificador. Dentro dos indutivos, existem os que têm *quench* (perca abrupta do estado de supercondutividade) onde se encontram os de tipo transformador, o LCS do âmbito desta dissertação. O LCS de núcleos saturados pertence ao grupo dos limitadores que não têm *quench*. A Figura 2.23 demonstra de que forma é que se encontram divididas as várias configurações de limitadores.

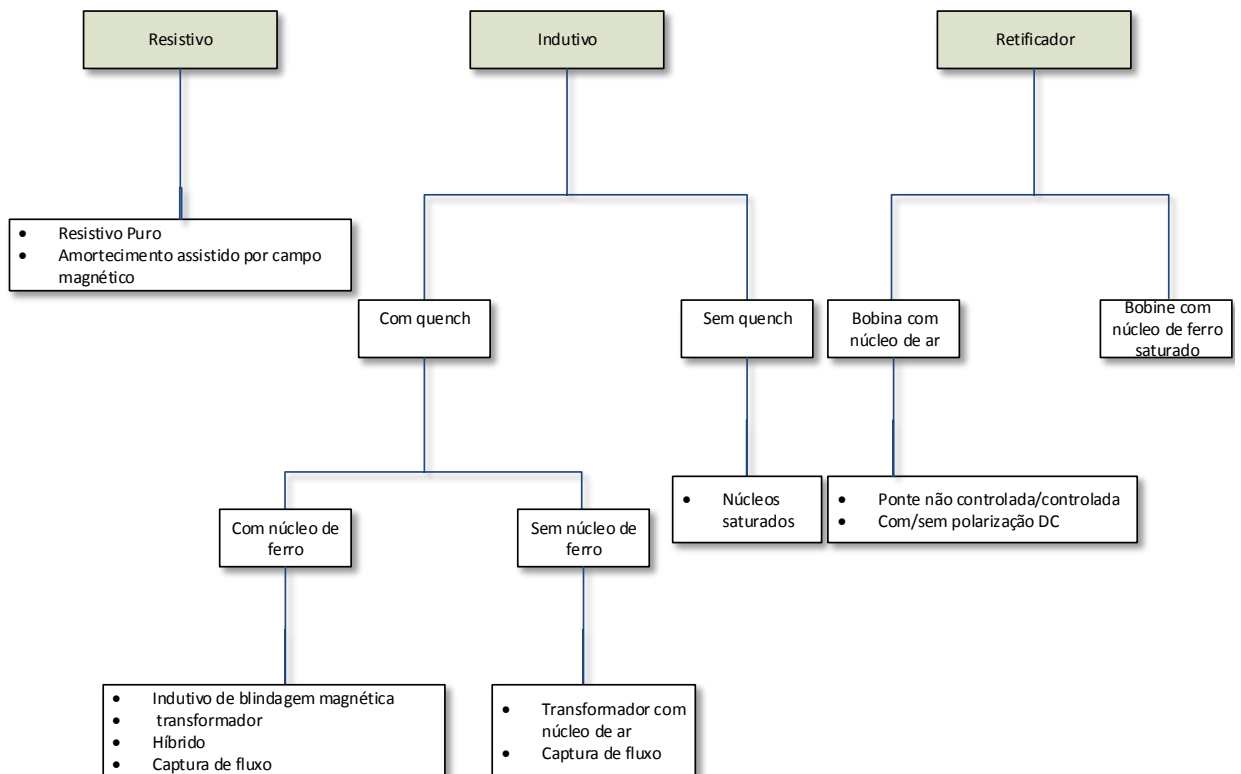


Figura 2.23 - Diversas configurações que o LCS poderá tomar. Adaptado de (Pina, 2010).

Como já foi indicado, geralmente, os LCS indutivo e resistivo estão ligados em série com disjuntores com um tempo de recuperação de 50 ms, que permite a limitação de corrente e calor no supercondutor e melhoria do tempo de recuperação.

2.7.2.1 Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo

Nesta tipologia, o supercondutor é um condutor elétrico, ou seja, o elemento supercondutor encontra-se ligado em série com o condutor convencional a ser protegido, como se observa na Figura 2.24. Em regime normal, onde a corrente da linha é menor que a corrente crítica ($I < I_c$), o SAT encontra-se no estado de supercondutividade onde a sua resistência é desprezável. Quando o dispositivo entra em regime de falha, onde a corrente da linha é superior à corrente crítica ($I > I_c$), o supercondutor entra no seu estado normal e torna-se altamente resistivo, dissipando energia em forma de calor. Durante a transição entre estes dois estados, existe um rápido aumento de temperatura devido a perdas de Joule, há um aumento rápido da temperatura e aumento da queda de tensão nos seus terminais. O elemento supercondutor pode ficar danificado devido ao rápido aumento da sua temperatura, designados pontos quentes. A gestão desta situação é um sério desafio

para este tipo de LCS. Em (Gromoll & Ries, 1999) foi desenhado um LCS resistivo de 100 kVA com fita supercondutora YBCO, capaz de limitar CC cerca de 65%. Para ser possível chegar à potência nominal, foi necessário colocar a fita em pilhas, duas ligadas em série duas ligadas em série com cinco fitas em paralelo em cada uma delas.

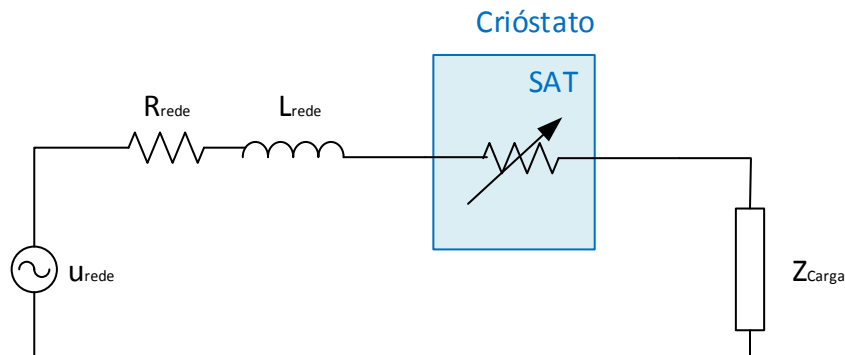


Figura 2.24 - Circuito equivalente de um LCS Resistivo

2.7.2.2 Limitador de Corrente Supercondutor Indutivo do Tipo Transformador

As vantagens do LCS indutivo incluem uma tensão reduzida através dos seus materiais supercondutores e em algumas topologias a possibilidade de usar SAT mais largos em vez de utilizar SAT mais compridos. A maior desvantagem deste tipo de LCS é o seu tamanho devido à utilização de núcleos de ferro.

Dado ser esta a configuração usada no âmbito desta dissertação, iremos explicar de forma detalhada o seu funcionamento. O seu princípio de funcionamento baseia-se no funcionamento de um transformador, onde temos um enrolamento primário composto por condutor de cobre e um enrolamento secundário em que o seu material é o supercondutor. O primário encontra-se em série com a linha que necessita de ser protegida e o elemento supercondutor encontra-se ligado em curto-circuito. O seu funcionamento é dividido em dois regimes: o normal e o de falha.

No regime normal, o secundário encontra-se no estado de supercondutividade blindando o fluxo que existe no núcleo de ferro. A força magneto-motriz (FMM) produzida pelo primário é anulada pela FMM do secundário, anulando assim, o fluxo criado pelo enrolamento primário. Este efeito acontece quando o supercondutor é composto por fita (Sokolovsky et al., 2004) e (Ferreira, 2013). Na referência (Arsénio, 2012) o enrolamento SAT não se encontra no topo do primário, mas encontra-se ligado magneticamente, dado que o SAT se encontra no caminho magnético gerado pelo primário. Quando é utilizado um bloco maciço supercondutor tendo uma forma cilíndrica, este encontra-se no interior do enrolamento do primário (Silva, 2013).

Com o bloco maciço supercondutor e no regime normal, o campo magnético criado pelo enrolamento não penetra totalmente o secundário cilíndrico em consequência de este se encontrar no estado de supercondutividade, blindando o fluxo (Meerovich & Sokolovsky, 1999). O enrolamento primário encontra-se isolado magneticamente do secundário, o que dá uma baixa impedância, tendo em conta o ponto de vista da rede. Esta situação acontece tanto com secundário composto por fita

como por bloco maciço. A Figura 2.25 demonstra as duas configurações descritas, quer com bloco maciço cilíndrico no interior do primário quer com um secundário composto em fita supercondutora no topo do primário.

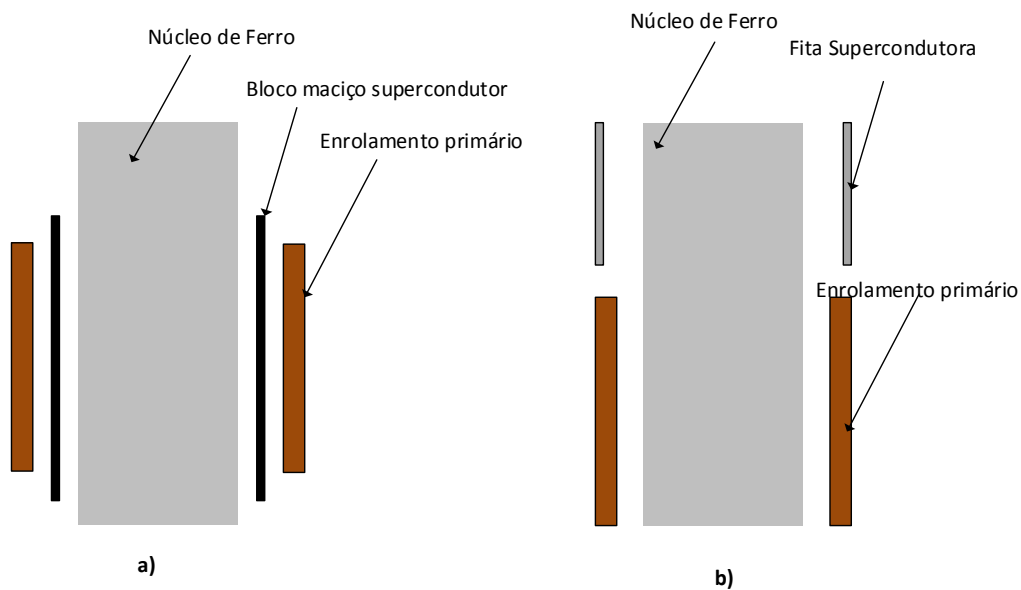


Figura 2.25 - Perspectiva frontal de duas configurações de LCS. a) LCS de blindagem magnética. b) LCS do tipo transformador com fita supercondutora.

Em regime de falha, as correntes de curto-circuito provocam uma variação de fluxo e o enrolamento primário induz correntes no supercondutor (na forma de fita) superior ao seu valor crítico ($I > I_c$) perdendo a capacidade de cancelar o fluxo magnético gerado pelo enrolamento primário. Verificamos, então uma queda de tensão aos seus terminais onde surge o LCS com uma alta impedância, limitando assim a corrente na linha. A limitação também é feita pelas perdas no núcleo de ferro através de perdas por histerese.

Na configuração com bloco maciço, o campo magnético aumenta drasticamente devido à falha na linha e penetra o cilindro do supercondutor, tornando-o no seu estado normal. Na Figura 2.26 está demonstrado o circuito equivalente do LCS indutivo do tipo transformador.

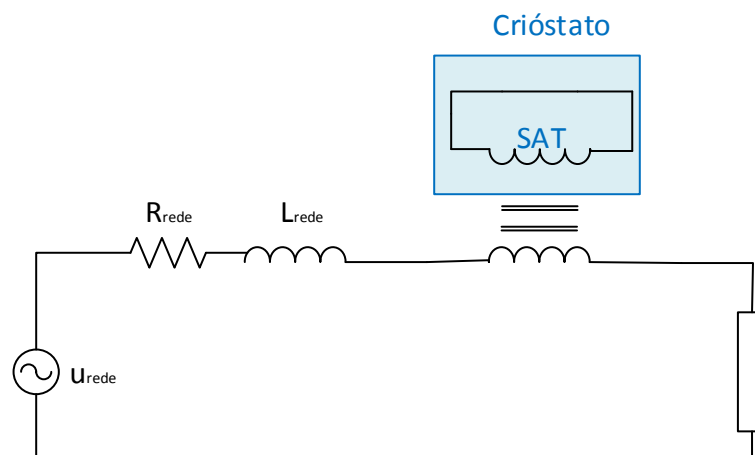


Figura 2.26 - Circuito com esquema equivalente de um LCS indutivo

O primeiro projeto de LCS Indutivo do tipo transformador com instalação na rede foi feito pela empresa ABB em 1997. Este LCS é trifásico e uma potência de 1,2 MVA, como se pode observar na figura 2.27. A tensão nominal e corrente nominal e são respetivamente 10,5 kV e 70 A. A aplicação foi feita junto a um ponto de produção, neste caso, na central hidroelétrica de Kraftwerk am Löntsch na Suíça. O elemento supercondutor é composto por anéis maciços de Bi-2212 com uma espessura de 1.8 mm. O desempenho deste LCS permite limitar CC de 60 kA para 750 A no primeiro meio período. Após 50 ms a corrente foi limitada abaixo de 250 A (Paul et al., 1997).



Figura 2.27 - LCS trifásico produzido pela ABB. Retirado de (Paul et al., 1997).

Os LCS Indutivos também poderão ter um núcleo de ar. Como exemplo desta configuração, temos a referência (Kozak, Majka, Kozak, & Janowski, 2012), onde o LCS foi testado com tensão de 10 kV com uma corrente nominal de 600 A. O LCS é composto por quatro módulos onde por cada um temos o elemento supercondutor que é composto com fita 2G. No exterior do secundário, encontram-se o enrolamento primário, composto por cobre em paralelo com um elemento SAT também 2G, estando todo o limitador mergulhado em azoto líquido. Podemos observar na Figura 2.28, o LCS fora do crióstato. Nos ensaios realizados, aplicaram-se CC de 20 kA que foram limitadas a 5 kA no primeiro ciclo da falha.

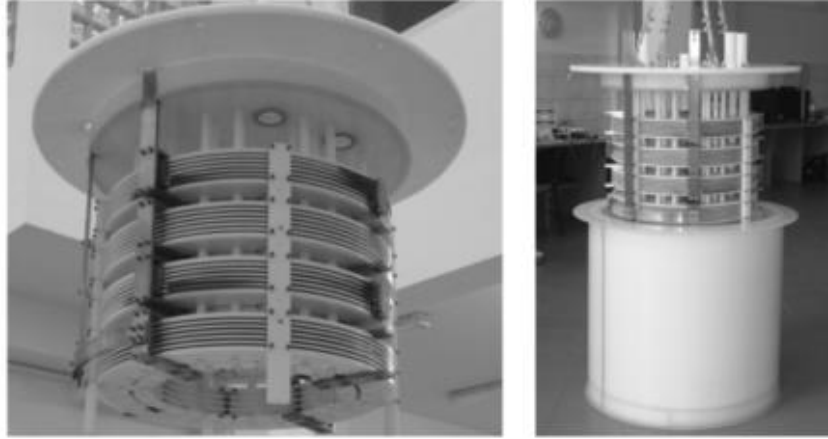


Figura 2.28 – LCS com núcleo de ar. Retirado de (Kozak et al., 2012)

2.7.2.3 Modelização do LCS Indutivo do Tipo Transformador

Na presente dissertação discute-se a modelização utilizada para o projeto do LCS trifásico indutivo. O cálculo do ciclo máximo de histerese é uma modelização dos LCS e surge como alternativa aos programas de elementos finitos que são demorados. A metodologia apresentada por (Pina, 2010), a partir da característica magnética do núcleo onde podemos verificar a corrente máxima que o supercondutor consegue blindar que tem como valor, I_{SAT}^*/N . Parte-se da expressão seguinte:

$$\psi_0 = aN_p i_{linha} + \frac{bN_p i_{linha}}{c + dN_p |i_{linha}|} \quad (2.16)$$

A equação (2.16) relaciona o fluxo ligado, ψ_0 , com a corrente na linha, i_{linha} . N_p corresponde ao número de espiras do enrolamento primário e a, b, c, d são coeficientes que são determinados por simulação ou ajuste. Em histerese temos um ramo ascendente e descendente que tem origem na equação (2.16) e uma função auxiliar, f . Tendo a mesma forma da característica do ferro, os ramos são calculados através de ψ_0 :

$$\lambda_a(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} - f(i_{linha})) \quad (2.17)$$

$$\lambda_d(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} + f(i_{linha})) \quad (2.18)$$

Os ramos ascendente e descendente correspondem respetivamente a λ_a e λ_d . A função é definida através de:

$$f(i_{linha}) = \frac{I_{SAT}^*/N_p}{\cos\left(\frac{\pi I_{SAT}^*/N_p}{2 I_{cc}}\right)} \cos\left(\frac{\pi i_{linha}}{2 I_{cc}}\right) = A_f \cdot \cos(B_f \cdot i_{linha}) \quad (2.19)$$

$$A_f = \frac{I_{SAT}^*/N_p}{\cos\left(\frac{\pi I_{SAT}^*/N_p}{2 I_{cc}}\right)} \quad (2.20)$$

$$B_f = \frac{\pi}{2} \frac{1}{I_{cc}} \quad (2.21)$$

Com estas equações, é possível construir o ciclo máximo de histerese que toma a forma que poderá ser observada na Figura 2.29.

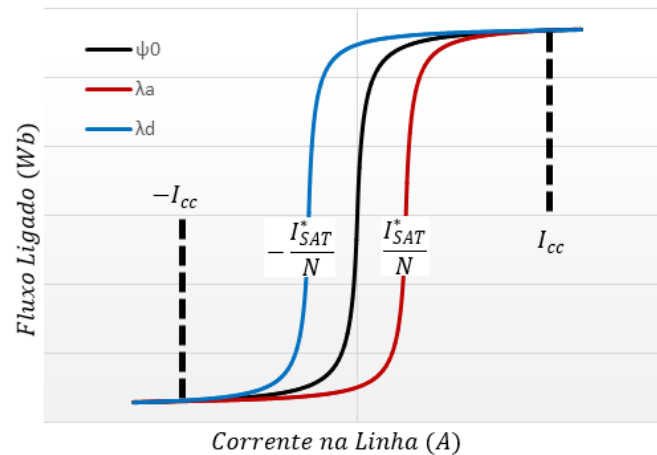


Figura 2.29 - Formato e características principais do ciclo máximo de histerese.

2.7.2.4 Limitador de Corrente Supercondutor Indutivo de Núcleos Saturados

O LCS de núcleos saturados consiste em ter dois enrolamentos em série entre si e com primeira linha a ser protegida, compostos por condutores convencionais, com um núcleo de ferro por fase. Estas bobines estão ligadas magneticamente com dois enrolamentos supercondutores em série, alimentadas com uma fonte DC. A polaridade entre as bobines é inversa para que fluxos ligados dos enrolamentos supercondutores no núcleo tenham sentidos opostos.

Em regime normal, as bobines supercondutoras saturam o núcleo. Nesta condição, a permeabilidade magnética é reduzida e cria uma pequena variação de fluxo nos núcleos de ferro que causa alguma variação de impedância no circuito AC. Porque os fluxos se encontram opostos existe o acoplamento magnético entre o circuito AC e DC é desprezável.

Um curto-circuito na linha torna a permeabilidade magnética dos núcleos de ferro elevada, ou seja, deixam de estar saturados. Durante um ciclo, tem-se a operação de um transformador que introduz uma elevada impedância na linha e a consequente limitação da corrente de curto-circuito.

Uma das principais vantagens desta configuração é o supercondutor não perder o seu estado de supercondutividade, ou seja, não existe tempo de recuperação após uma falha. Uma outra vantagem deste tipo de LCS indutivo é o facto de ter perdas desprezíveis no supercondutor em regime nominal devido ao circuito supercondutor ser DC e portanto não existem as perdas AC associadas as outros tipos de LCS. As principais desvantagens são o seu tamanho e custo (Weinstock, 2000). A Figura 2.30 mostra um circuito equivalente onde se pode ver o LCS de núcleos saturados.

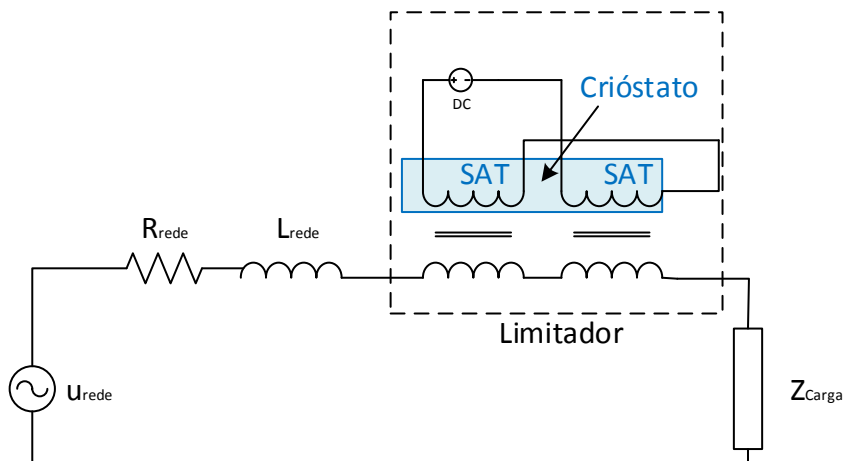


Figura 2.30 - Circuito com um LCS de núcleos saturados

Como exemplo de instalação, temos um protótipo projectado pela Zenergy Power (Moriconi, Koshnick, De La Rosa, & Singh, 2010), com tensão nominal de 15kV e potência 24MVA. Este dispositivo foi testado com uma tensão 13.1 kV com CC de 23 kA. O LCS mostrou uma limitação de 46%. Em Março de 2009 este LCS foi instalado numa rede pioneira no Sul da Califórnia, denominada como Rede Edison. Este foi o primeiro dispositivo de limitação supercondutor a ser instalado na rede elétrica nos Estados Unidos da América, como se observa na Figura 2.31.



Figura 2.31 - LCS de núcleos saturados da Zenergy Power instalada na Rede Edison, Sul da Califórnia. Retirado de (Kalsi, 2011).

2.7.2.5 Limitador de Corrente Supercondutor Retificador

O principal conceito deste LCS é o uso de eletrônica de potência. Esta é baseada numa ponte retificadora, no qual se encontra uma bobina supercondutora com núcleo de ar e uma fonte de tensão DC. No regime nominal da linha, a corrente é ajustada para que a ponte retificadora conduza sempre e também exista corrente na bobine supercondutora. Como a componente AC da corrente no supercondutor é desprezável, as suas perdas são reduzidas. A queda de tensão aos terminais do supercondutor é reduzida, no entanto, é compensada pela fonte de tensão reduzindo a impedância do supercondutor.

No regime de falha, um par de díodos param o seu funcionamento durante o meio período positivo do ciclo e o outro par de díodos não funciona no meio período negativo do ciclo. No

supercondutor passam componentes AC e existem conseqüentemente as perdas AC na bobine. O aumento da impedância cria uma queda de tensão aos seus terminais que limitará a corrente. As perdas existentes na eletrônica de potência em regime normal, podem tornar com que este tipo de LCS não seja apelativo. Na Figura 2.32 observa-se um diagrama esquemático.

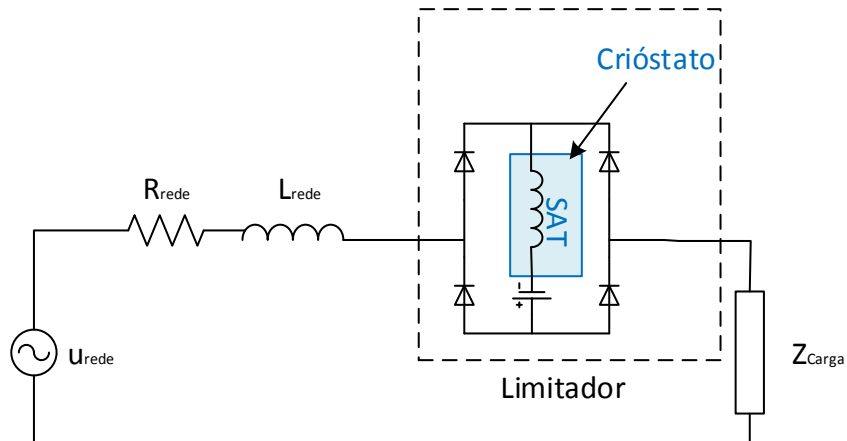


Figura 2.32 - Circuito com um LCS Retificador

Em (Yazawa et al., 2006) foi projetado um LCS retificador de 66kV onde o elemento supercondutor é constituído por SAT com seis bobines em série e cinco bobines em paralelo, a fita supercondutora é Bi-2223. A sua corrente nominal é de 750 A. Testes de CC com correntes de 2.8 kA mostram uma limitação de corrente no circuito para 1350 A em apenas um ciclo. Na Figura 2.33 vê-se a montagem de um LCS com ponte retificadora.

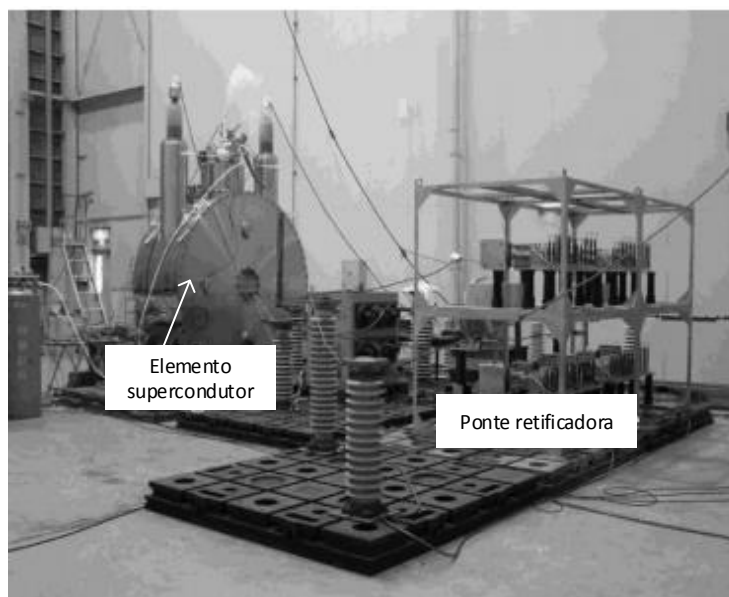


Figura 2.33 - LS do tipo retificador. Adaptado de (Yazawa et al., 2006).

2.8 Síntese

Neste capítulo, abordámos os conceitos teóricos da supercondutividade no qual verificámos o seu desenvolvimento histórico, as suas propriedades macroscópicas, tipos existentes de

supercondutores e a forma que poderão assumir. Fez-se um levantamento dos tipos de falhas existentes do SEE, tendo como referência a rede de MT em Portugal. Demonstrou-se o método de cálculo utilizado para se saber o valor das correntes de curto-circuito na rede.

Neste capítulo, também se focaram os dispositivos que permitem limitar as correntes de curto-circuito no SEE, assim como os métodos tradicionais usados, evidenciando as suas vantagens e desvantagens.

Fez-se um levantamento dos vários LCS concebidos, focando o seu princípio de funcionamento e foram dados exemplos de instalação e testes dos vários tipos de LCS. Foi dado um foco específico ao LCS indutivo de blindagem magnético sendo esta a configuração usada no âmbito desta dissertação.

3 Metodologia de Dimensionamento do Limitador

Este capítulo foca-se no método que permitiu dimensionar o protótipo do âmbito desta dissertação. Abordam-se os requisitos necessários para a implementação da metodologia descrita. O método baseado no dimensionamento do transformador aplica-se, nesta dissertação, no núcleo de ferro magnético e no enrolamento primário e no cálculo do número de espiras do enrolamento secundário.

3.1 Introdução

O dimensionamento baseia-se num limitador monofásico, no entanto, a metodologia pode ser adaptada a um limitador trifásico. Após o dimensionamento de todas as componentes do LCS, iremos demonstrar o cálculo do ciclo máximo de histerese. Apresenta-se na Figura 3.1 o fluxograma do método aplicado, sendo nas secções indicado, de forma detalhada, a forma como é calculado cada parâmetro do LCS. A metodologia foi implementada em Mathworks Matlab, de forma a calcular os vários parâmetros do LCSTI de uma forma automatizada.

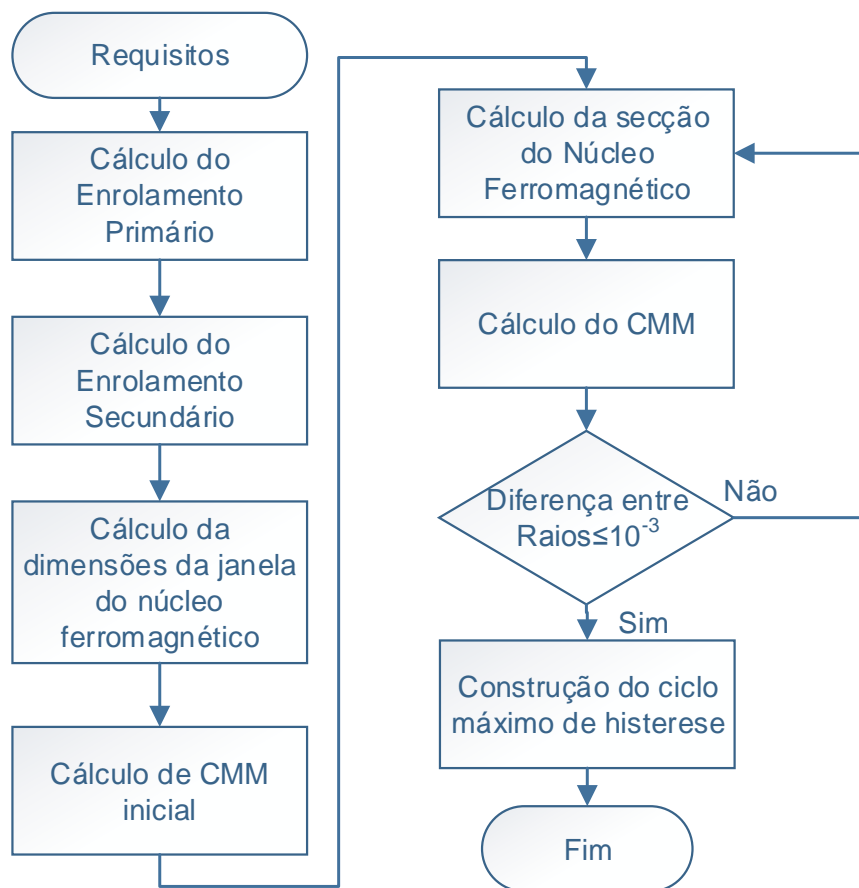


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia de dimensionamento do LCS

3.2 Requisitos Necessários

Para conseguir dimensionar com um LCS, é necessário obter informação prévia para que a sua aplicação ocorra com sucesso. Estando este tipo de dispositivos diretamente ligado ao SEE, o seu dimensionamento terá critérios semelhantes a outros dispositivos que compõem, por exemplo, uma linha de distribuição de energia. No capítulo três, é feita referência a algumas grandezas a considerar, entre as quais:

- Tensão nominal da linha
- Potência nominal em regime normal
- Corrente nominal da linha
- Corrente de curto-circuito expectável
- Corrente no qual se pretende que o dispositivo inicie a sua limitação

Face a estes resultados, estamos em condições de poder dimensionar os vários elementos que compõem o LCS que irá ser descrito a seguir.

3.3 Cálculo dos Enrolamentos

3.3.1 Dimensionamento do Enrolamento Primário

O dimensionamento do enrolamento primário parte de uma premissa que será a tensão por espira, U_e , sendo a queda de tensão entre cada espira do enrolamento. O valor desta grandeza deverá ser suficientemente baixo para não existir disrupção elétrica do isolante do enrolamento e o limitador deixar de ter o efeito de limitação pretendido. Tendo então a relação entre tensão simples, U_s e U_e . Temos o número de espiras do primário, N_p , dado por (Dasgupta, 2002):

$$N_p = \frac{U_s}{U_e} \quad (3.1)$$

Para ter o efeito desejado com a equação (3.1), poderá ser necessário aumentar em 5% o número de espiras do primário (Dasgupta, 2002). Após sabermos o número de espiras, é necessário ver qual a secção do condutor do primário, calculando através da densidade de corrente do material, neste caso sendo o condutor cobre, J_{Cu} , que tem o valor de 3 A/mm^2 .

$$S_p = \frac{I_{nom}}{J_{Cu}} \quad (3.2)$$

Tendo a secção do condutor, pode-se calcular o diâmetro do condutor, D_c :

$$D_c = 2 \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} \quad (3.3)$$

Se o diâmetro do condutor for superior a 3.5 mm, então a secção do condutor deverá ser retangular (Dasgupta, 2002).

3.3.2 Dimensionamento do Enrolamento Secundário

O dimensionamento dos enrolamentos envolve o cálculo tradicional de espiras, através do cálculo da força magnetomotriz (FMM). Como o elemento supercondutor a ser utilizado é fita, este encontra-se no topo do enrolamento primário. A FMM do primário tem de ser anulado pela FMM do secundário até entrar em regime de falha. Em geral, os valores calculados pela equação (3.5) não são valores inteiros, para se conseguir o efeito desejado deve-se arredondar para o valor inferior. Tendo-se:

$$N_P I_{inic} = N_S I_{SC}^* \quad (3.4)$$

$$N_S = \frac{N_P I_{inic}}{I_{SC}^*} \quad (3.5)$$

Nesta equação, I_{inic} , é a corrente no qual se pretende que o limitador inicie a sua limitação e I_{SC}^* ,

$$I_{SC}^* = k_1 I_c \quad (3.6)$$

é a corrente crítica da fita e é descrito por:

Onde k_1 , é parâmetro que tem o valor superior a 100%, obtido experimentalmente. Esta situação acontece porque na fita o supercondutor se encontra revestido por bons condutores no caso da fita 2G por cobre e prata, que perto do estado normal do supercondutor começam a conduzir corrente elétrica. I_c da fita supercondutora dada pelo fabricante.

3.4 Dimensionamento do Núcleo

O dimensionamento do núcleo de ferro começa por abordar a dimensão da janela entre cada coluna e a partir do qual obtemos a sua altura e comprimento. Com estes dados, obtemos um caminho médio magnético (CMM) inicial e a partir da característica do ferro obtém-se a secção necessária de forma iterativa. Ver-se-á que implicações têm os aspetos construtivos no dimensionamento do núcleo. O cálculo das dimensões é baseado no desenho de transformadores. O dimensionamento do núcleo considera inicialmente o núcleo como sendo monofásico. No caso de ser do tipo *Shell*, as colunas exteriores terão metade da secção da coluna central, mas no qual também se enquadra o dimensionamento descrito nesta secção.

3.4.1 Coeficiente de Utilização da Janela

Este fator é a área da janela usada para se colocar os elementos necessários do limitador, tanto o cobre do primário como o secundário supercondutor com o seu crióstato. A partir da referência

$$K_u = S_1 S_2 S_3 S_4 \quad (3.7)$$

(McLyman, 2004), temos o coeficiente de utilização de janela, K_u , que é dado por:

Os coeficientes, S_1, S_2, S_3, S_4 serão descritos de forma detalhada nas secções seguintes. No entanto tem-se já uma pequena descrição:

- Isolamento dos condutores, S_1 .
- Fator de preenchimento devido à forma como os condutores estão enrolados, S_2
- Coeficiente de área efetiva de uso da janela, S_3
- Isolamento necessário para enrolamentos múltiplos, S_4

Com a multiplicação destes fatores obtém-se, na generalidade, um valor normalizado de $K_u \approx 0.4$

3.4.1.1 Isolamento dos condutores

O isolamento dos condutores varia consoante a sua corrente nominal. Este coeficiente em geral varia entre 0.941 e 0.673 dependendo da secção do condutor. O cálculo deste fator é a razão entre a área de material condutor (cobre ou alumínio) com a área total do condutor, que se expressa da seguinte forma:

$$S_1 = \frac{\text{área do cobre}}{\text{área do condutor}} \quad (3.8)$$

O coeficiente é obtido através da tabela 3.1. Considera-se o fator onde a área do condutor se encontra entre dois valores que se encontram na tabela referida.

Tabela 3.1 - Valores de coeficiente de isolamento com isolamento simples

Área do condutor (cm ²)	Constante de isolamento (considerando isolamento simples)
0.109	0.961
0.0571	0.939
0.0320	0.917
0.0179	0.878
0.0100	0.842
0.0056	0.815
0.0031	0.784

3.4.1.2 Fator de Preenchimento

A área utilizada pelo enrolamento não é inferior à área ocupada. A forma como o enrolamento é feito tem implicações neste fator e o cálculo poderá ser definido por:

$$S_2 = \frac{\text{área do enrolamento}}{\text{área utilizável inserida numa janela}} \quad (3.9)$$

Teremos na Figura 3.2 dois exemplos de como poderá ser feito o enrolamento e o valor do coeficiente de preenchimento.

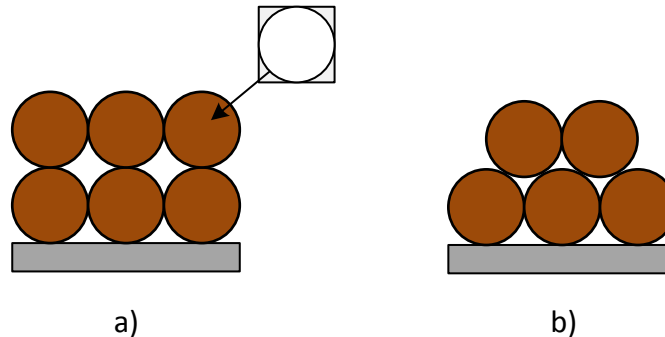


Figura 3.2 - Forma dos enrolamentos. a) tem um coeficiente teórico de 0.785. b) tem um coeficiente teórico de 0.97. Adaptado de (McLyman, 2004).

Considerando que, na prática, não é possível um enrolamento ser tão preciso como demonstra a Figura 3.2a), segundo a referência, em geral atribui-se um fator de preenchimento de 0.61.

3.4.1.3 Coeficiente de Área Efetiva da Janela

Esta razão define o quanto de espaço disponível irá ser, de facto, usado para o enrolamento. Este fator depende de vários fatores como a tipologia do núcleo e o número de enrolamentos. É

$$S_3 = \frac{\text{área utilizável da janela}}{\text{área da janela}} \quad (3.10)$$

definido por:

No âmbito da dissertação, o valor será de 0.835 (McLyman, 2004).

3.4.1.4 Fator de isolamento

Este fator define a quantidade de isolamento usado na janela do núcleo, por exemplo

$$S_4 = \frac{\text{área utilizável da janela}}{\text{área utilizável da janela} + \text{isolamento}} \quad (3.10)$$

isolamento entre bobinas no secundário caso estes sejam múltiplos. Que é expresso por:

O valor deste fator é 1, salvo se existir múltiplos secundários, onde este fator é reduzido entre 5% e 10%.

3.4.2 Dimensões da Janela

Após calcular K_u estamos em condições de calcular a área da janela, A_j , obtido da seguinte forma:

$$K_u A_j = N_p S_p + A_{crióstato} \quad (3.11)$$

$$A_j = \frac{N_p S_p + A_{crióstato}}{K_u} \quad (3.12)$$

A área ocupada pelo secundário, que por necessitar de estar a baixas temperaturas num crióstato, é designado na equação 3.10 e 3.11 de $A_{crióstato}$. Partindo do pressuposto que o crióstato é

$$A_{crióstato} = (r_{ext} - r_{int}) \cdot h_{crióstato} \quad (3.13)$$

cilíndrico, a área ocupada pelo crióstato na janela é definido por:

Onde o r_{ext} é o raio exterior do crióstato, r_{int} é o raio interior do crióstato e $h_{crióstato}$ a altura

$$h_{crióstato} = N_s \cdot L_{fita} \cdot k_2 \quad (3.14)$$

do crióstato, onde a sua expressão é dada por:

Onde L_{fita} é a largura da fita supercondutora e k_2 é um coeficiente de espaçamento entre as

$$h_j = h_{crióstato} + \frac{N_p \cdot D_c}{N_{cu}} \quad (3.15)$$

fitas supercondutoras. Desta forma podemos calcular a altura da janela, h_j , com:

Onde N_{cu} é o número de camadas de enrolamento do primário. A partir do cálculo da área da

$$l_j = \frac{A_j}{h_j} \quad (3.16)$$

janela obtém-se a largura da mesma, l_j :

A largura da janela terá que ser superior à largura do crióstato.

3.4.3 Secção

O método de cálculo da secção é feito de forma iterativa. Antes de se poder descrever o método, há que ter em conta certos aspetos. Como a característica magnética do núcleo que se obtém são apenas pontos, não existe uma função definida. Em geral, os pontos são obtidos de forma experimental. Na referência Majoros, Jansak, Sello & Zannella (Majoros, Jansak, Sello, & Zannella,

$$B(H) = aH + \frac{bH}{c + d|H|} \quad (3.17)$$

1997) e de forma análoga tem-se a expressão:

Os coeficientes a,b,c,d são calculados uma ferramenta do cftool em Mathworks Matlab, baseados nos pontos da característica do ferro, que podem ser medidos experimentalmente. Tem-se

$$l_m^{(0)} = 2(l_j + h_j) \quad (3.18)$$

um CMM inicial, $l_m^{(0)}$, que é definido pelo perímetro da janela:

Para além de termos um CMM, tem-se outros valores iniciais cujo seu valor é nulo. Para se conseguir ter um valor de densidade de fluxo magnético, B , é necessário sabermos o campo

$$H^{(n)} = \frac{N_p * I_{inic}}{l_m^{(n-1)}} \quad (3.19)$$

magnético, H , através da Lei de Ampère.

$$B^{(n)}(H^{(n)}) = aH^{(n)} + \frac{bH^{(n)}}{c + d|H^{(n)}|} \quad (3.20)$$

Incluindo o termo iterativo na equação (3.16) ficando com:

$$\psi = \frac{U_s}{\omega} \quad (3.21)$$

A partir da lei de Faraday, temos:

Onde ω é a frequência da rede. Com a definição de densidade de fluxo magnético

$$S_m^{(n)} = \frac{\psi}{B^{(n)} \cdot N_p} \quad (3.22)$$

conseguimos então calcular a secção do núcleo do LCS, S_m .

Para poder dar início à nova iteração é necessário calcular um novo CMM. Para ser possível

$$R_m^{(n)} = \sqrt{\frac{S_m^{(n)}}{k_d \pi}} \quad (3.23)$$

é necessário conseguirmos ter o valor do raio da secção o núcleo, R_m . Que se pode ter a partir de:

Onde k_d é uma constante relacionada com o número de degraus que o núcleo contém e o impacto que tem na redução da secção, conforme a tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores que o parâmetro k_d pode tomar em função do número de degraus do núcleo (Dasgupta, 2002)

Número de Degraus	k_d
6	0.92
7	0.925
8	0.93
9	0.935
10	0.94
11	0.945

Após ter o raio da secção do núcleo, é necessário calcular o grau de precisão fazendo a diferença do raio entre duas iterações e a sua condição que permite terminar o processo iterativo. No

$$\beta^{(n)} = |R_m^{(n)} - R_m^{(n-1)}| \leq 10^{-3} \quad (3.24)$$

qual fica-se com a secção e raio do núcleo.

O valor dado na condição em (3.24) deve-se ao facto da grandeza já ter um valor bastante diminuto e até poderia ser desprezável. Em geral, o número de iterações necessário para chegar à

$$l_m^{(n)} = l_m^{(n-1)} + 8\beta^{(n)} \quad (3.25)$$

precisão indicada é reduzida, demonstrado na Figura 3.3. Para se obter um novo CMM tem-se:

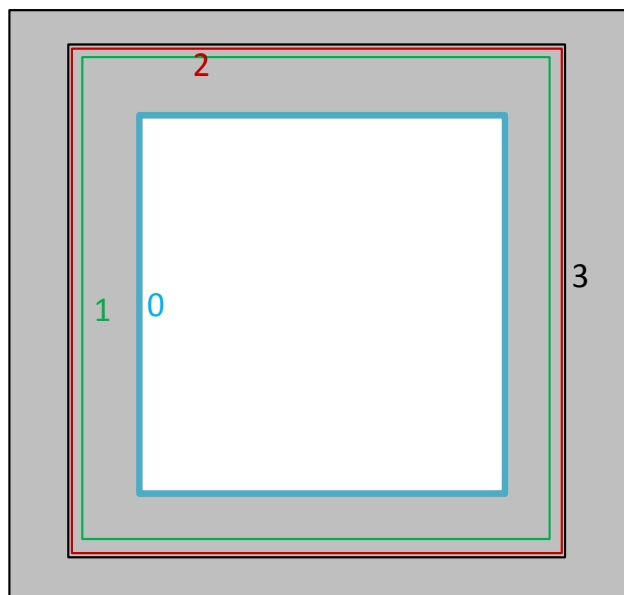


Figura 3.3 - Indica que CMM são calculados nas várias iterações.

3.4.4 Construção do Ciclo Máximo de Histerese

Na secção 2.7.2.3 já se reviu a forma de cálculo do ciclo de máxima histerese. Aplicando-se as equações (2.16), (2.17) e (2.18). A função auxiliar f nas equações (2.19), (2.20) e (2.21) aplica-se ao caso de existir um bloco maciço cilíndrico, neste dimensionamento tem-se em consideração o secundário em fita supercondutora onde tem um determinado número de espiras. As equações alteram-se ficando da seguinte forma:

$$f(i_{linha}) = \frac{I_{SAT}^* N_s / N_p}{\cos\left(\frac{\pi I_{SAT}^* N_s / N_p}{2 I_{CC}}\right)} \cos\left(\frac{\pi i_{linha}}{2 I_{CC}}\right) = A_f \cdot \cos(B_f \cdot i_{linha}) \quad (3.26)$$

$$A_f = \frac{I_{SAT}^* N_s / N_p}{\cos\left(\frac{\pi I_{SAT}^* N_s / N_p}{2 I_{CC}}\right)} \quad (3.27)$$

$$B_f = \frac{\pi}{2 I_{CC}} \quad (3.28)$$

Esta alteração nas equações permite o aumento ou redução do ciclo máximo de histerese consoante o número de espiras do secundário, como ilustra a figura 3.3.

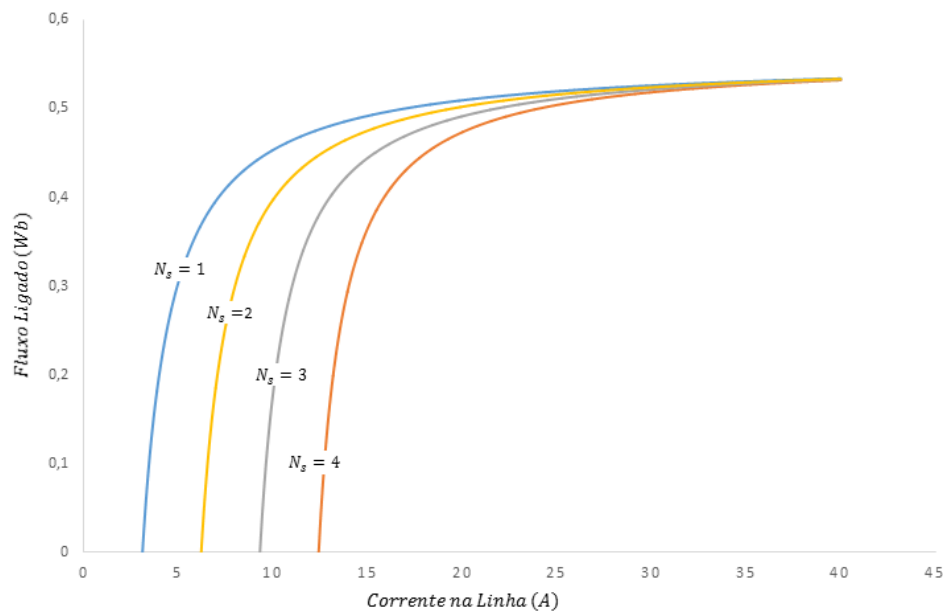


Figura 3.4 - Componentes ascendentes com variação do número de espiras do secundário.

3.5 Síntese

O dimensionamento do LCS indutivo do tipo transformador foi descrito de forma detalhada. Foram enunciados os requisitos necessários para o projeto do LCS. Partiu-se das características elétricas, tais como o número de espiras do enrolamento primário para, de seguida, se dimensionar o

núcleo. Obtendo a altura e largura na janela, permite calcular a secção transversal do núcleo de ferro de forma iterativa. A construção do ciclo máximo de histerese foi adaptada para se prever o seu comportamento, consoante o número de espiras que o secundário possa conter. O dimensionamento do LCS tem já em consideração alguns aspetos construtivos do mesmo.

4 Construção do Protótipo

Neste capítulo, pretende-se descrever o projeto através do método do capítulo anterior e a construção do protótipo LCS indutivo do tipo transformador. O núcleo contém cinco colunas, nos quais as fases da linha a proteger pertencem às colunas interiores, que terão um formato circular no projeto, mas na sua construção contém degraus tendo apenas um formato aproximadamente circular. As colunas exteriores terão uma forma retangular. Adota-se as várias formas de núcleo dividindo-se em duas topologias que são descritas neste capítulo. Todos os aspetos construtivos relativos aos enrolamentos e do crióstato irão ser descritos.

4.1 Introdução

No projeto do limitador de corrente trifásico indutivo (LCSTI) tem-se como requisitos a forma de poder ser testado em laboratório:

- A tensão simples de 60 V, para escala laboratorial.
- A corrente nominal do LCS é de 2.5 A
- A corrente onde se inicia a limitação de 5 A, dado ser o dobro da corrente nominal.

Para o projeto do LCSTI, escolheu-se de forma empírica uma tensão por espira de 1V, dado ser o valor utilizado para transformadores em BT (baixa tensão). Os valores de dimensionamento indicados no capítulo corrente são baseados na metodologia exposta no capítulo três. Os dados da característica magnética do ferro que compõe o núcleo foram retirados dos resultados experimentais de (Pronto, 2010) . A frequência utilizada para o dimensionamento foi a existente na rede elétrica nacional cujo valor é de 50Hz.

4.2 Núcleo

O núcleo do limitador adota duas topologias trifásicas, uma com cinco colunas que se denomina do tipo *Shell* e uma tipologia trifásica tradicional. As suas colunas centrais têm uma forma aproximadamente circular, contendo degraus. As colunas exteriores têm uma forma retangular onde a sua secção tem metade do valor da área da secção das colunas centrais. As colunas retangulares, apesar de estarem presentes na tipologia tradicional, não têm qualquer influência no fluxo e campos magnéticos do núcleo. Esta situação acontece devido ao facto do comprimento da travessa superior ser mais reduzida que a travessa do núcleo do tipo Shell. Sobre os apoios exteriores encontra-se ar, que torna a relutância magnética do circuito magnético pelas colunas exteriores tão elevados que não existe fluxo a circular pelos sustentáculos exteriores, podendo ser considerado um núcleo como se encontra na referência (Ferreira, 2013). Estas duas topologias permitem verificar se a colocação de colunas exteriores num núcleo trifásico convencional melhora o desempenho do LCSTI. De forma a ter uma melhor compreensão sobre as topologias descritas, as formas de ambos os núcleos encontram-se ilustrados na Figura 4.1.

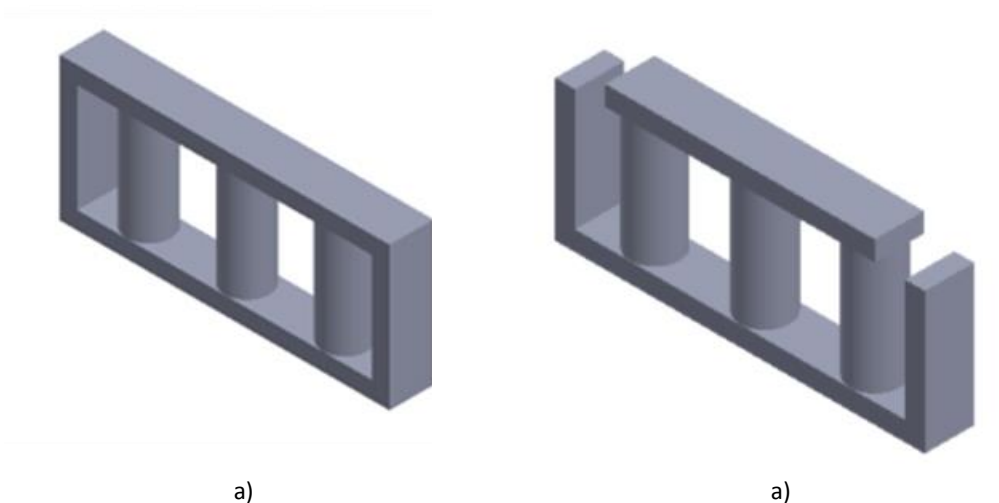


Figura 4.1 - Tipologia dos núcleos utilizados. a) Tipologia trifásica do tipo Shell. b) Tipologia trifásica tradicional

O diâmetro das colunas centrais segundo a metodologia seguida tem 65 mm de diâmetro. Para saber-se as dimensões das colunas exteriores são 26x65 mm de forma a cumprir o critério de metade da área da secção das colunas centrais. A altura da janela tem 160 mm. O cálculo da largura da janela é concebido para saber-se a largura da janela de um núcleo monofásico, caso das janelas exteriores. A largura das janelas interiores tem de ser o dobro da largura da janela exterior, pela razão destas serem delimitadas por duas fases. A Figura 4.2 ilustra as diversas dimensões do núcleo utilizado.

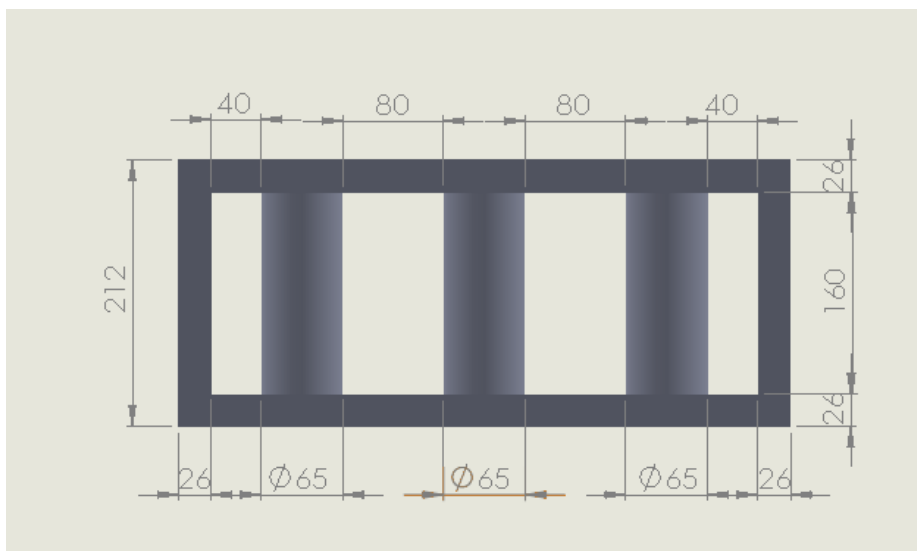


Figura 4.2 - Medidas horizontais e verticais da janela e colunas do núcleo ferromagnético. As unidades das medidas indicadas são mm.

A chapa que compõe o núcleo é composta chapa magnética de grão não-orientado com espessura de 0.5 mm. As chapas são unidas com parafusos e tem uma estrutura metálica que fixa a travessa superior que é amovível para se ter acesso às colunas centrais e aos enrolamentos. O anexo 1 estarão as medidas completas das diversas perspectivas do núcleo.

4.3 Enrolamento Primário

O primário é composto três bobines, cada uma encontra-se localizada em cada uma das colunas interiores do núcleo ferromagnético. Cada bobine é composto por dois enrolamentos condutores. O enrolamento primário que se encontra ligado à linha tem 60 espiras. Contém um enrolamento para a medição do fluxo magnético no núcleo ferromagnético cujo material é cobre com 100 espiras e com secção muito reduzida. Os suportes para os primários são compostos por acrilonitrila butadieno estireno (ABS), utilizado por ser material dieléctrico e pelo seu baixo custo. A sua produção foi feita através de uma impressora3D que se localiza na Biblioteca da Universidade Nova de Lisboa. Na Figura 4.3 observa-se a aparência final dos enrolamentos construídos. O anexo 2 contém o desenho e as dimensões dos suportes utilizados.



Figura 4.3 - Enrolamentos Primários do LCSTI

4.4 Enrolamento Secundário

O enrolamento secundário, segundo a metodologia do capítulo três, têm-se três espiras que ficarão situadas no fundo do enrolamento primário e no interior do crióstato para ser mergulhado em azoto líquido. A fita supercondutora utilizada para o enrolamento secundário é uma fita 2G da Superpower, no qual o SAT utilizado é YBCO. As especificações da fita utilizada encontram-se na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificações de fita 2G fabricada pela Superpower

Nome Comercial	Corrente Crítica mínima (A)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro mínimo de curvatura (mm)
SCS4050	100	4	0.1	11

O suporte da fita supercondutora é suportado por Celeron, como se observa na Figura 4.4, devido à sua contração a temperaturas baixas ser muito reduzida e conter propriedades mecânicas favoráveis neste tipo de ambientes.



Figura 4.4 - Enrolamento secundário onde a fita se encontra suportada numa estrutura de celeron

Para se conceber a espira é feita uma junção em ponte. As extremidades são unidas através de uma secção que se encontra invertida de forma a corrente não passar pelo substrato, pois não se sabe se o mesmo é condutor. As extremidades da secção são unidas com pasta de solda. A pasta de solda é composta por uma liga de estanho (96.5%) e prata (3.5%), que pela sua consistência a soldadura seja feita adequadamente e com a menor resistência possível, representado na Figura 4.6. A pasta de solda tem o seu ponto de fusão a 446 K. O procedimento de concepção da junção foi feita sequencialmente da seguinte forma:

- A fita é medida com o comprimento do perímetro necessário e é seccionada. De seguida, secciona-se um pequeno segmento, no âmbito desta dissertação tem o comprimento de três centímetros.
- Coloca-se a pasta de solda de forma sinusoidal na pequena porção.
- Coloca-se papel vegetal no molde para a fita não ficar soldada ao molde.
- Sobrepõem-se as fitas com a solda e coloca-se o papel vegetal no topo e colocar o topo do molde.
- O molde é apertado e no topo aperta-se moderadamente os parafusos para não danificar a fita.
- O molde com a fita vai ao forno tendo um tratamento térmico, ventilado numa atmosfera redutora ou sem ventilação.

As espiras têm tratamentos térmicos distintos. As espiras das fases um e três estão a 523 K durante 60 minutos. As espiras da fase dois estão a 503 K durante 20 minutos. Após o tratamento térmico o molde fechado deverá arrefecer à temperatura ambiente durante 5 horas, para a solda solidificar correctamente. O molde é composto por aço inoxidável, disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade Nova de Lisboa, para a fita ficar com a forma de espira, como se observa na Figura 4.5. No anexo 3 se encontra o desenho técnico dos suportes e no anexo 5 as fotografias documentando o processo de concepção da espira com fita 2G.

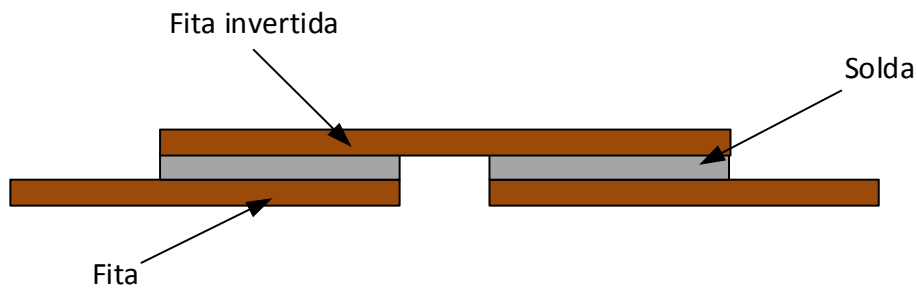


Figura 4.5 - Representação de como é feita a junção da fita para formar uma espira



Figura 4.6 - Molde em aço inoxidável que permite colocar a fita no forno

4.5 Crióstato

O crióstato tem como objectivo conseguir manter a fita no estado supercondutor, que se encontra mergulhada à temperatura de 77 K. O LCSTI necessita de três crióstatos, um para cada fase respectivamente, como se verifica na Figura 4.7. O material consiste em poliestireno extrudido (XPS), que a principal propriedade é a sua condutividade térmica reduzida, que permite manter o azoto no estado líquido por um período de tempo alargado e no qual é acessível.

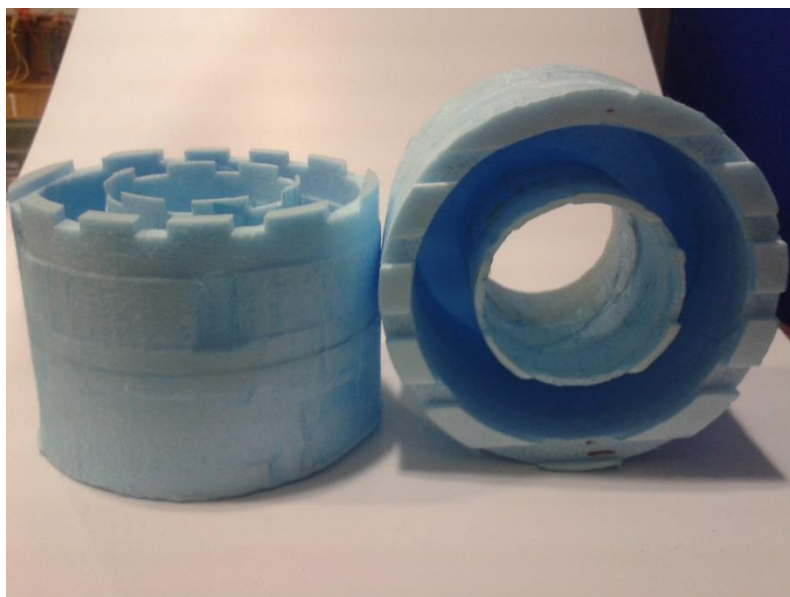


Figura 4.7 - Crióstatos utilizados no protótipo

Dado este material comercializado na forma de placas, para ser possível o fabrico dos crióstatos, necessitou-se de sobrepor várias placas e de serem coladas, o produto utilizado mantém as suas propriedades a 77 K. A partir de uma máquina desenvolvida no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade Nova de Lisboa com a autoria de Nuno Vilhena, é possível fazer recorte cilíndricos nas placas de XPS e ter a forma pretendida, com se encontra demonstrado na Figura 4.8. O anexo 4 contém o desenho técnico e medidas dos crióstatos utilizados.

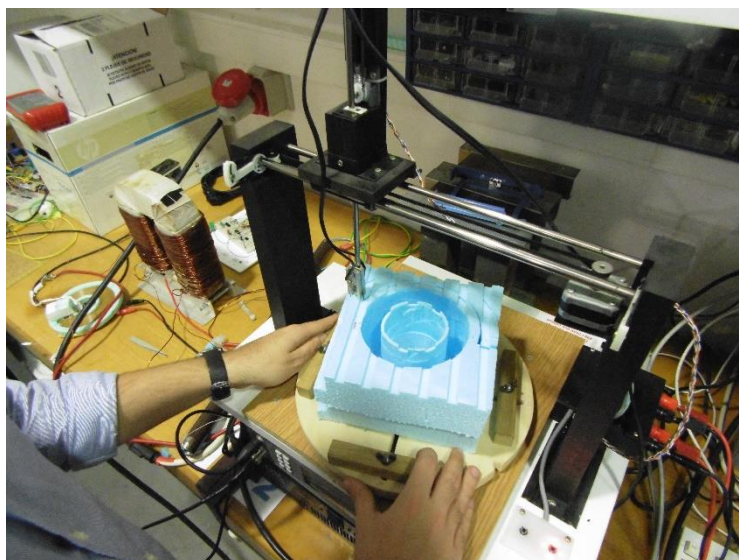


Figura 4.8 - Processo de fabrico do crióstato

4.6 Placa de Aquisição de Dados

A leitura dos sinais para podermos verificar a limitação e desempenho do LCSTI é feita através de uma placa de aquisição de dados (PAD). A placa utilizada é a NI-6009, cujo fabricante é a National Instruments. A Figura 4.9 revela o aspecto exterior do dispositivo.



Figura 4.9 - Placa de aquisição NI-6008. Retirado de <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/201986> última acesso dia 15 de Setembro de 2014

Os dados no computador são recolhidos através do *Software Labview Signal Express*. As especificações da placa encontram-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Especificações da placa de aquisição de dados

Número de Entradas	8
Resolução de Entrada	12 bits
Taxa de Amostragem	10000 Amostras por segundo

Os valores máximos que o dispositivo consegue ler é de ± 10 V. Devido à tensão da linha ser muito superior à de leitura têm de ser feitas montagens com amplificadores operacionais, mais especificamente uma montagem subtratora, ilustrada na Figura 4.10.

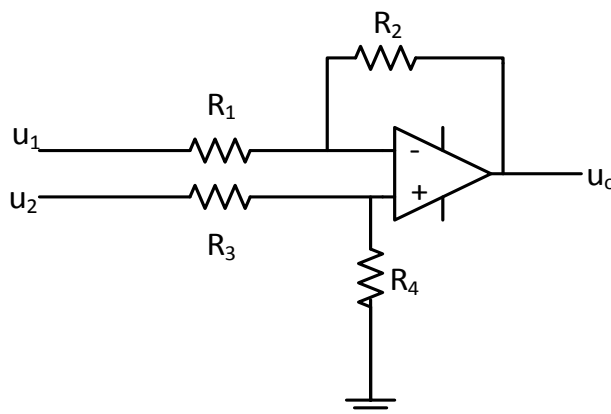


Figura 4.10 - Montagem subtratora com amplificador operacional

$$u_o = \frac{R_2}{R_1}(u_2 - u_1) = G(u_2 - u_1) \quad (4.1)$$

Resultado desta montagem temos uma expressão, onde $R_1 = R_3$ e $R_2 = R_4$:

A variável G é o ganho da montagem. Esta montagem tem como objectivo ler as tensões e correntes das fases correspondentes.

Para a leitura do fluxo é necessário adicionar à montagem subtratora um integrador, pois não é possível ler directamente o fluxo, como se observa na Figura 4.11. Existe uma captação do fluxo

através de uma bobina que se encontra junto ao enrolamento primário. A bobine possui uma tensão aos seus terminais que pela lei de Faraday é a derivada no tempo do fluxo presente. Pode-se visualizar na figura 4.12 a implementação do sistema de aquisição de dados em laboratório.

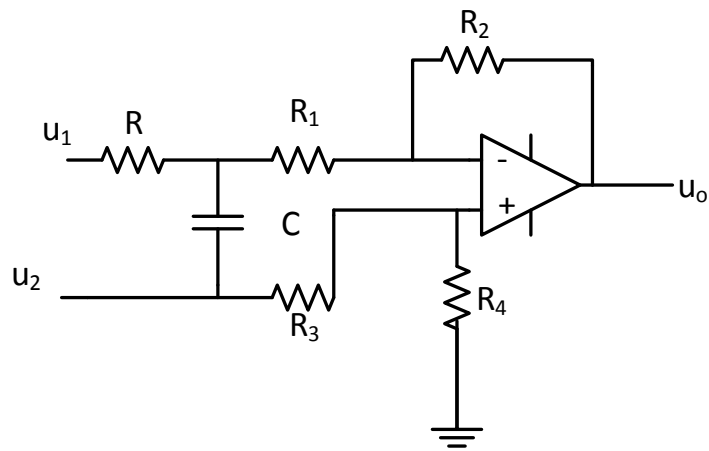


Figura 4.11 - Montagem subtratora com integração

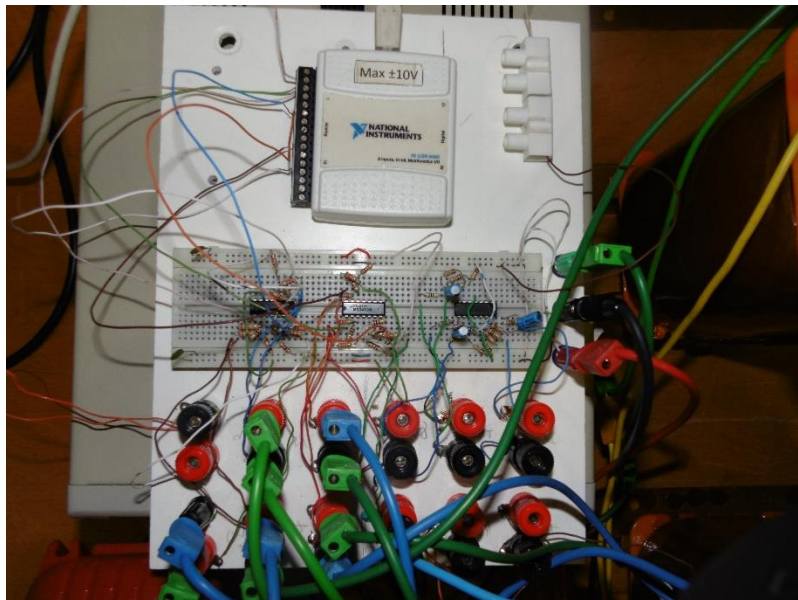


Figura 4.12 - Implementação das montagens para o acondicionamento de sinal obtida a partir dos ensaios.

4.7 Ciclo Máximo de histerese

Após saber-se as dimensões de cada componente do LCSTI, encontram-se reunidas as condições de poder calcular o ciclo máximo de histerese com as expressões (4.23), (4.24) e (4.25), que se encontra representado na figura 4.13.

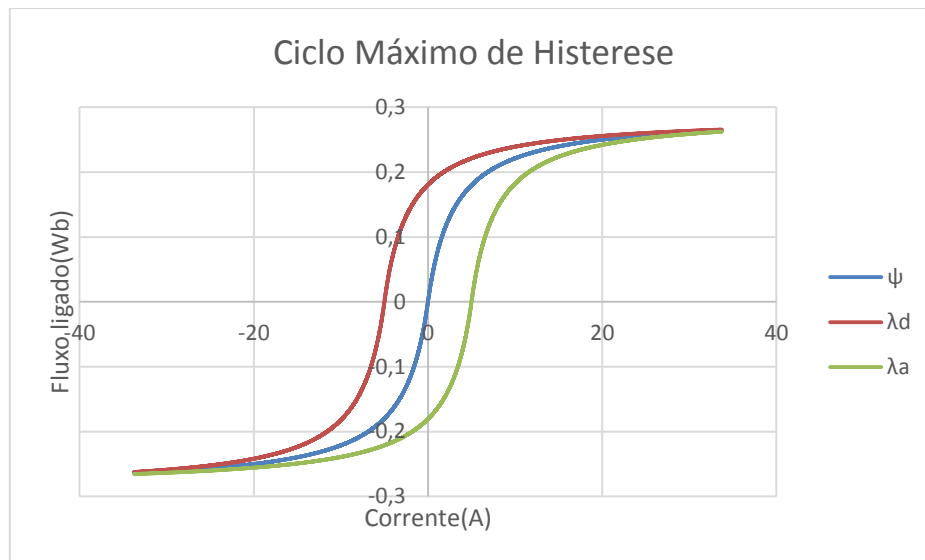


Figura 4.13 - Ciclo máximo de histerese calculado a partir das características do LCSTI.

4.8 Síntese

Durante este capítulo verificou-se os vários aspectos construtivos do protótipo desde das suas componentes eléctricas como das suas componentes magnéticas.

Os requisitos propostos e algumas considerações permitiram o dimensionamento, baseado na metodologia do capítulo três. Verifica-se em detalhe a elaboração do enrolamento primário e secundário e em que materiais se encontram suportados e como se pode acondicionar o enrolamento secundário de forma a conseguir manter a temperatura do supercondutor à temperatura de 77 K. A junção feita no elemento supercondutor permite que haja pouca resistividade que possa criar pontos de calor e danificar a fita supercondutora. As várias topologias que o núcleo trifásico pode adoptar foram revistas neste capítulo, o tipo *Shell* e o tipo tradicional.

A aquisição dos dados é componente muito importante da construção do protótipo, pois permite a aquisição e acondicionamento de sinais de forma a poderem ser registados para a sua posterior interpretação para poder serem retiradas as conclusões deste estudo da melhor forma. Foram revistas as especificações dos dispositivos utilizados e de montagens com amplificadores operacionais que permitem a leitura dos dados.

5 Procedimento Experimental, Resultados Obtidos e Discussão

Durante este capítulo descreve-se o modo dos ensaios experimentais, podendo se verificar a montagem ilustrativamente na Figura 5.1, analisam-se e discutem-se os resultados obtidos. Fazem-se dois ensaios por cada tipo de defeito, devido à placa de aquisição de dados em causa descrita ter apenas oito canais de entrada e serem necessário adquirir no total doze leituras. No primeiro ensaio adquirem-se os valores do fluxo ligado do núcleo ferromagnético e da corrente na linha e no segundo ensaio retiram-se os valores de tensão por cada fase e tensão aos terminais do primário. Os tipos de defeito a serem alvos de ensaio são as seguintes:

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

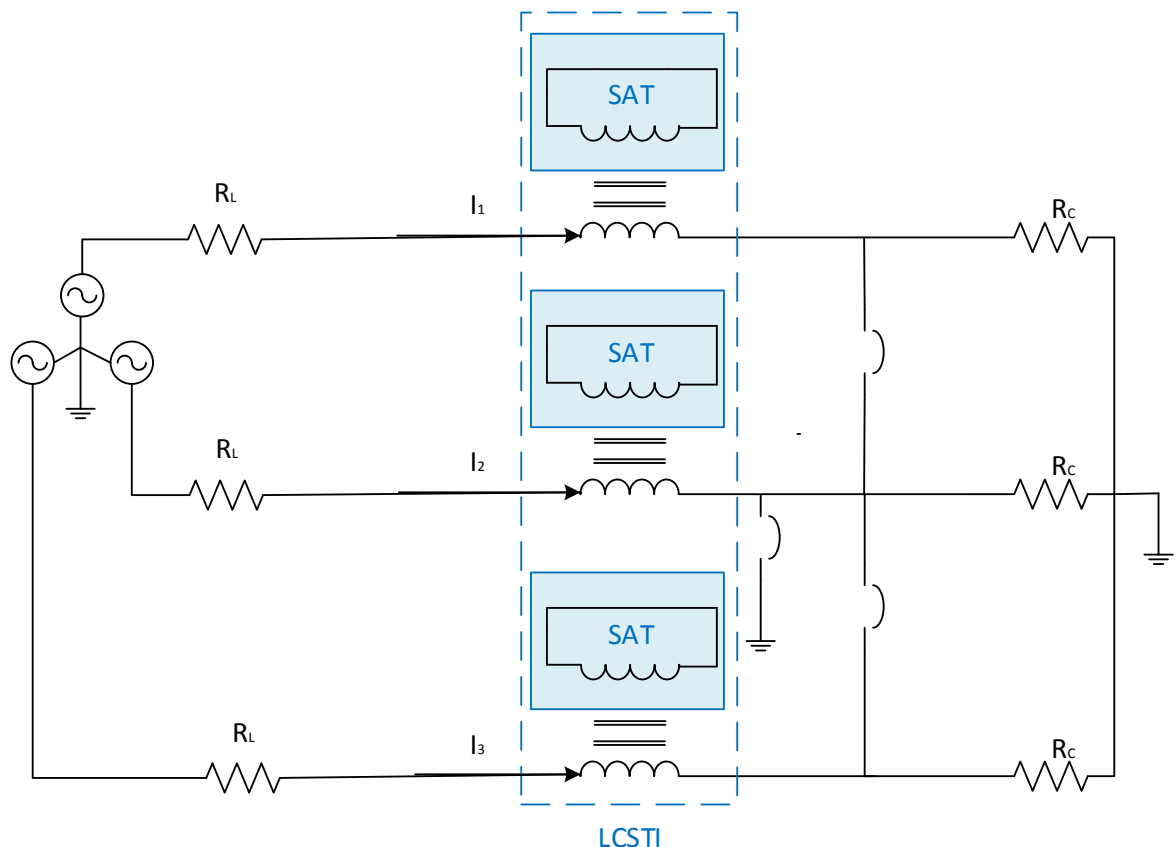


Figura 5.1 - Esquema de ensaio do LCSTI

Por cada tipologia de LCSTI ensaiam-se os variados tipos de falha existente. Antes do procedimento experimental realizado, faz-se o ensaio das correntes de curto-circuito presumidas para cada tipo de defeito sem a presença do LCSTI, para se poder saber a percentagem de limitação do dispositivo. Reduziu-se a tensão da linha e obtemos proporcionalmente as correntes de curto-circuito.

Esta situação deve-se à prevenção de danos nos equipamentos de laboratório. Na Figura 5.2 mostra como se reduziu a tensão e isolou-se o circuito de ensaio, através de esquema unifilar para uma melhor percepção.

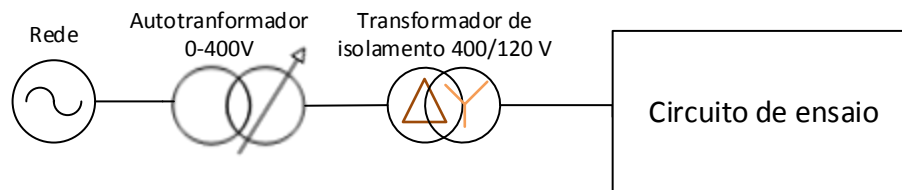


Figura 5.2 - Esquema Unifilar do circuito de ligação à rede

Os elementos constituintes da montagem são as seguintes:

- Resistência de linha de $1\Omega, R_L$.
- Resistência de carga de $23\Omega, R_C$.
- Tensão simples de 60 V.

As diversas leituras feitas através dos instrumentos de medidas estão sujeitas a erros sistemáticos que pode ter origem ambiental, tais como, temperatura, humidade, pressão e ainda a influência de campo eletromagnéticos. Os erros de origem aleatória são devidos ao ruído de sinal na placa de aquisição de dados.

5.1 Correntes de Curto-Circuito Presumidas

Para se poder observar o poder de limitação e a sua posterior comparação, é necessário saber-se o valor das correntes criadas na montagem sem a presença do LCSTI. O cálculo das correntes de curto-circuito sem a presença do LCSTI é feito através de ensaio com a tensão simples do valor nominal.

5.1.1 Curto-Circuito Fase-Terra

Estes defeitos são os mais comuns e com intensidade superior. Ligou-se uma das fases da montagem à terra, no caso desta montagem é a fase a. Na Figura 5.3 verifica-se a forma de onda deste ensaio. O pico de corrente deste ensaio situa-se nos 59,6 A.

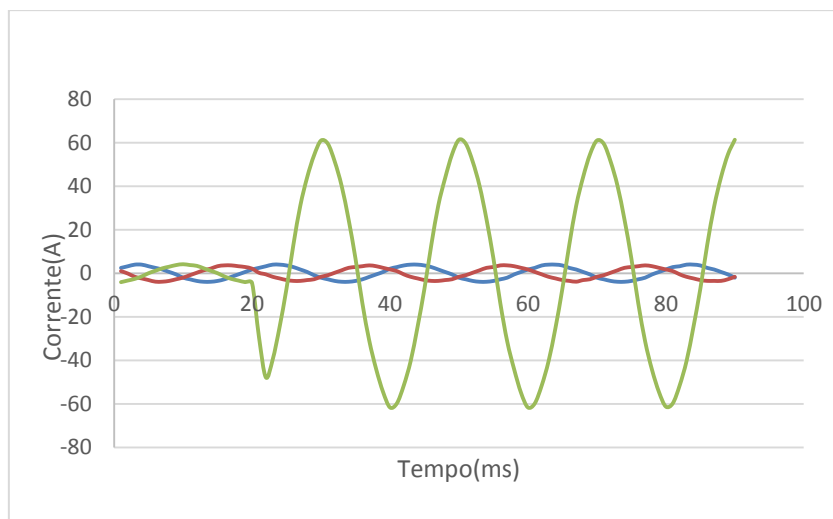


Figura 5.3 - Ensaio da corrente presumida no defeito fase-terra

A falha fase-terra afecta apenas uma fase, as outras duas fases da montagem permaneceram sem alterações.

5.1.2 Curto-Circuito Fase-Fase

A ligação entre duas fases é o que caracteriza este tipo de defeito da linha. Na montagem de ensaio a ligação foi feita através de um interruptor, como se encontra demonstrado no esquema de ensaio. O valor máximo de corrente registado neste defeito é de 49,4 A, como se verifica na Figura 5.4.

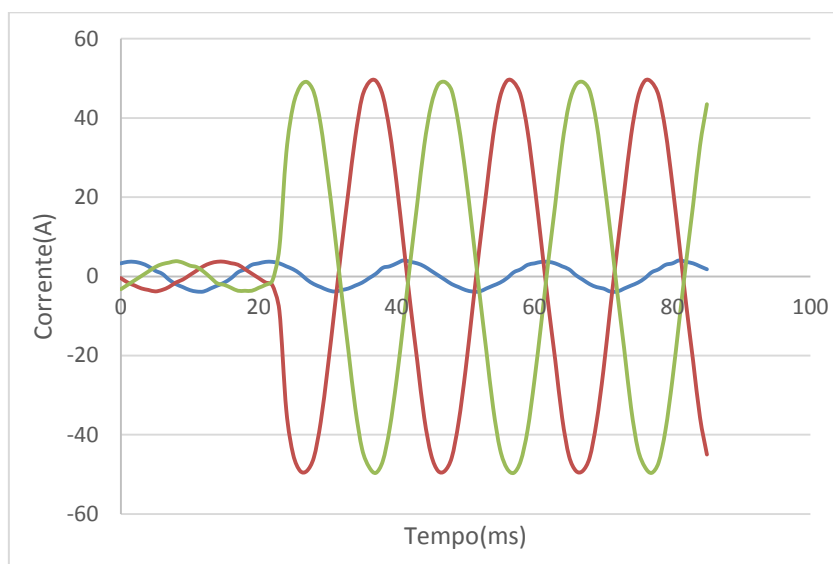


Figura 5.4 - Curvas das correntes de curto-circuito fase-fase

As fases que se encontram em curto-circuito encontram-se em fases opostas, ou seja, encontram-se as correntes desfasadas de 180° .

5.1.3 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

Semelhante ao defeito da secção anterior tem-se a ligação entre fases, mas este defeito encontra-se também ligado à terra. Pode-se verificar na Figura 5.5 a forma da onda sinusoidal após a falha. O valor de pico deste defeito é de 58,3 A. O valor de pico nas entre as duas fases é distinto, esta situação deve-se ao defeito nas condições laboratoriais a falha não ser franca devido a vários factores, tais como por exemplo o interruptor utilizado.

Ao contrário do defeito fase-fase, nesta falha as fases têm o desfasamento característico do sistema trifásico, cujo desfasamento é de 120° .

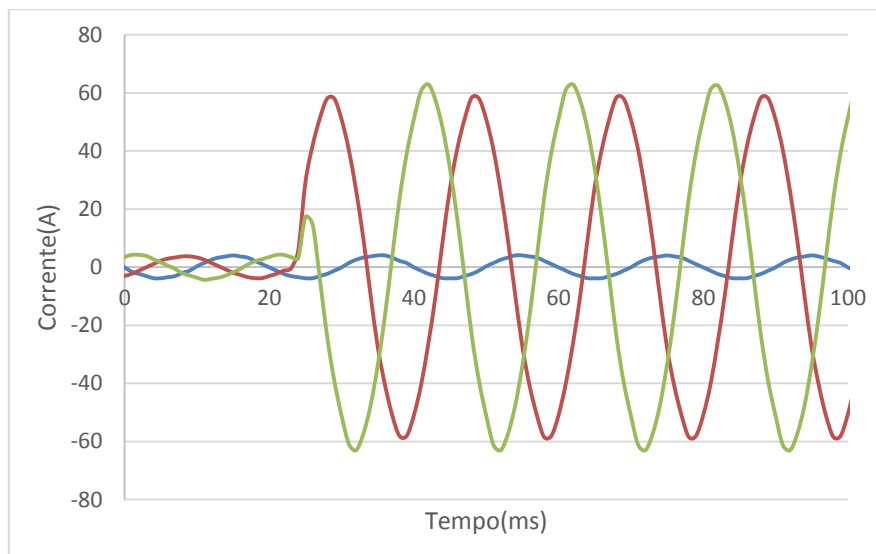


Figura 5.5 - Forma de onda do ensaio de correntes presumidas na falha fase-fase-terra

5.1.4 Curto-Circuito Trifásico

No curto-circuito trifásico fecham-se os interruptores entre fases e da terra, colocando no mesmo nó todas as fases. Na Figura 5.6 verifica-se a forma de onda deste tipo de falha.

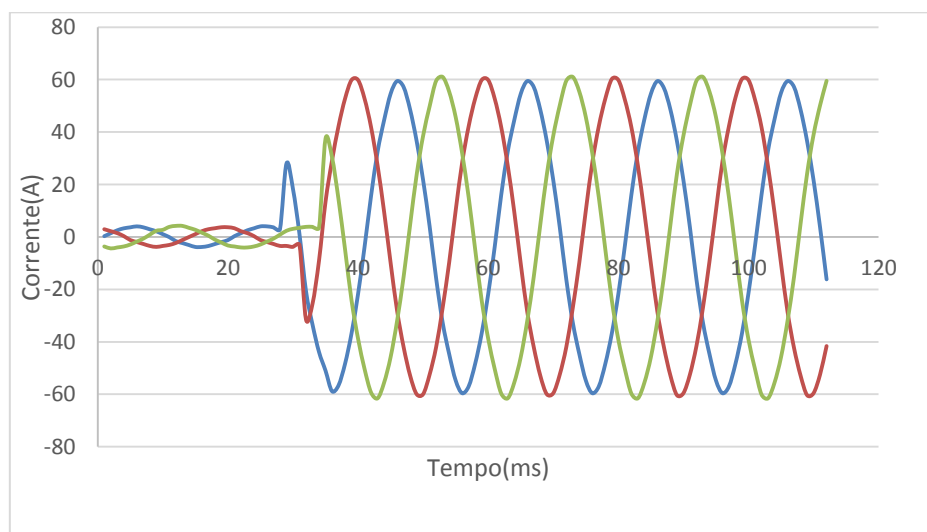


Figura 5.6 - Resultados do ensaio de curto-circuito trifásico

Neste ensaio verifica-se um pico de corrente igual em todas as fases com o valor de 59,4 A. Verifica-se um aumento abrupto do valor da corrente. Verificam-se que as fases tomam a forma de onda de curto-circuito em tempos diferentes, pois os interruptores não fecharam exactamente no mesmo instante, mas apenas com alguns milissegundos de diferença.

5.2 Procedimento Experimental

Os ensaios das duas topologias para comparação de resultados são organizadas de forma a ter-se os resultados dos variados defeitos já referidos anteriormente. A descrição dos ensaios é referida a apenas uma das topologias, pois o procedimento experimental é igual nos dois LCSTI.

Os resultados para cada defeito são obtidos através de dois ensaios nos quais se pretende obter grandezas diferentes. Esta situação é devida ao reduzido número de canais da PAD utilizada ter apenas oito canais e serem necessários doze canais analógicos. O primeiro ensaio irá recolher a corrente na linha e fluxo ligado no núcleo ferromagnético, durante a falha em causa. O segundo ensaio recolhe a tensão da fase e a queda de tensão no enrolamento primário. As medições são feitas nas três fases que compõe o LCSTI. Na Figura 5.7 e 5.8 ilustram-se os ensaios e verifica-se de que forma é feita a medição das grandezas apenas em uma fase, dado que nas restantes fases a aquisição dos sinais é feita da mesma forma.

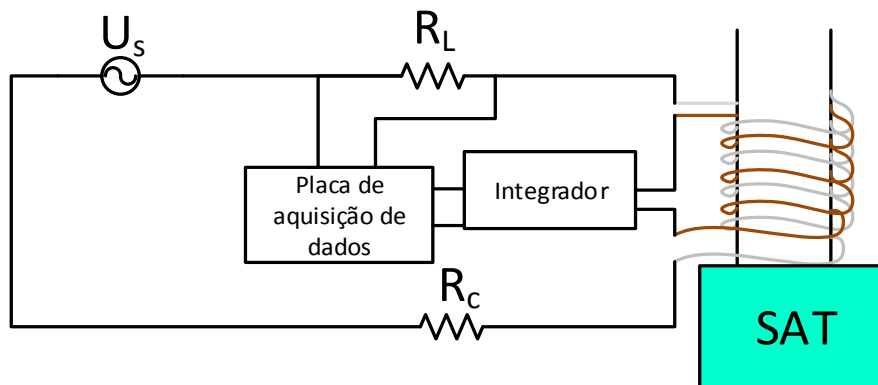


Figura 5.7 - Ensaio onde é obtido a corrente na linha e fluxo no núcleo ferromagnético

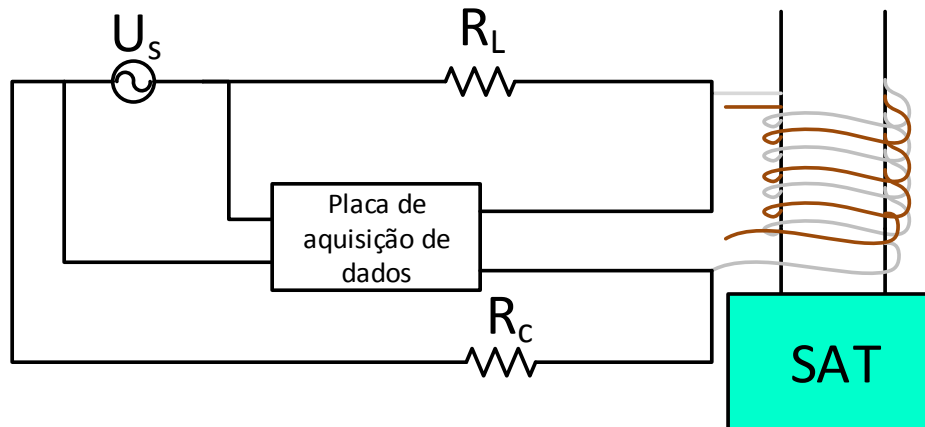


Figura 5.8 - Ensaio onde é obtido a tensão de fase e aos terminais do primário

Para se conseguir uma tensão nominal na montagem para ensaio é necessário ligar à rede eléctrica um auto-transformador trifásico de 400V que se encontra ligado em triângulo com os três transformadores monofásicos de isolamento, cujo secundário se encontra ligado em estrela permitindo alimentar o circuito de ensaio da forma pretendida. Na figura 5.9 temos a fotografia da montagem de ensaio.

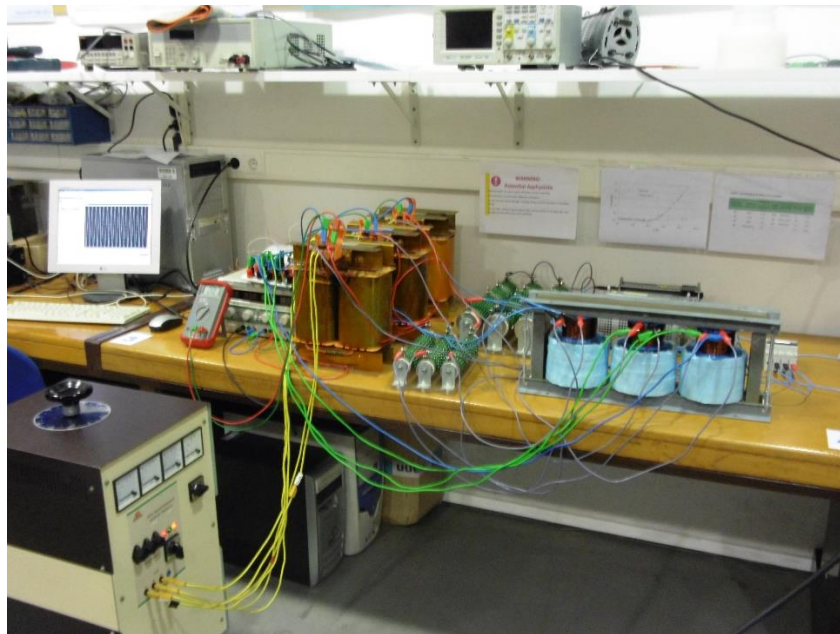


Figura 5.9 - Montagem experimental de ensaio do desempenho do LCSTI

5.3 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos são divididos pelos dois ensaios realizados com as duas topologias de LCSTI, destacando-se os resultados obtidos que permitem verificar a limitação da corrente na linha. Cada tipologia irá ter dois ensaios por cada tipo de defeito. Esta secção destina-se aos resultados obtidos experimentalmente através em ambas as formas de núcleo referidas ao longo da dissertação,

considerando as diversas falhas provocadas propositalmente no circuito de ensaio. O foco dos resultados apresentados é direcionado para o desempenho do limitador.

5.3.1 Falha Fase-Terra

Os resultados obtidos, a partir dos ensaios feitos na tipologia *Shell* e tradicional, permitem conceber a característica do núcleo ferromagnético, mostrado para cada fase, tal como se encontra na Figura 5.10. Na Figura 5.11 pode observar-se a limitação do LCSTI nas correntes do circuito no decorrer da falha, estando presente as correntes de todas as três fases da montagem.

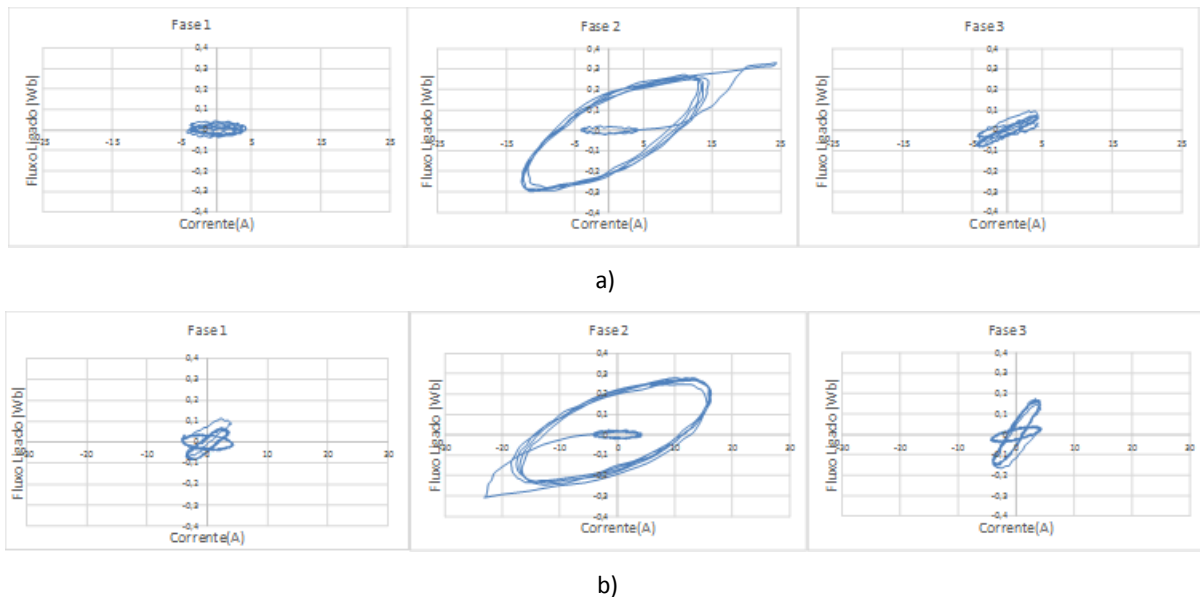
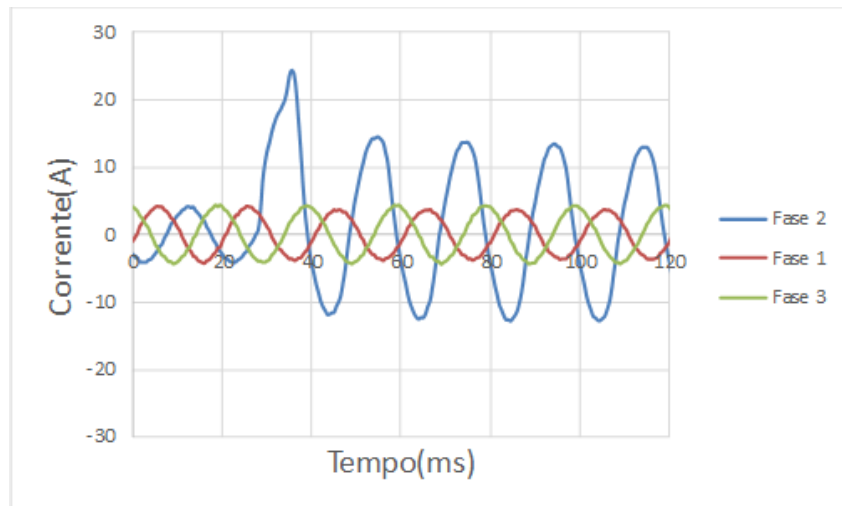


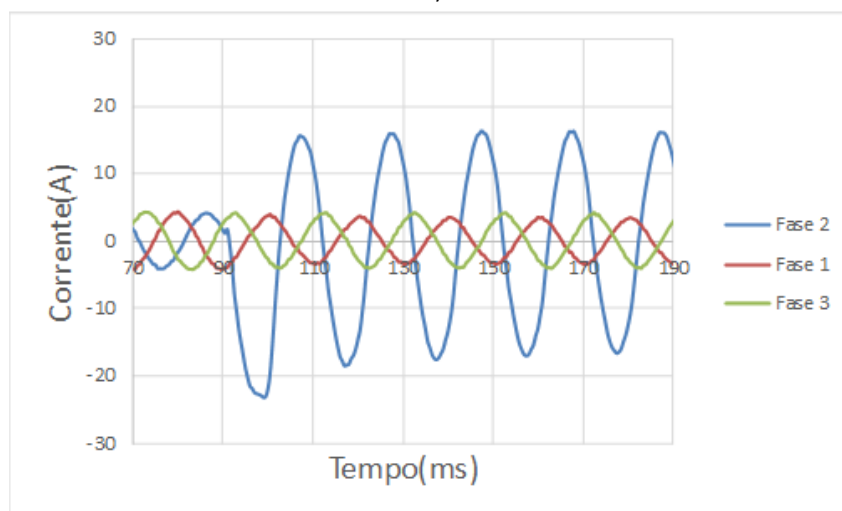
Figura 5.10 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito fase-terra. a) Núcleo do tipo *Shell* b) Núcleo tradicional.

No LCSTI cujo núcleo é da tipologia *Shell*, verifica-se o ciclo de histerese, característico da limitação de corrente, na fase em falha no qual não se verifica saturação do núcleo, excepto na transição do regime normal para o regime de falha. As restantes fases apresentam ciclo de histerese muito reduzido, podendo ser desprezada, o que indica que existe blindagem magnética por parte do supercondutor.

Na tipologia tradicional o ciclo de histerese é semelhante à tipologia do tipo *shell* na fase em falha, no entanto o transitório tem valor mais baixo devido à falha ocorrer num ponto distinto do período da onda. Constata-se que nas restantes fases existe um aumento de fluxo que apesar de adoptar a forma do ciclo de histerese de limitação registada na fase dois, não tem amplitude para ser considerado como estando a limitar como se observa na fase dois, indicando uma penetração de fluxo magnético nas colunas exteriores de fases resultante da limitação de corrente da fase dois.



a)



b)

Figura 5.11 - Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha fase-terra. a) Tipologia *Shell*. b) Tipologia tradicional.

A corrente durante a falha é limitada em ambas as topologias, no tipo *Shell* verifica-se uma amplitude de corrente em regime estacionário de 14,4 A. No primeiro meio-ciclo de onda verifica-se um pico de 24,4 A, devido ao transitório que também tem limitação, mas onde não tem tanta eficácia.

Com o núcleo ferromagnético tradicional, a amplitude de corrente existente em regime permanente é de 17 A, e o seu transitório no primeiro meio-ciclo da falha tem a amplitude de 23 A. Os dois ensaios evidenciam limitações semelhantes no defeito fase-terra.

5.3.2 Falha Fase-Fase

Ao provocar o defeito fase-fase com o LCSTI obtém-se o fluxo ligado em função da corrente na linha em cada fase, como se encontra na Figura 5.13. No ensaio seguinte fez-se a leitura das correntes nas fases em que se verifica o defeito linha e que se encontra na Figura 5.14.

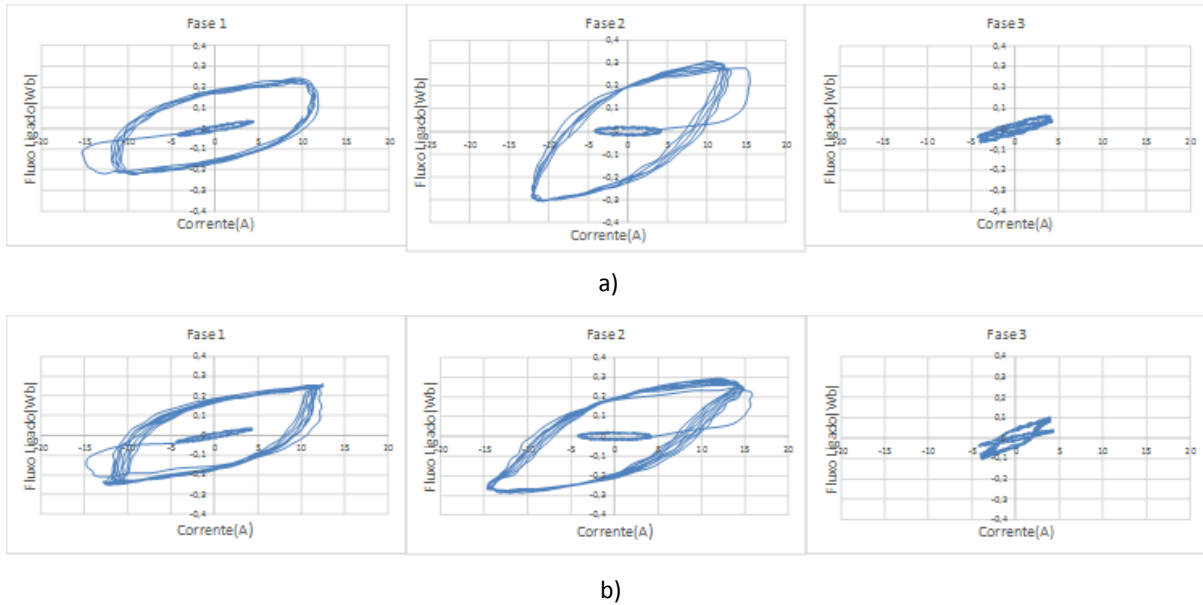
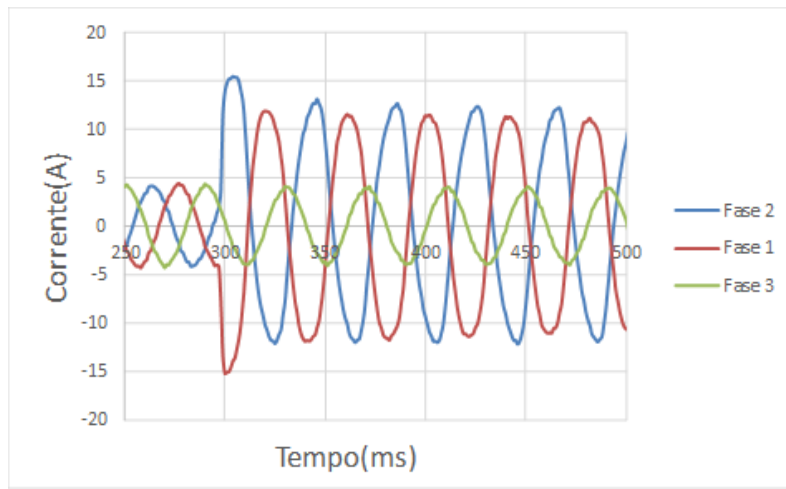


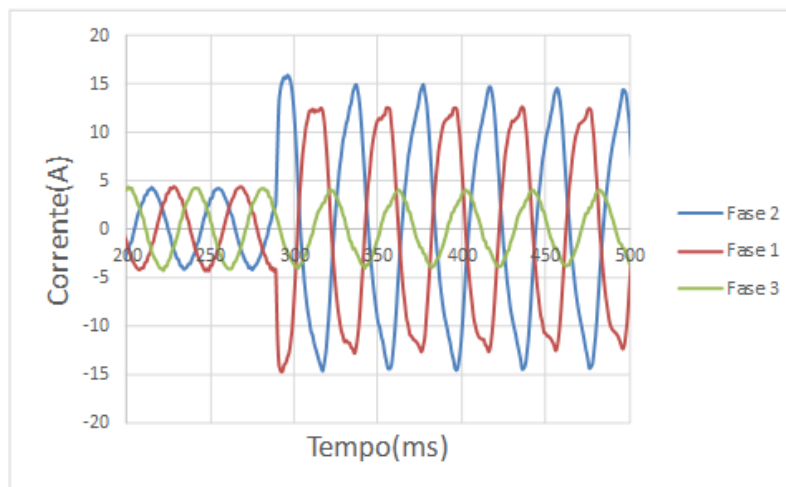
Figura 5.12 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito fase-fase. a) Núcleo do tipo *Shell* b) Núcleo tradicional.

Nos ensaios realizados para as duas configurações de limitador verifica-se a blindagem em todas as fases em regime normal, que após a simulação do defeito é formado o ciclo de histerese típico da limitação do supercondutor nas fases um e dois. Na forma que os ciclos de histerese adoptam revela-se que o núcleo se encontra próximo da saturação, devido ao aumento do fluxo que circula nas travessas e colunas exteriores pelo maior número de fontes de campo magnético. Durante o transitório verifica-se um aumento da corrente que não se traduz num aumento do fluxo ligado que indica que a limitação é inferior neste espaço de tempo.

No ensaio realizado com o LCSTI do tipo *Shell*, a fase três verifica-se a blindagem magnética do enrolamento secundário pelo reduzido fluxo, quer em regime normal quer em regime de falha. A penetração de fluxo na fase três resultante da falha simulada com a tipologia tradicional indica que parte do caminho percorrido pelo fluxo gerado se fecha pela coluna da fase em causa. A forma da característica indica a possibilidade da fase três se encontrar em saturação no entanto as amplitudes de fluxo ligado apresentados estão longe de alcançar o ponto de saturação para a dimensão da secção do núcleo ferromagnético.



a)



b)

Figura 5.13 - Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha fase-fase. a) Tipologia *Shell*. b) Tipologia tradicional.

A corrente após a falha é limitada em ambos os ensaios, a amplitude da corrente no ensaio do LCSTI com núcleo de três colunas em regime permanente é de 14,2 A. No ensaio com o limitador com o núcleo *Shell* a amplitude da corrente é de 12,4 A. Em ambos os ensaios a amplitude de corrente verificada durante o regime transitório encontra-se com valores aproximados do regime permanente. Entre as fases que se encontram em limitação existe diferenças nas suas amplitudes com um valor de 1 A, no caso no núcleo de cinco colunas, e de 2,8 A no limitador com a configuração tradicional.

A forma de onda da corrente que se apura a partir dos ensaios tem distorção da sua forma sinusoidal, devido ao núcleo ferromagnético encontra-se perto da saturação.

5.3.3 Falha Fase-Fase-Terra

Semelhante ao defeito visto anteriormente, para vermos o desempenho do limitador tem-se por cada fase o gráfico de fluxo ligado observado no núcleo ferromagnético e a corrente observado na linha anteriormente e posteriormente à falha provocada no circuito a ensaiar, como se encontra

exposto na Figura 5.16. O andamento da corrente limitada no tempo nas fases em que se verifica o defeito está exposto na Figura 5.17.

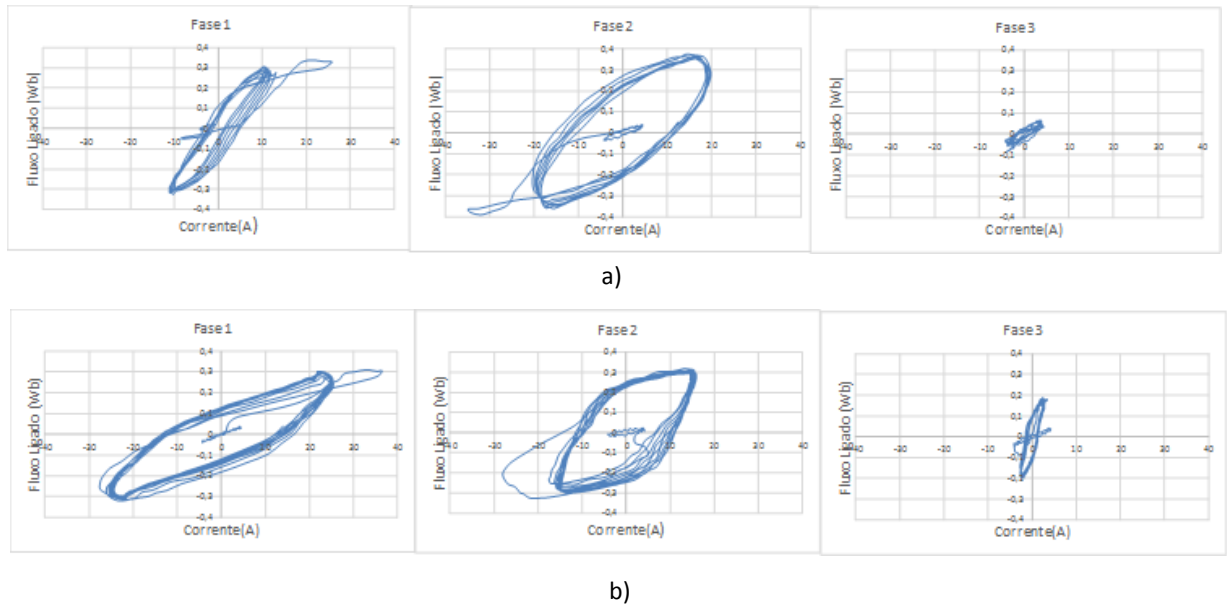
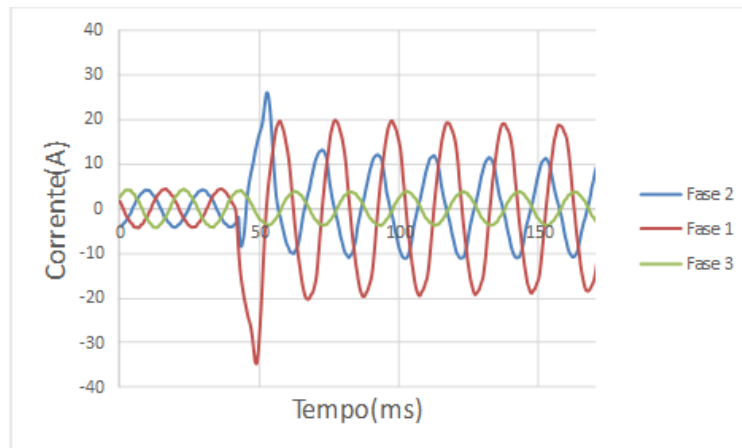


Figura 5.14 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito fase-fase-terra. a) Núcleo do tipo *Shell* b) Núcleo tradicional.

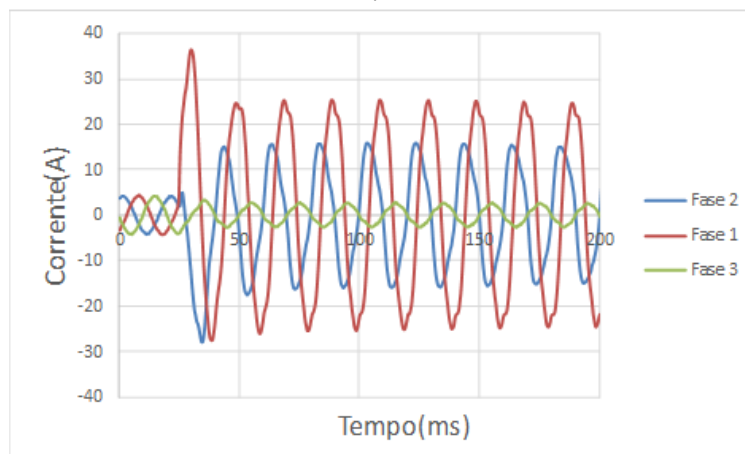
À semelhança com os resultados obtidos na falha fase-fase, apresentam-se nas duas topologias de limitação nas fases um e dois. Em regime normal todas as fases do LCSTI se encontram a blindar magneticamente quer o núcleo do tipo *Shell* quer a tipologia tradicional.

Verifica-se um ciclo de histerese com maior área na fase dois no limitador composto por cinco colunas, onde a fita supercondutora foi soldada a uma temperatura menor. A fase três encontra-se blindada magneticamente o que pode ser visto pelo reduzido valor de fluxo ligado.

A característica fluxo-corrente da fase dois na tipologia tradicional acentua a forma de saturação devido ao campo magnético gerado pelas correntes CC. Semelhante dos distintos ensaios na fase três existe uma penetração de fluxo gerado a partir das fases em defeito. A forma do ciclo de histerese verificada na fase um é invulgar, devido às interações de fluxo ligado entre a fase um e dois, não sendo perceptível a relação entre si.



a)



b)

Figura 5.15 - Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha fase-fase-terra. a) Tipologia *Shell*. b) Tipologia tradicional.

Em ambos os ensaios existiu limitação, sendo superior na fase dois e com uma amplitude superior na regime transitório em falha.

No LCSTI que contém cinco colunas tem-se uma corrente com amplitude de 19,5 A na fase um e de 11,9 A na fase dois, em contraste com a fase três a corrente de linha se encontra inalterada.

Com a tipologia tradicional existe uma corrente com amplitude de 17,6 A na fase dois e de 19,5 A na fase um. A forma de onda de corrente encontra-se alterada, tal como foi indicado na falha fase-fase, a saturação do núcleo ferromagnético introduz distorção harmónica da corrente na linha.

5.3.4 Falha Trifásica

Na falha trifásica é necessário ver-se o desempenho dos LCSTI através da sua característica fluxo-corrente na Figura 5.16 e na Figura 5.17 onde se tem o da corrente na linha durante o defeito.

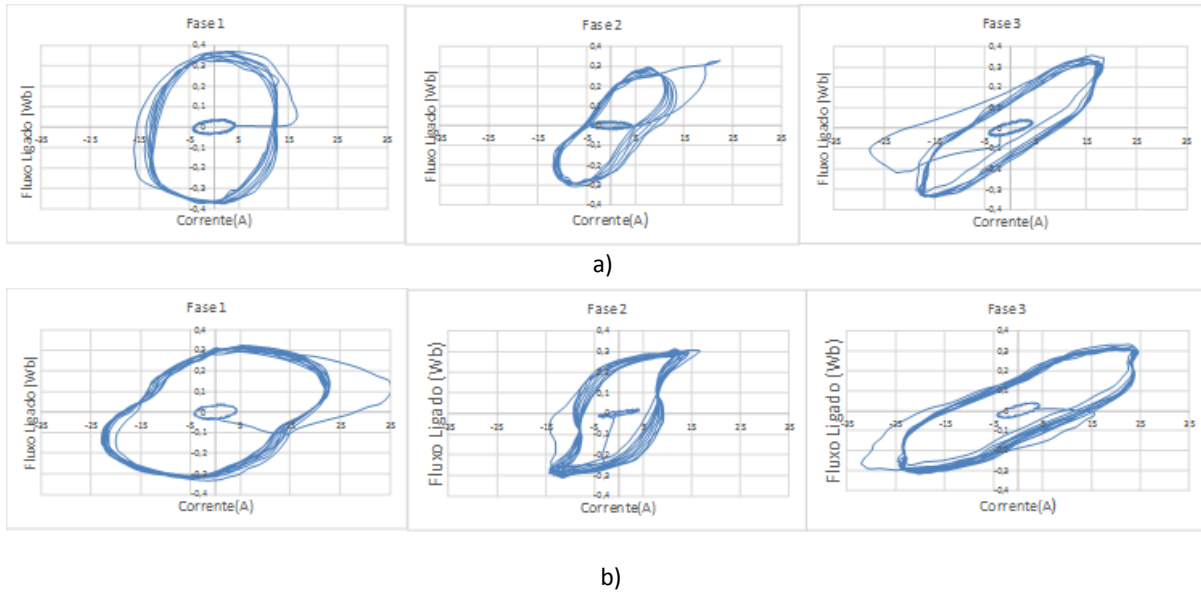
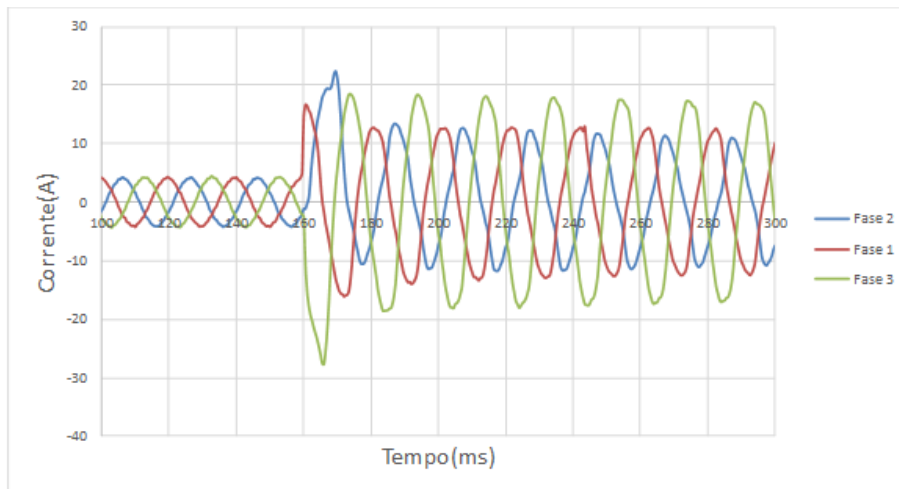


Figura 5.16 - Gráfico do fluxo ligado em função da corrente em cada fase do LCSTI defeito trifásico. a) Núcleo do tipo *Shell* b) Núcleo tradicional.

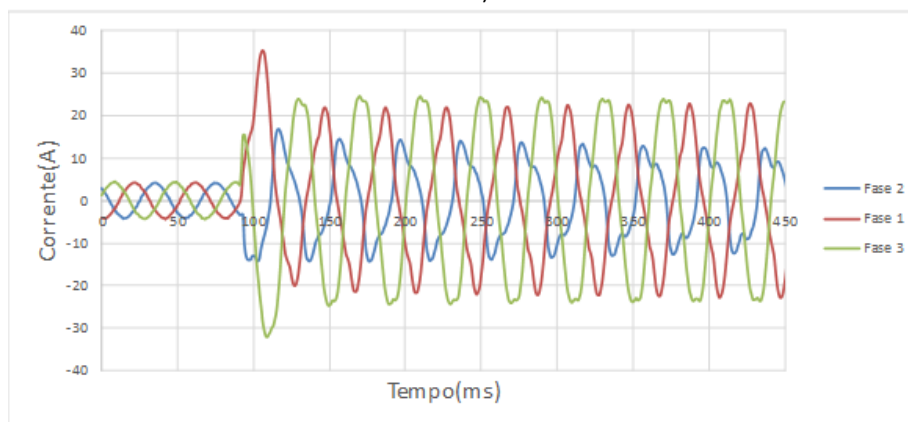
Neste defeito em todas as fases existe um ciclo de histerese que indica a existência de limitação. Ambos os tipos de núcleo na fase um onde ciclo tem uma forma aproximadamente circular. A ausência de forma de um ciclo de histerese magnético convencional deve-se à interação de fluxos ligados que se encontram desfasados.

Na fase dois do ensaio realizado com o LCSTI tradicional observa-se uma nítida saturação do núcleo, pela forma do ciclo de histerese. No ensaio com a tipologia *Shell* verifica-se que o ciclo de histerese se aproxima da zona de saturação, pela alteração verificada nos seus ramos ascendentes e descendentes da característica.

Na fase três em ambos os ensaios os ciclos de histereses são idênticos na sua amplitude e forma. Em todas as fases em regime normal de funcionamento o fluxo ligado tem valores reduzidos, que traduz o cancelamento da força magnetomotriz do primário.



a)



b)

Figura 5.17 – Gráfico da corrente em função do tempo na fase afectada pelo curto-circuito em falha trifásica. a) Topologia *Shell*. b) Topologia tradicional.

A limitação verificada na topologia do tipo *Shell* é ligeiramente superior à limitação verificada na topologia tradicional.

A forma de onda do limitador composto por cinco colunas não tem qualquer distorção da sua forma sinusoidal. As fases um e dois têm como amplitudes de corrente em regime permanente de 13,4 A e a fase três tem uma amplitude de 18,1 A.

Com o núcleo de três colunas tem-se três amplitudes diferentes de corrente para cada fase, onde na fase um se tem uma amplitude de 13,4 A na fase dois de 14,5 A e na fase três de 18,1. A saturação do núcleo verifica-se pela distorção da onda da corrente presente em todas as fases, onde é superior na fase dois dado a saturação do núcleo na coluna se encontrar mais saturado que nas restantes colunas do LCSTI.

5.4 Análise de Resultados

Após se verificar os resultados obtidos, existem condições de análise dos resultados e comparar as duas topologias centradas nesta dissertação. Nas tabelas 5.1 e 5.2 encontram-se os resultados

resumidos em cada tipologia. Os valores apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2 são as amplitudes de onda de cada grandeza.

Para se fazer a comparação entre estas duas topologias é necessário calcular a limitação através de percentagem, como se encontra exposto na equação (5.1). Outra grandeza em percentagem para comparação de topologias será a relação entre a tensão da fonte e a tensão aos terminais do enrolamento primário do LCSTI que é descrita pela equação (5.2.), permitindo verificar o impacto do limitador em regime normal e em regime de falha. As grandezas referidas são necessárias para analisar o impacto que o LCSTI tem na linha em regime normal e em regime de falha.

$$\text{Limitação da corrente}[\%] = 100 - \left(\frac{I_p}{I_L} \times 100 \right) \quad (5.1)$$

$$U_{LCS}[\%] = \frac{U_{LCS}}{U_{fonte}} \times 100 \quad (5.2)$$

Tabela 5.1 - Resultados obtidos no LCSTI do tipo shell

Tipo de Defeito	Fases	Funcionamento Normal					Funcionamento em Falha						
		I_L [A]	U_{fonte} [V]	U_{LCS} [V]	Ψ_{LCS} [Wb]	U_{LCS} [%]	I_L [A]	I_p [A]	U_{fonte} [V]	U_{LCS} [V]	Ψ_{LCS} [Wb]	Limitação [%]	U_{LCS} [%]
Fase-Terra	1	4.27	104.1	5.85	0.04	5.61	3.76	3.68	104.1	8.3	0.02	-	7.9
	2	4.22	103.9	5.75	0.02	5.54	14.4	59.5	102.4	99.8	0.33	75.7	97.4
	3	4.40	103.8	5.72	0.04	5.51	3.9	3.68	103.8	7.9	0.05	-	7.6
Fase-Fase	1	4.29	104.3	5.92	0.04	5.67	11.4	49.4	102.0	100.6	0.22	76.9	98.5
	2	4.34	104.1	5.85	0.02	5.62	12.4	49.4	102.0	100.3	0.29	74.8	98.3
	3	4.21	104	5.8	0.04	5.57	4.04	4.03	104	8.4	0.04	-	8.1
Fase-Fase-Terra	1	4.33	104.4	6.13	0.04	5.87	19.5	58.3	102.4	101.4	0.36	66.6	99.0
	2	4.43	104.2	6.09	0.02	5.84	11.9	58.3	102.4	101.6	0.33	79.5	99.2
	3	4.25	104.1	6.07	0.04	5.83	3.87	58.3	104.1	8.7	0.05	-	8.4
Trifásico	1	4.27	104.2	6.82	0.04	6.54	13.4	59.4	100.6	100.3	0.33	77.4	99.7
	2	4.28	104	6.68	0.02	6.42	13.4	59.4	100.4	100.2	0.31	77.4	99.8
	3	4.40	103.9	6.54	0.04	6.29	18.1	59.4	100.3	99.8	0.32	69.5	99.5

A limitação do dispositivo do tipo *Shell* verificada em todas as falhas está dentro do intervalo de 20% e 80%, segundo (Weinstock, 2000). Os dispositivos em regime normal têm como valor mais elevado de 6.54% de queda de tensão da fonte o que indica que este se encontra abaixo dos 10% de tolerância nos valores de tensão em barramentos (Chakrabarti, 2010). O mesmo se sucede nas fases

que não são afectadas pelos defeitos. No entanto existe um aumento da queda de tensão em falha. Na fase em que se encontra o defeito na queda de tensão no primário do LCSTI tem valores muito elevados o que confirma a limitação de corrente de defeito.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos no LCSTI tradicional

Tipo de Defeito	Fases	Funcionamento Normal					Funcionamento em Falha						
		I_L	U_{fonte}	U_{LCS}	Ψ_{LCS}	U_{LCS}	I_L	I_p	U_{fonte}	U_{LCS}	Ψ_{LCS}	Limitação	U_{LCS}
		[A]	[V]	[V]	[Wb]	[%]	[A]	[A]	[V]	[V]	[Wb]	[%]	[%]
Fase-Terra	1	4.27	104.1	6.01	0.04	5.77	3.76	3.68	104.1	8.4	0.02	-	8.1
	2	4.31	104	5.95	0.02	5.73	17.0	59.5	103.6	102.2	0.27	71.4	98.6
	3	4.40	103.8	5.76	0.04	5.55	3.9	3.68	103.8	7.8	0.05	-	7.5
Fase-Fase	1	4.29	104.3	6.06	0.04	5.81	11.4	49.4	103.6	102.4	0.22	76.9	98.8
	2	4.33	104.1	5.98	0.02	5.75	14.2	49.4	103.5	102.9	0.29	71.2	99.4
	3	4.21	104	5.74	0.04	5.51	4.04	4.03	104	8.1	0.04	-	7.8
Fase-Fase-Terra	1	4.33	104.4	5.34	0.04	5.1	19.5	58.3	102.3	100.5	0.36	66.6	98.2
	2	4.18	104.3	4.69	0.02	4.5	17.6	58.3	101.6	100.7	0.30	69.8	99.1
	3	4.25	104.1	4.82	0.04	4.6	3.87	58.3	104.1	6.4	0.05	-	6.1
Trifásico	1	4.27	104.2	6.04	0.04	5.79	13.4	59.4	100.3	92.5	0.31	77.4	92.2
	2	4.31	104.1	5.98	0.02	5.75	14.5	59.4	100.2	98.7	0.31	75.5	98.5
	3	4.40	103.9	5.87	0.04	5.64	18.1	59.4	100.2	93.8	0.31	69.5	93.1

Os valores de limitação da corrente de CC do LCSTI tradicional são inferiores, mas muito próximos dos valores registados com o LCSTI *Shell*. Os valores de fluxo ligado também não são muito distintos, tal como acontece com as correntes de limitadas.

Alguns fenómenos são comuns nos vários tipos de defeito e nas duas configurações de LCSTI:

- O aumento da tensão das fases aos terminais do limitador que não se encontram em falha e uma redução da corrente de linha indica uma limitação reduzida da corrente;
- O ligeiro aumento de fluxo na fase cujo não tem defeito sugere que existe penetração de fluxo ligado gerada pelas fases em falha, pois o ciclo de histerese adopta a forma de saturação do núcleo no entanto as amplitudes do fluxo são muito reduzidos; e
- Apesar do fluxo gerado pelo primário da própria fase encontra-se blindado, a penetração de fluxo por outras fases faz com que o secundário limite a corrente da linha. Esta situação acentua-se no núcleo tradicional por não existir um caminho magnético de fuga que existe no núcleo do limitador do tipo *Shell*. O número de espiras do secundário é insuficiente para evitar a penetração de fluxo das outras fases que se encontram com defeito.

A limitação entre fases é distinta nas várias falhas ensaiadas, deve-se às diferentes temperaturas e duração com que foram fabricadas as junções da fita supercondutora. No caso do secundário da fase um e três as propriedades supercondutoras da fita foram afectadas. Esta alteração é uma das causas das diferenças entre os ciclos de histerese das fases em regime de falha. Uma outra das causas para esta distinção é o circuito magnético visto de cada fase e as assimetrias de construção do núcleo.

Nos ensaios trifásicos a fase um tem ciclos de histerese que têm uma forma aproximadamente circular, devido à interação de fluxo gerados em várias fases em simultâneo que não é perceptível apenas com as leituras de fluxo ligado produzidas.

O núcleo do LCSTI tradicional satura mais frequentemente, devido às suas travessas conterem apenas metade da secção das colunas interiores e de não possuir um caminho magnético de fuga, tal como acontece no núcleo do tipo *Shell* onde as colunas exteriores têm essa função.

Após os ensaios verificou-se na fita supercondutora a ausência da camada de cobre em certos pontos, como se pode observar na Figura 5.18.



Figura 5.18 - Enrolamento secundário após os ensaios

Observou-se o aparecimento destas zonas sem cobre, provavelmente resultantes de pontos quentes (*hot-spots*) indicando a possível perda localizada do estado supercondutor onde existe um sobreaquecimento do ponto que levou a uma decapagem do cobre por efeito de calor, tal como acontece no tratamento térmico feito para soldar espiras das fases um e três.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

Após o ultimar do trabalho desenvolvido e análise dos seus resultados é necessário serem retiradas ilações e presumir trabalhos na continuidade desta dissertação.

Desenvolveu-se uma metodologia para o dimensionamento de LCSTI do tipo transformador onde o seu núcleo é dimensionado de forma iterativa e tendo como referência a característica magnética do núcleo.

Ao tentar prever o funcionamento da limitação do dispositivo, adaptou-se o cálculo do ciclo máximo de histerese para que este possa ser aplicado com um elemento superconductor que seja composto por várias espiras compostas por fita supercondutora 2G.

Ao fim de se comprovar a validade da metodologia de dimensionamento do LCSTI, procedeu-se ao ensaio de duas topologias, uma com uma configuração tradicional trifásica e outra com uma configuração *Shell*. Os resultados dos ensaios possibilitaram ver o seu desempenho nas limitações de defeitos na linha e realizar uma comparação entre as duas topologias.

6.1 Conclusões

A metodologia desenvolvida para o dimensionamento de LCS foi validada através dos ensaios realizados. O comportamento dos limitadores cumpre aproximadamente os critérios para um limitador ideal.

As suas limitações estão dentro dos intervalos esperados, desde dos 66,9% até aos 79,5% da corrente presumida de curto-circuito. Em regime normal de funcionamento os dispositivos não são invisíveis à rede, tendo entre 4,5% e 6,54% de queda de tensão da fonte, no entanto cumpre o critério de ser menor do que a tolerância 10% da tensão nominal dos barramentos.

Verificou-se como seria expectável, a blindagem magnética do núcleo do limitador em regime nominal da rede. Em regime de falha, verificou-se a penetração de fluxo de fases em falha com as fases em regime normal, na metodologia de dimensionamento há um arredondamento inferior para o dimensionamento do número de espiras, conclui-se que não é suficiente sendo necessário efectuar um arredondamento superior. Um maior número de espiras supercondutoras diminui a probabilidade de pontos quentes e alonga a vida útil do limitador.

A junção entre supercondutores realizada permite a concepção de espiras supercondutoras com fitas 2G. No tratamento térmico com menor tempo e temperatura a junção apresenta melhor desempenho nos ensaios e não provoca decapagem da camada exterior de cobre por calor.

Entre as duas topologias não existe uma grande alteração de comportamento, quer nas percentagens de limitação de correntes que são aproximadas quer da sua transparência à rede. Apesar do LCSTI do tipo *Shell* ter um desempenho ligeiramente superior, num limitador à escala da

rede de distribuição eléctrica o custo em excesso do núcleo ferromagnético, comparativamente à tipologia de um LCSTI tradicional, não tem os benefícios necessários para justificar o custo adicional.

6.2 Trabalhos Futuros

Os ensaios do LCSTI permitiram validar a metodologia proposta, no entanto é necessário estudar o trânsito de fluxos existentes nas travessas superiores e inferiores na tipologia tradicional e nas colunas exteriores na tipologia *Shell*. Este estudo levaria a uma melhor compreensão do seu desempenho e futuro aperfeiçoamento.

Os ensaios experimentais apresentaram um bom desempenho dos LCSTI, mas seria necessário ensaiar experimentalmente fases desequilibradas, ou seja, terem cargas diferentes o que se regista na realidade na rede de distribuição. A aplicação de falhas consecutivas em laboratório permitiria verificar a resposta do LCSTI e a capacidade de recuperação e seu desempenho na limitação nas correntes de curto-circuito.

É necessário analisar a formação de pontos quentes na fita supercondutora de forma a verificar-se as correntes induzidas que poderão degradar irreversivelmente o elemento supercondutor. Apesar dos pontos quentes na fita não se verificarem na junção da espira, poderia conceber-se uma junção no material supercondutor dando uma maior continuidade à espira sem afectar a sua corrente e excluindo a utilização de solda.

Aplicar a metodologia proposta nesta dissertação para dimensionar um LCSTI para potências à escala da rede de distribuição quer na rede AT como MT. No entanto potências mais elevadas poderão levar o supercondutor a perder o seu estado de supercondutividade sendo necessário estudar formas de detecção deste fenómeno.

Para ter-se uma blindagem do fluxo ligado do enrolamento primário poderia colocar-se supercondutor, na forma de fita, no interior do enrolamento primário como se verifica no uso de cilindro maciço supercondutor. Deveria considerar-se uma fita supercondutora com maior largura de forma a blindar com maior eficácia.

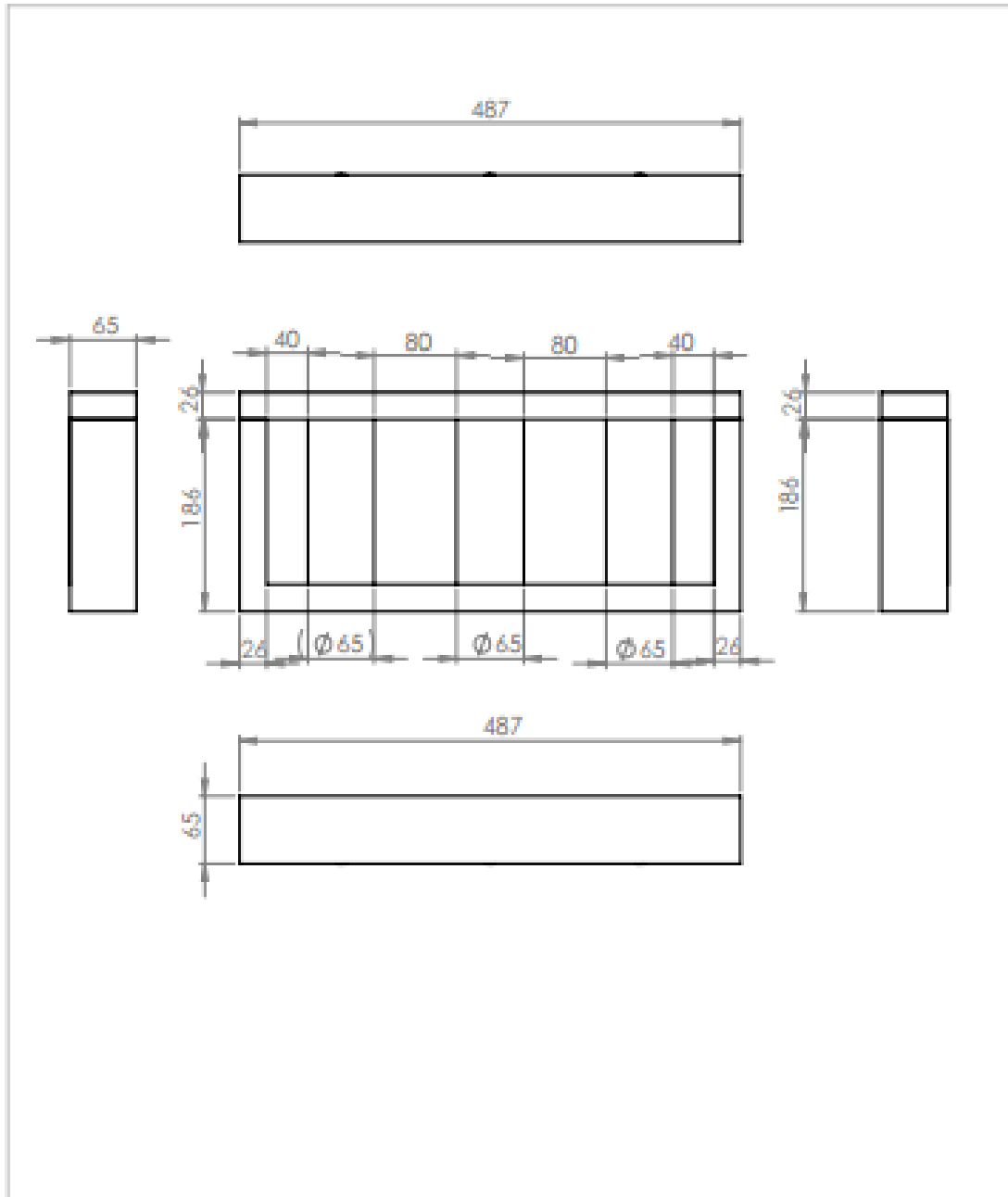
Bibliografia

- ABB. (2011). Is -limiter Brochure. Retrieved from [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/ff776cf15a9bf8b7c125792d002dc1a8/\\$file/is-limiter_en.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/ff776cf15a9bf8b7c125792d002dc1a8/$file/is-limiter_en.pdf)
- Arsénio, P. (2012). *Desenvolvimento e análise de um limitador de corrente indutivo baseado em fita supercondutora Bi-2223*. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/8494>
- Bean, C. (1962). Magnetization of hard superconductors. *Physical Review Letters*, 8(6), 250–253. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>
- Blundell, S. J. (2009). *Superconductivity: A Very Short Introduction* (First Edit.). Oxford: OUP Oxford.
- Brandt, E. (1998). Superconductor disks and cylinders in an axial magnetic field. I. Flux penetration and magnetization curves. *Physical Review B*, 58(10), 6506–6522. doi:10.1103/PhysRevB.58.6506
- Burns, G. (1992). *High-Temperature Superconductivity: an introduction*. New York: Academic Press.
- Chakrabarti, S. (2010). *Notes on Power System Voltage Stability. Dept. of EE, IIT, Kanpur* [http:// ...](http://...) (pp. 1–16).
- Dasgupta, I. (2002). *Design of transformers*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- EDP Distribuição. (2014). *Relatório da Qualidade de Serviço 2013*.
- Ferreira, R. (2013). *Construção e ensaio de um limitador de corrente supercondutor trifásico do tipo indutivo de blindagem magnética*. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/11114>
- Gromoll, B., & Ries, G. (1999). Resistive fault current limiters with YBCO films 100 kVA functional model. *Applied ...*, 9(2), 656–659. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=783381
- Kalsi, S. S. (2011). *Applications of high temperature superconductors to electric power equipment*.
- Kalsi, S. S., & Malozemoff, A. (2004). HTS fault current limiter concept. *Power Engineering Society General ...*, 2, 1426–1430. doi:10.1109/PES.2004.1373103
- Kim, Y., Hempstead, C., & Strnad, A. (1962). Critical persistent currents in hard superconductors. *Physical Review Letters*, 9(7), 306–309. Retrieved from <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.9.306>
- Kovalsky, L., Yuan, X., Tekletsadik, K., Keri, A., Bock, J., & Breuer, F. (2005). Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2), 2130–2133. doi:10.1109/TASC.2005.849471
- Kozak, J., Majka, M., Kozak, S., & Janowski, T. (2012). Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(3), 5601804–5601804. doi:10.1109/TASC.2011.2178977
- Leung, E. (1997). Surge protection for power grids. *IEEE Spectrum*, 34(7), 26–30. doi:10.1109/6.609812

- Majoros, M., Jansak, L., Sello, S., & Zannella, S. (1997). Transient analysis of HTS inductive fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7(2), 989–992. doi:10.1109/77.614671
- McLyman, C. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. (M. Dekker, Ed.) (Third Edit.). New York: Dekker, Marcel.
- Meerovich, V., & Sokolovsky, V. (1999). Performance of an inductive fault current limiter employing BSCCO superconducting cylinders. ... *Superconductivity*, ..., 9(4), 4666–4676. doi:10.1109/77.819336
- Moriconi, F., Koshnick, N., De La Rosa, F., & Singh, A. (2010). Modeling and test validation of a 15kV 24MVA Superconducting Fault Current Limiter. In *IEEE PES T&D 2010* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/TDC.2010.5484412
- Onnes, H. (1913). Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the preparation of liquid helium. *Nobel Lecture*. Retrieved from <http://cph-theory.persianganig.com/onnes-lecture.pdf>
- Paiva, J. P. S. (2011). *Redes de Energia Eléctrica - Uma análise sistémica* (3ª Edição.). IST Press.
- Paul, W., Lakner, M., Rhyner, J., Unternährer, P., Baumann, T., Chen, M., ... Guérig, A. (1997). Test of 1.2 MVA high- superconducting fault current limiter. *Superconductor Science and Technology*, 10(12), 914–918. doi:10.1088/0953-2048/10/12/011
- Pina, J. (2010). *Desenho e modelização de sistemas de energia empregando materiais supercondutores de alta temperatura*. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/5059>
- Poole, C. P., Farach, H. A., Creswick, R. J., & Prozorov, R. (2007). *Superconductivity* (Second Edi.). London: Academic Press.
- Pronto, A. (2010). *Análise de perdas em sistemas de energia que empregam materiais supercondutores de alta temperatura*. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/5116>
- Sarang, S., & Chockalingam, S. (2005). Experimental Evidence for Zero DC Resistance of Superconductors. *arXiv Preprint Cond-Mat/ ...*, 1–10. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0506426>
- Silva, T. (2013). *Construção, ensaio e modelização de um limitador de corrente supercondutor*. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/9928>
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Vajda, I., & Beilin, V. (2004). Superconducting FCL: Design and Application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(3), 1990–2000. doi:10.1109/TASC.2004.830608
- Stavrev, S., Grilli, F., & Dutoit, B. (2002). Comparison of numerical methods for modeling of superconductors. *Magnetics, IEEE ...*, 38(2), 849–852. doi:10.1109/20.996219
- Trench. (2009). Reactors Brochure. Retrieved from <http://www.trenchgroup.com/en/Products-Solutions/Coil-Products/Air-Core-Reactors>
- Weinstock, H. (Ed.). (2000). *Applications of Superconductivity*. Loen: Kluwer Academic Publishers.
- Yazawa, T., Ootani, Y., Sakai, M., Otsuki, M., Kuriyama, T., Urata, M., ... Inoue, K. (2006). Design and Test Results of 66 kV High-Tc Superconducting Fault Current Limiter Magnet. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 16(2), 683–686. doi:10.1109/TASC.2006.871208

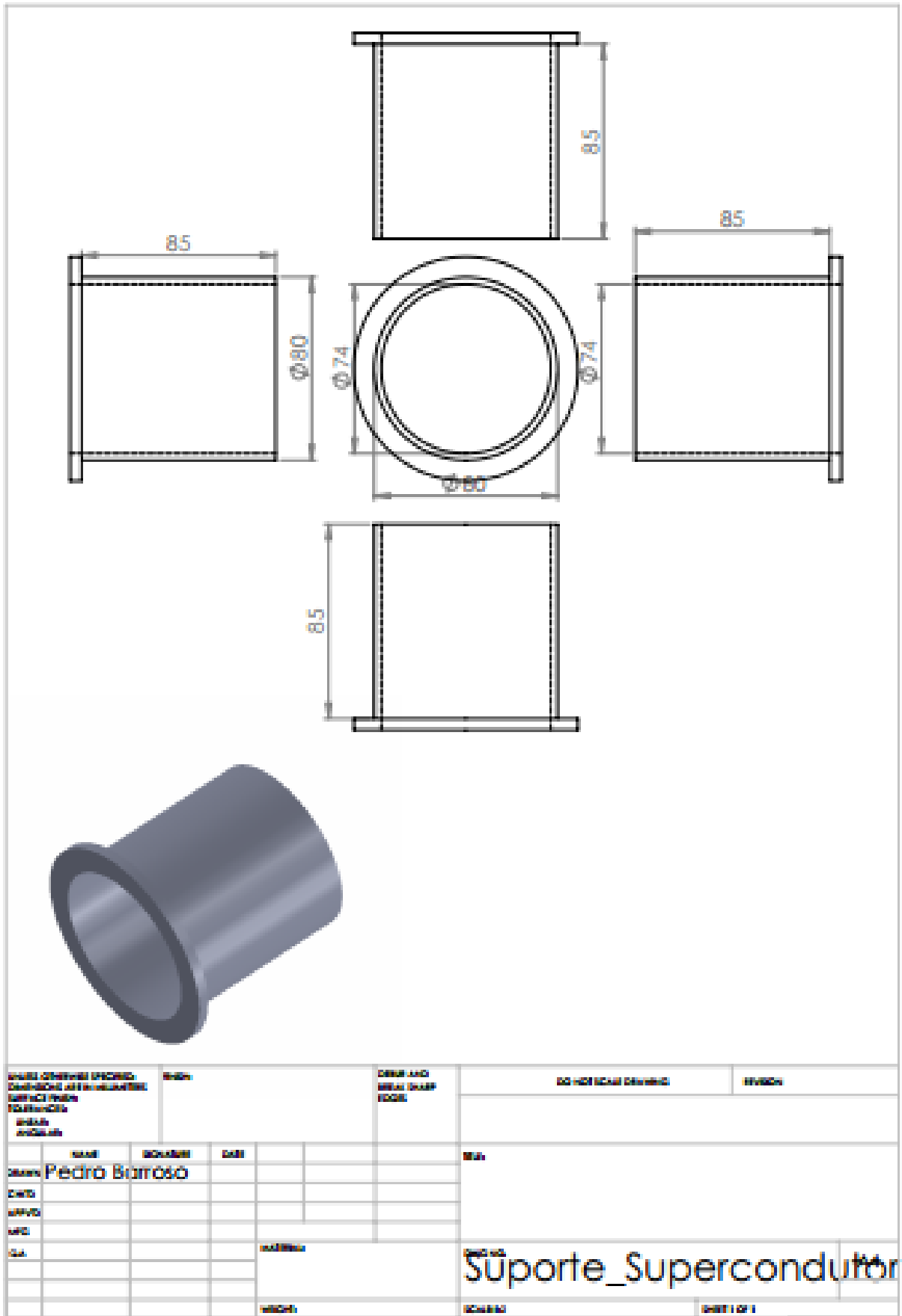
Anexos

1. Desenho do Núcleo Ferromagnético

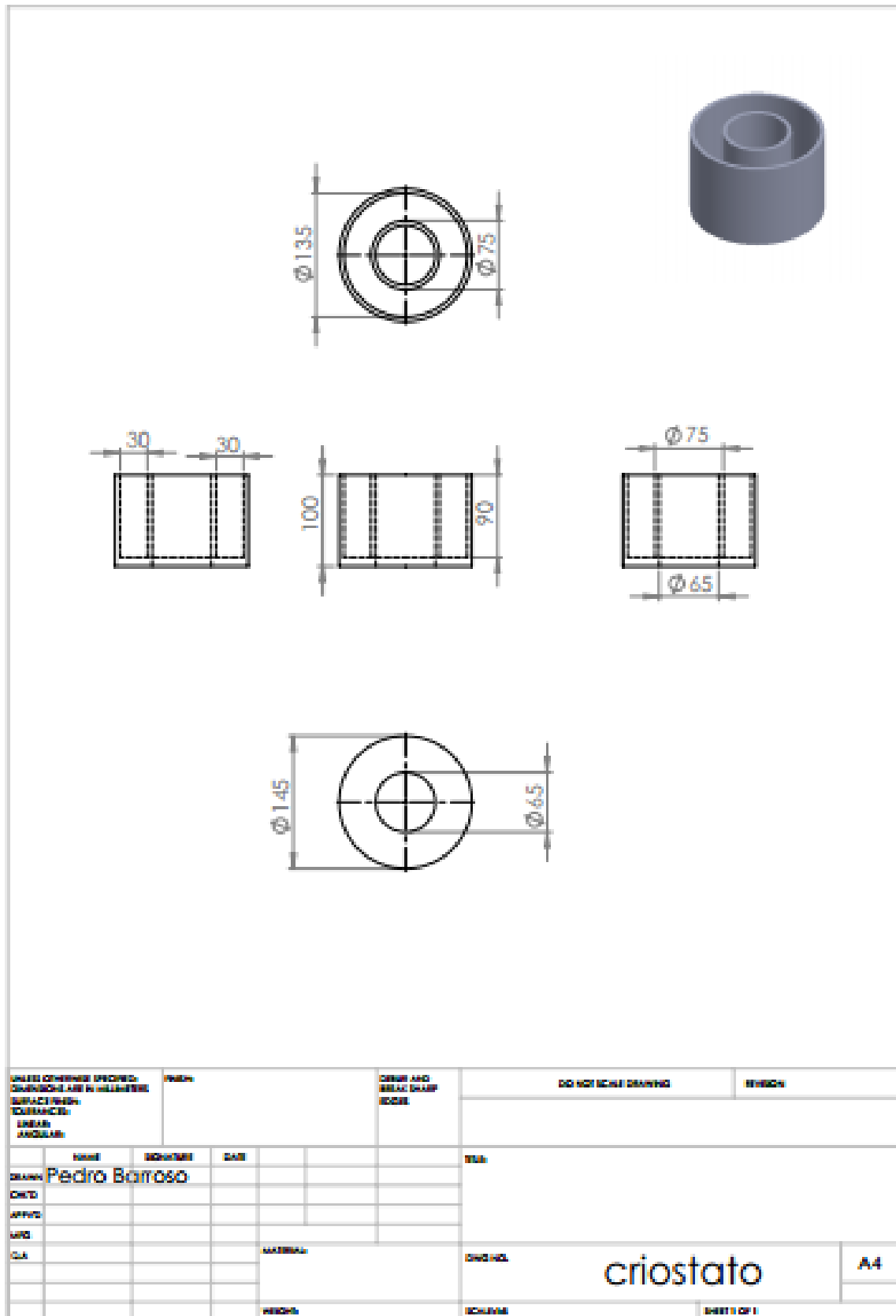


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ANGLES:		PAPER:		DIMENSIONS AND TOLERANCES EDGE:		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION:	
DRAWN: Pedro Barros		CHECKED:		DATE:		SCALE:			
DATE:									
APP'D:									
MFG:									
C/A:				MATERIAL:		DWG NO. Núcleo completo		A4	
				REVISION:		SCALE:		SHEET OF 1	

3.Desenho do Suporte do Enrolamento Secundário



4.Desenho do Crióstato do Enrolamento Secundário



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: EX: RA3.2 UNLESS INDICATED		PART NO.	DESIGN AND SERIAL DRAWING CODE	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DESIGNED: Pedro Barros	CHECKED:	DATE:	TITLE:		
APPR'D:					
C.A.		MATERIAL:	DIM. NO.:	criostato	A4
		FINISH:	SCALE:	SHEET 1 OF 1	

5.Documentação do processo de junção da Fita Supercondutora

1.



4.



2.



5.



3.



6.



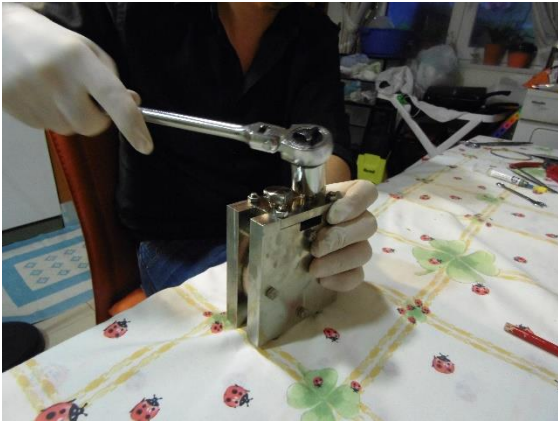
7.



10.



8.



11



9.

