



Nuno Manuel Gonçalves Vilhena

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Construção e Ensaio de Um Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica 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 Fernando José
Almeida Vieira do Coito

Arguente: Prof. Doutor Mário Fernando
da Silva Ventim Neves

Vogal: Prof. Doutora Maria Isabel
Simões Catarino



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Outubro de 2012

Construção e Ensaio de Um Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados

Copyright © Nuno Manuel Gonçalves Vilhena, 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 objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais e irmão por sempre me apoiarem

À memória da minha avó paterna

À minha família e amigos

Agradecimentos

Em primeiro lugar queria agradecer aos meus orientadores, Professor João Murta Pina e Professora Anabela Pronto, pela sempre disponibilidade e pelos ensinamentos transmitidos, não só durante a realização desta dissertação como ao longo do curso, nas disciplinas que me leccionaram, e em particular ao Professor João Murta Pina por me ter despertado o interesse pela supercondutividade.

Aos restantes professores do Departamento de Engenharia Electrotécnica pelos ensinamentos transmitidos ao longo do curso, que sem eles esta dissertação não teria sido possível.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia que me deu condições para que pudesse fazer o meu curso.

Aos meus colegas e amigos que fiz ao longo do curso e aos meus amigos de longa data, pelo apoio que me deram, pela amizade e pela sempre disponibilidade para me ajudarem em qualquer situação, em particular aos meus colegas de primeiro ano, ao Bruno Soares por estar sempre disponível para ajudar e pelo seu vasto conhecimento, ao 'mestre' Alexandre Silva pela ajuda imprescindível que me deu ao longo do curso e pela amizade, ao David Pinto e Bandeira pela sempre boa disposição demonstrada. Aos meus amigos Hugo Paulo, Gonçalo Santos, João Silva e Bruno Galveia pelo companheirismo e amizade e por me permitirem esquecer de vez em quando o trabalho e a faculdade. Obrigado à Filipa Lourenço pela nossa amizade e pelo apoio e conselhos dados, à Sofia Ribeiro pela nossa amizade e pela sua forma descontraída de ser, ao Pedro Mendes pelos grandes torneios de futebol jogados na PlayStation nas pausas deste trabalho e pelo convívio e amizade, obrigado aos três pela presença na minha temporada de verão na execução deste trabalho. Obrigado a todos os meus colegas e amigos que não referi pois o mais importante é a amizade e não o que está escrito num pedaço de papel. Aos meus colegas e amigos do laboratório de supercondutividade pela boa disposição e por estarem sempre prontos a ajudar, em particular ao Pedro Arsénio pela amizade e pelo apoio imprescindível prestado ao longo da realização deste trabalho. Obrigado a todos vocês pois fizeram-me ver que com força de vontade consigo alcançar tudo o que antes pensava ser inalcançável.

Por último, e mais importante, queria agradecer aos meus pais pelo sacrifício que fizeram para que eu pudesse entrar para a universidade e tirar um curso superior, pelos conhecimentos que me transmitiram ao longo da vida e valores que me deram que fizeram de mim a pessoa que sou hoje e por estarem sempre presentes e prontos para me apoiar nos bons e maus momentos, um muito obrigado. Ao meu irmão pelo imprescindível apoio que me tem dado ao longo da minha vida e me aturar nos bons e maus momentos, um grande amigo e um grande obrigado. A toda a minha família, principalmente ao meu avô paterno e avó materna que nestes anos de curso, e na minha vida, sempre me apoiaram e aos meus tios Jorge e Sónia pela grande amizade compartilhada, pelos conselhos que me transmitem e pelo exemplo de vida que são e pelo primo que me deram, obrigado. À memória da minha avó paterna, que partiu cedo demais e sem me ver concluir o curso, sei que teve sempre orgulho em mim tendo sido como uma segunda mãe para mim, obrigado por todos os valores que me transmitiu.

Agradeço ainda a todas as pessoas que se cruzaram na minha vida e que de alguma forma me transmitiram conhecimento e valores sendo este trabalho a forma de vós agradecer.

Sumário

A introdução de novas instalações de produção de energia eléctrica, principalmente de origem renovável e descentralizada, e por um aumento da procura de energia, pode resultar no aumento das correntes de curto-circuito na rede eléctrica e no ultrapassar dos níveis de protecção dos dispositivos de protecção já existentes. As soluções convencionais existentes para a protecção contra as correntes de curto-circuito, como a construção de novas subestações, a divisão de barramentos ou a actualização de disjuntores pode resultar económica ou tecnicamente inviável.

Os limitadores de corrente supercondutores podem ser assim economicamente mais competitivos que as soluções convencionais. Estes dispositivos são, em operação normal, invisíveis à rede, actuam de forma quase instantânea em situação de falha e voltam ao estado normal automaticamente após a resolução da falha.

O objectivo desta dissertação é projectar, construir e ensaiar um protótipo de um limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados, numa rede à escala de laboratório. Pretende-se por fim, analisar o seu desempenho e contribuir para a sua modelização.

Termos Chave:

Supercondutividade

Limitador de corrente supercondutor de núcleos saturados

Correntes de curto-circuito

Redes de energia eléctrica

Abstract

The increase in new decentralized power plants operating primarily from renewable sources and an increasing demand in such energy may together yield an increase in short-circuit currents in the electrical grid, surpassing the protection level of the devices currently available in it. The conventional solution against short-circuit currents, such as the construction of new substations, division bus, even updating the technology of the existing current limiters may prove either economically or technically unfeasible.

A superconductor fault current limiter may be thus more economically competitive than ordinary solutions. Such devices at normal operation are invisible to the grid, acting almost instantly upon a fault, returning to their normal state upon its correction.

The aim of this thesis is to design, assemble and test a saturated-core superconductor fault current limiter, and apply it on a laboratory-scale electrical grid. Its performance will be analyzed and a contribution to the modeling of such devices is also provided.

Keywords:

Superconductivity

Saturable-core superconductor fault current limiter

Short-circuit currents

Electric power grid

Índice de Matérias

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objectivos.....	2
1.3	Organização da dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Supercondutividade	5
2.1.1	Perspectiva histórica	5
2.1.2	Propriedades Macroscópica	7
2.1.2.1	Resistividade Nula	7
2.1.2.2	Efeito Meissner	8
2.1.3	Tipos de Supercondutores	9
2.1.3.1	Supercondutor do tipo I.....	10
2.1.3.2	Supercondutor do tipo II.....	10
2.2	Supercondutores de Alta Temperatura (SAT)	11
2.3	Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	12
2.3.1	Soluções Convencionais para Limitar as Correntes de Curto-Circuito	12
2.3.2	Limitadores de Corrente Supercondutores	13
2.3.2.1	LCS de núcleos saturados	14
2.4	Conclusão	15
3	ESTADO DA ARTE	17
3.1	Tecnologias de LCCC de núcleos saturados	17
3.1.1	LCCC de Núcleos Saturados	17
3.1.2	LCCC de Indutância Saturável	20
3.1.3	LCCC do Tipo Interruptor Controlado Magneticamente.....	22
3.1.4	LCCC de Núcleos Saturados Melhorado com Desacoplamentos Magnético.....	23

3.1.5	LCCC de Núcleo Aberto Saturado	24
3.2	Circuito de Polarização DC	25
3.3	Conclusão	27
4	SIMULAÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE DE NÚCLEOS SATURADOS POR ELEMENTOS FINITOS	29
4.1	Característica Magnética de Primeira Magnetização do Núcleo Ferromagnético Utilizado para a Construção do Protótipo	29
4.2	Configuração do Flux2D.....	35
4.2.1	Topologia do Limitador Utilizado nas Simulações.....	35
4.2.2	Malha de Elementos Finitos	36
4.2.3	Definição das Propriedades Físicas	37
4.2.4	Topologia da Rede Eléctrica para a Simulação do LCS	37
4.3	Simulação e Análise da Magnetização das Colunas do Núcleo do LCS.....	39
4.4	Simulação e Análise do Comportamento do LCS	40
4.4.1	Operação do LCS para Diversos Pontos de Funcionamento	42
4.4.2	LCS em Funcionamento Normal	44
4.4.3	LCS Inserido numa Rede com Circuito de Polarização Composto por uma Fonte de Corrente	45
4.4.3.1	Aplicação do Curto-Circuito quando a Corrente de Linha Passa por Zero	45
4.4.3.2	Aplicação do Curto-Circuito quando a Corrente de Linha Não é Nula	47
4.4.3.3	Aplicação de Falhas Consecutivas	48
4.4.3.4	Aplicação de uma Falha quando a Corrente de Linha Não é Nula e Para Uma Tensão de Alimentação do Dobro	49
4.4.4	LCS Inserido numa Rede com Circuito de Polarização Composto por uma Fonte de Tensão 50	
4.4.4.1	Aplicação do Curto-Circuito quando a Corrente de Linha Não é Nula	51
4.4.4.2	Aplicação de Falhas Consecutivas	54
4.5	Conclusão	55
5	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO LCS DE NÚCLEOS SATURADOS	59

5.1	Placa de Aquisição de Dados	59
5.2	O Protótipo Desenvolvido	61
5.2.1	Núcleo ferromagnético	61
5.2.2	Bobinas AC.....	62
5.2.3	Bobina DC	62
5.2.4	Crióstato	63
5.2.5	Protótipo Final.....	65
5.3	Conclusão.....	66
6	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	67
6.1	Procedimento Experimental	67
6.2	Resultados Obtidos e Discussão dos Resultados	70
6.2.1	Magnetização das Colunas do Núcleo	70
6.2.2	LCS em Funcionamento Normal	71
6.2.2.1	Queda de Tensão aos Terminas do LCS	72
6.2.2.2	Magnetização e desmagnetização do LCS quando este se encontra inserido na rede eléctrica.....	73
6.2.3	LCS em Situação de Falha.....	75
6.2.3.1	Aplicação de uma falha.....	75
6.2.3.2	Aplicação de duas falhas consecutivas	80
6.3	Conclusão e Comparação dos Ensaios Experimentais Com as Simulações.....	81
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	85
8	PUBLICAÇÕES	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
	ANEXOS.....	91
	Anexo 1: Escala de Cor Para a Indução Magnética	91
	APÊNDICES.....	93

Índice de Figuras

Figura 2.1: Diagrama temporal dos marcos históricos mais importantes da supercondutividade.....	6
Figura 2.2: Comparação entre supercondutor e condutor perfeito quando arrefecidos em campo nulo (ACN) ou arrefecidos na presença de campo (APC). É aplicado um campo caso não exista e posteriormente é removido.....	9
Figura 2.3: Espaço de fases T-J-H. O material apresenta propriedades supercondutoras dentro do volume	9
Figura 2.4: Magnetização de um supercondutor em função do campo aplicado	10
Figura 2.5: Classificação dos limitadores de corrente supercondutores monofásicos	13
Figura 2.6: Circuito eléctrico do LCS de núcleos saturados (adaptado de (Noe & Steurer, 2007))	14
Figura 2.7: Característica magnética do LCS de núcleos saturados.....	14
Figura 2.8: LCS de núcleos saturados trifásico. Retirado de (Wang, Niu, Gong, & Xin, 2011)	15
Figura 3.1: Estrutura conceptual do LCS de núcleos saturados.....	18
Figura 3.2: Esquema de ligação do LCS de núcleos saturados à rede.....	18
Figura 3.3: Ilustração dos pontos de funcionamento do núcleo.....	19
Figura 3.4: Indutância do LCCC de núcleos saturados em função da corrente.	20
Figura 3.5: Limitador de corrente de indutância saturável.	21
Figura 3.6: LCCC do tipo interruptor controlado magneticamente.....	22
Figura 3.7: LCCC de núcleos saturados com desacoplamentos magnético.	24
Figura 3.8: LCCC de núcleo aberto saturado.....	25
Figura 3.9: Retirado de (Patterson et al., 2011).	25
Figura 3.10: Enrolamentos supressores. Retirado de (Patterson et al., 2011).....	26
Figura 4.1: Estrutura conceptual do LCS de núcleos saturados proposto no capítulo 3.1.1 e o utilizado para as simulações e montagem experimental.....	29
Figura 4.2: Exemplo de curva de primeira magnetização de um material magnético.	30
Figura 4.3: Curvas de histerese em função de H_{max}	30
Figura 4.4: Montagem experimental para a determinação da característica de primeira magnetização do núcleo.	31
Figura 4.5: Esquema do núcleo ensaiado.....	31
Figura 4.6: Programa que obtém a característica de primeira magnetização a partir dos dados recebidos do ensaio anteriormente descrito.	33

Figura 4.7: Caminho utilizado para a aplicação da lei de Ampère.....	34
Figura 4.8: Característica de primeira magnetização do núcleo ensaiado.	34
Figura 4.9: Dimensões do núcleo utilizado nas simulações, com dimensões em milímetros.	35
Figura 4.10: Geometria do limitador no Flux2D.	36
Figura 4.11: Geometria utilizada para simulação e respectiva malha de elementos finitos.	36
Figura 4.12: Esquema da rede eléctrica onde o limitador foi integrado.....	37
Figura 4.13: Esquema da rede eléctrica com os dois tipos de circuito de polarização utilizados.	38
Figura 4.14: Estado da magnetização do núcleo na zona das colunas.....	40
Figura 4.15: Corrente na linha AC para uma corrente de polarização de 60 A e a ocorrência de um curto-circuito aos 40 ms com recuperação a partir dos 120 ms.	41
Figura 4.16: Estado de magnetização do núcleo quando o LCS funciona no estado normal.	41
Figura 4.17: Estado de magnetização do núcleo numa situação de falha, para cada meio ciclo da corrente de CC	42
Figura 4.18: Queda de tensão aos terminais do limitador para várias correntes de polarização	43
Figura 4.19: Corrente na linha AC para várias correntes de polarização DC.....	44
Figura 4.20: Resultados para o LCS a funcionar no estado normal.	45
Figura 4.21: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> para uma falha em $t = 40\text{ ms}$	46
Figura 4.22: Resultados de simulação do LCS para uma falha em $t = 40\text{ ms}$ e quando a corrente na linha passa por zero.	46
Figura 4.23: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> para uma falha em $t = 44\text{ ms}$	47
Figura 4.24: Resultados de simulação do LCS para uma falha em $t = 44\text{ ms}$ e quando a corrente na linha não passa por zero.	48
Figura 4.25: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> para duas falhas consecutivas de 58 ms, uma falha em $t = 20\text{ ms}$ e outra em $t = 114\text{ ms}$	48
Figura 4.26: Indução magnética nas colunas do núcleo para duas falhas consecutivas de 58 ms, uma falha em $t = 20\text{ ms}$ e outra em $t = 114\text{ ms}$	49
Figura 4.27: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> para uma falha em $t = 44\text{ ms}$ de 73 ms.	49
Figura 4.28: Resultados de simulação do LCS para uma falha em $t = 44\text{ ms}$ e quando a corrente na linha não passa por zero, com o dobro da tensão de alimentação.	50

Figura 4.29: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>I_p</i> para uma falha em <i>t = 83 ms</i> de <i>t = 114 ms</i> e com circuito de polarização com fonte de tensão.....	51
Figura 4.30: Queda de tensão aos terminais do LCS para uma falha em <i>t = 83 ms</i> de <i>t = 114 ms</i> e com circuito de polarização com fonte de tensão.	52
Figura 4.31: Corrente no circuito de polarização DC para uma falha em <i>t = 83 ms</i> de <i>t = 114 ms</i> e com circuito de polarização com fonte de tensão.	52
Figura 4.32: Corrente no circuito de polarização DC, na linha AC e na bobina auxiliar, para uma falha em <i>t = 83 ms</i> de <i>t = 114 ms</i> e com circuito de polarização com fonte de tensão.....	53
Figura 4.33: Indução magnética nas colunas do núcleo, para uma falha em <i>t = 83 ms</i> de <i>t = 114 ms</i> e com circuito de polarização com fonte de tensão.	53
Figura 4.34: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano <i>iψ</i> , para uma falha em <i>t = 83 ms</i> de <i>t = 114 ms</i> e com circuito de polarização com fonte de tensão.....	54
Figura 4.35: Evolução da corrente na linha para duas falhas consecutivas de <i>60 ms</i> com circuito de polarização com fonte de tensão.	55
Figura 4.36: Indução magnética nas colunas do núcleo para duas falhas em <i>t = 106 ms</i> e <i>t = 189 ms</i> , de <i>t = 60 ms</i> e com circuito de polarização com fonte de tensão.	55
Figura 5.1: Placa de aquisição de dados NI-6009.	59
Figura 5.2: Esquema dos circuitos utilizados.	60
Figura 5.3: Placa de ensaios.....	60
Figura 5.4: Protótipo do LCS de núcleos saturados.....	61
Figura 5.5: Núcleo ferromagnético adquirido para a construção do LCS.	61
Figura 5.6: Bobinas AC construídas em suporte de acrílico.	62
Figura 5.7: Bobina DC de fita supercondutora construída.	63
Figura 5.8: Máquina de construção de crióstatos.	64
Figura 5.9: Máquina de construção de crióstatos em funcionamento.	64
Figura 5.10: Crióstato feito em XPS fabricado pela máquina de fazer crióstatos.....	65
Figura 5.11: Protótipo desenvolvido.....	65
Figura 6.1: Circuito eléctrico para a realização do ensaio do LCS.....	67
Figura 6.2: Diagrama esquemático da montagem experimental para ensaio do LCS.....	67
Figura 6.3: Montagem experimental para o ensaio do LCS.....	69
Figura 6.4: Bobina supercondutora com enrolamento auxiliar.....	69

Figura 6.5: Valor para a indução magnética nas colunas do núcleo em função da fmm aplicada à coluna central.	70
Figura 6.6: Comparação das curvas de indução magnética simuladas e obtidas experimentalmente, nas colunas do núcleo em função da fmm aplicada à coluna central.....	71
Figura 6.7: Limitador quando está a funcionar no estado normal.....	72
Figura 6.8: Queda de tensão aos terminais do limitador e corrente de polarização quando se liga e desliga a fonte de alimentação do circuito de polarização.....	74
Figura 6.9: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> sem bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,8 s$	75
Figura 6.10: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> com bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 3,2 s$	76
Figura 6.11: Evolução da tensão do transformador de alimentação da rede eléctrica <i>ualim</i> e da queda de tensão aos terminais do LCS ΔU_{LCS} , sem a bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,8 s$	76
Figura 6.12: Evolução da tensão do transformador de alimentação da rede eléctrica <i>ualim</i> e da queda de tensão aos terminais do LCS ΔU_{LCS} , com a bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 3,2 s$	77
Figura 6.13: Corrente no circuito de polarização DC.	77
Figura 6.14: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano <i>iψ</i> , para uma falha em $t = 2,8 s$ e sem a bobina auxiliar inserida no LCS.	78
Figura 6.15: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano <i>iψ</i> , para uma falha em $t = 3,2 s$ e com a bobina auxiliar inserida no LCS.	79
Figura 6.16: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano <i>iψ</i> do dispositivo em funcionamento normal e em situação de falha, para uma falha em $t = 3,2 s$ e com a bobina auxiliar inserida no LCS, onde as rectas a preto representam a variação média do fluxo ligado com as bobinas AC.	79
Figura 6.17: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> sem bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,3 s$ e outra falha em $t = 2,8 s$	80
Figura 6.18: Evolução da corrente na linha <i>ilinha</i> e da corrente prospectiva <i>Ip</i> com bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,8 s$ e outra falha em $t = 3,2 s$	80
Figura 7.1: LCS de núcleos saturados trifásico, com geometria planar de construção menos complexa que as topologias habituais. A bobina supercondutora DC encontra-se ao centro e as bobinas AC nas colunas exteriores simétricas.	86

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Materiais SAT mais utilizados em aplicações de energia com respectiva temperatura crítica	11
Tabela 4.1: Parâmetros do limitador de corrente supercondutor.....	37
Tabela 4.2: Especificação da rede utilizada na simulação.	39
Tabela 4.3: Valores de fmm aplicados na bobina de polarização para diversos pontos de funcionamento.	42
Tabela 5.1: Ganhos utilizados nos canais da placa de ensaios	60
Tabela 5.2: Características das bobinas AC.....	62
Tabela 5.3: Característica da fita supercondutora utilizada.	62
Tabela 6.1: Valores máximos para a queda de tensão aos terminais do limitador e corrente na linha com o LCS em funcionamento normal.	82
Tabela 6.2: Valores máximos para a corrente na linha, a tensão da fonte e a variação existente na corrente de polarização.	82

Simbologia

	Descrição	Unidades
B	Campo de indução magnético	T
E	Vector campo eléctrico	$V \cdot m^{-1}$
E_c	Critério de campo eléctrico 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	$A \cdot m^{-1}$
I	Corrente eléctrica	A
I_c	Corrente eléctrica crítica	A
I_{cc}	Corrente eléctrica de curto-circuito	A
J	Densidade de corrente eléctrica	$A \cdot m^{-2}$
J_c	Densidade de corrente eléctrica crítica	$A \cdot m^{-2}$
J_n	Vector densidade de corrente eléctrica normal	$A \cdot m^{-2}$
J_s	Vector densidade de corrente eléctrica supercondutora	$A \cdot m^{-2}$
M	Vector magnetização	$A \cdot m^{-1}$
R	Resistência eléctrica	Ω
T_c	Temperatura crítica	K
μ_0	Permeabilidade magnética do vazio ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$)	$H \cdot m^{-1}$
ξ	Comprimento de coerência	Å

Notações

1G	Fita supercondutora de primeira geração
2G	Fita supercondutora de segunda geração
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
BSCCO	<i>Bismuth strontium calcium copper oxide</i>
YBCO	<i>Yttrium barium copper oxide</i>
LCCC	Limitador de corrente de curto-circuito
LCS	Limitador de corrente supercondutor
SC	Supercondutor/a
SAT	Supercondutor de alta temperatura
SBT	Supercondutor de baixa temperatura
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 extruído

1 Introdução

1.1 Motivação

A civilização moderna está fortemente dependente de energia eléctrica o que levou a um aumento muito considerável do consumo da mesma nos últimos tempos. Para satisfazer este aumento da procura por energia eléctrica, as centrais produtoras têm-se tornado cada vez maiores. Na maioria dos casos, algumas centrais de produção de energia são ligadas entre si por redes interligadas (*powergrids*), tornando os sistemas extremamente complexos.

O consumo de energia eléctrica tem sido feito principalmente a partir de fontes de matérias-primas fósseis, como o carvão natural, gás natural, derivados do petróleo e ainda a partir de origem nuclear. Apesar das matérias fósseis existirem ainda em grandes quantidades, têm vindo a ser consumidas rapidamente, contribuindo para o aumento da poluição atmosférica, em parte responsáveis pelo aumento do efeito de estufa e conseqüentemente pelo aumento da temperatura média da Terra.

Assim, devido a implementação de programas de sustentabilidade energética e as crescentes preocupações ambientais conduziram ao aumento da produção de energia eléctrica a partir de fontes de origem renováveis.

Os futuros sistemas de energia experimentam assim um reforço dos já densos sistemas de energia urbanos, um aumento da geração distribuída e um contínuo aumento da carga (Duggan, 2006).

Isto tudo leva ao aumento dos casos de curto-circuitos (CC) e falhas nas redes de energia. Os custos associados a qualquer falha na rede de energia incluem os custos de equipamentos de rede danificados e a indisponibilidade da rede para os consumidores.

Um limitador de corrente de curto-circuito (LCCC) é um dispositivo que limita a amplitude da corrente de curto-circuito durante uma falha na rede, tendo assim como benefícios melhorar a disponibilidade da rede e proteger os equipamentos sensíveis que a integram, desses picos de alta corrente.

Das diversas tecnologias de LCCC existentes, os limitadores de corrente supercondutores (LCS) têm despertado muito interesse pois estes actuam muito rapidamente e eficazmente na limitação de correntes de CC, actuando logo no primeiro pico de corrente e recuperando-se automaticamente. Outro aspecto muito importante é que durante o funcionamento normal o LCS apresenta uma impedância muito baixa, sendo por isso o mais invisível à rede possível.

Os LCS podem ser do tipo resistivo ou indutivo. Dentro dos LCS indutivos encontra-se o LCS de núcleos saturados. Este tipo de limitador tem a vantagem de recuperar instantaneamente após uma falha na rede, não é afectado pelo *quench*¹ pois o material supercondutor encontra-se sempre no estado supercondutor. O supercondutor é alimentado por uma corrente DC, logo não existem perdas e permite ajustar o poder de limitação através da corrente de polarização.

¹ O *quench* é a fase de transição entre o estado supercondutor e o estado normal.

Uma desvantagem comum nos LCS de núcleos saturados é o seu volume e peso consideráveis, em relação a outros tipos de limitadores e também o facto de apresentarem uma impedância em funcionamento normal um pouco mais elevada (Noe & Schacherer, 2007). Ainda muito pode ser feito para melhorar o desempenho deste tipo de LCS como a redução das suas dimensões, o problema do acoplamento magnético entre as bobinas AC e a bobina supercondutora DC e fazer o escalamento para dispositivos trifásicos.

1.2 Objectivos

O objectivo desta dissertação é o projecto de um limitador de corrente supercondutor monofásico de núcleos saturados, do tipo indutivo, onde a bobina DC que satura os núcleos é construída com fita supercondutora. Assim pretende-se simular e construir um protótipo para ensaiar numa rede à escala laboratorial, analisando-se posteriormente os resultados obtidos.

Os objectivos específicos foram os seguintes:

- Estudo teórico do funcionamento do LCS.
- Simulação por elementos finitos o comportamento do LCS.
- Construção de um protótipo do LCS com base nas simulações efectuadas, à escala laboratorial.
- Realização de ensaios laboratoriais de modo a obter dados relativos aos comportamento do LCS, principalmente em relação ao seu poder de limitação de correntes de CC.
- Análise dos resultados de simulação, do ensaio laboratorial e comparação entre ambos.
- Análise do desempenho geral do LCS.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 9 capítulos.

- Capítulo 1: Introdução
Este capítulo faz uma introdução ao trabalho desenvolvido, quais foram as motivações para o seu desenvolvimento, objectivos alcançados e estrutura do documento.
- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica
Na revisão bibliográfica iniciou-se com um resumo da história da supercondutividade, fazendo referência às propriedades dos supercondutores e os tipos de supercondutores existentes, os supercondutores de alta temperatura e os tipos de LCS existentes.
- Capítulo 3: Estado da Arte
É aqui descrito as várias tecnologias existentes para os limitadores de corrente de núcleos saturados, não tendo necessariamente todos de utilizar elementos supercondutores.
- Capítulo 4: Simulações
Neste capítulo foram enunciados todos os passos tomados para se proceder à simulação do LCS, desde a configuração do simulador de elementos finitos, ao teste e análise das simulações de falhas efectuadas na rede.

→ Capítulo 5: Construção do Protótipo do LCS de Núcleos Saturados

Enunciaram-se os constituintes que compõem o LCS, as suas características físicas, a que zonas do LCS pertencem e como foram construídos. Descreveu-se ainda de que forma se adquiriram os dados posteriormente obtidos nos ensaios, através da construção de uma placa de ensaios.

→ Capítulo 6: Procedimento Experimental, Resultados Obtidos e Discussão

Apresentam-se e analisam-se os dados referentes aos ensaios laboratoriais efectuados, ou seja, referentes ao desempenho do limitador. Compararam-se os valores com as simulações efectuadas anteriormente.

→ Capítulo 7: Conclusões e Trabalho Futuro

Neste penúltimo capítulo faz-se uma reflexão acerca do trabalho desenvolvido tirando-se conclusões disto. Faz-se ainda referência a trabalho futuro a desenvolver.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será abordada uma perspectiva histórica acerca da supercondutividade bem como as suas propriedades, os materiais supercondutores do tipo I e tipo II, uma referência aos materiais supercondutores de alta temperatura.

2.1 Supercondutividade

2.1.1 Perspectiva histórica

Foi em 1911 que se observou pela primeira vez propriedades supercondutoras num material. O físico Heike Kamerlingh Onnes da Universidade de Leiden, Holanda, ao investigar no seu laboratório as propriedades eléctricas do mercúrio a muito baixas temperaturas, possível pela descoberta de um método para a liquefacção do hélio anos antes, em 1908, constatou que a resistência de tubos capilares de mercúrio desaparecia abruptamente, perto do zero absoluto. Concluiu que a resistência do mercúrio não diminuía de forma linear com a temperatura, apresentando uma queda abrupta a partir dos 4,15 K, o que ia contra as principais teorias da época.

Heike Onnes descobriu assim um novo estado da matéria, estado onde os materiais não apresentam quase nenhuma resistência eléctrica, denominando este novo estado de Supercondutividade. Ao valor da temperatura para o qual o material se tornava supercondutor denominou-se de temperatura crítica (T_c). Onnes viria, em 1913, a ganhar o prémio Nobel da Física pelo seu trabalho no estudo dos materiais a baixas temperaturas e pela liquefacção do hélio.

Com o continuar do estudo deste novo estado da matéria, Onnes descobriu que o estado supercondutor desaparecia sendo ultrapassadas certas propriedades do material. Além da temperatura, também o campo magnético, através do campo magnético crítico (H_c), e a densidade de corrente, através da densidade de corrente crítica (J_c), definem os limites para o qual o material se encontra no estado supercondutor ou não. São estas as propriedades intrínsecas que caracterizam o material supercondutor.

Esta nova propriedade dos materiais despertou o interesse de muitos investigadores, conduzir energia sem perdas era um sonho inimaginável.

Em 1933, os físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfeld mostraram que um material supercondutor é capaz de repelir o fluxo magnético do seu interior, ou seja, um supercondutor apresenta um comportamento diamagnético perfeito. Ficou conhecido como o efeito Meissner.

Em 1934 os físicos holandeses C. J. Gorter e H. Casimir propuseram uma teoria para descrever o estado supercondutor nos materiais, chamaram-na de teoria dos dois fluídos. A teoria descrevia que, num material supercondutor, uma fracção dos electrões se comportava de forma normal, electrões normais, enquanto a outra fracção exibiam um comportamento anómalo e eram os responsáveis pelas propriedades supercondutoras do material, electrões supercondutores. No estado

supercondutor os materiais eram compostos pelos dois tipos de electrões, como se de dois fluidos dentro de um mesmo recipiente se tratassem.

No ano de 1935 Fritz e Heins London, irmãos, propuseram uma teoria quantitativa que permite descrever o efeito Meissner, baseando-se em equações electrodinâmicas. Esta teoria faz uma interpretação da supercondutividade a nível macroscópico. Ficaram conhecidas por equações de London e descrevem os campos eléctricos e magnéticos no materiais supercondutores.

Em 1937, Shubnikov estudando o comportamento de materiais supercondutores a campos magnéticos externos aplicados, descobre que estes podem ser penetrados por fluxo magnético, a partir de um certo valor de campo magnético aplicado.

Em 1950, foi proposta uma nova teoria para a supercondutividade, por V. Ginzburg e L. Landau. Estes combinaram a electrodinâmica dos supercondutores de London com a teoria de transições de fases proposta por Landau, propondo assim uma descrição mais poderosa para a supercondutividade, descrevendo também o comportamento dos materiais supercondutores quando aplicados a campos magnéticos fortes.

No ano de 1957, Abrikosov demonstra que aplicando um campo magnético suficientemente forte, o fluxo magnético pode penetrar o supercondutor em valores discretos, em vórtices de fluxo. De forma a minimizar a energia de interacção entre vórtices para um estado de energia mínima, os vórtices dispõem-se numa rede triangular (ou hexagonal) denominada rede de Abrikosov, mantendo-se num estado de equilíbrio. Estão então descobertos os supercondutores do tipo II. A esta propriedade foi chamada estado misto e foi comprovado o fenómeno observado por Shubnikov.

No mesmo ano, Bardeen, Cooper e Schrieffer propõem uma teoria microscópica para descrever a supercondutividade, apelidada teoria BCS. A teoria descreve a existência de pares de electrões ligados, os chamados pares de Cooper, que são os responsáveis pela condução da 'super corrente'. Quanto menor for a temperatura do material, mais pares de Cooper se formam. Os resultados de Ginzburg e Landau são bem descritos por esta teoria. Em 1972 são galardoados com o prémio Nobel da Física devido a este trabalho.

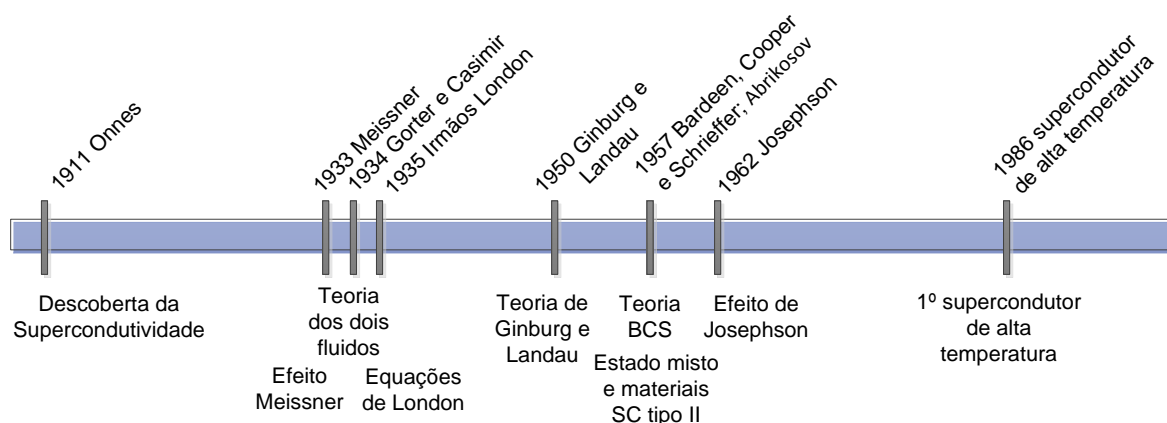


Figura 2.1: Diagrama temporal dos marcos históricos mais importantes da supercondutividade

Em 1962, Brian Josephson prevê a existência de uma corrente entre dois supercondutores separados por um isolador eléctrico ou por um material não supercondutor. A existência destas correntes é mais tarde comprovada experimentalmente. Josephson foi também galardoado com o premio Nobel da Física, em 1973. Este fenómeno é conhecido por efeito Josephson.

Só em 1986 foi descoberto o primeiro supercondutor de alta temperatura. George Bednorz e Alexander Müller descobrem em compostos cerâmicos, que normalmente são maus condutores eléctricos, a designada supercondutividade de alta temperatura, o que permitiu um reacender do interesse na investigação nos materiais supercondutores e no desenvolvimento de aplicações baseadas em materiais supercondutores, uma vez que os sistemas de refrigeração não necessitam ser tão dispendiosos. A partir daqui, a temperatura crítica dos materiais supercondutores descobertos tem vindo a aumentar para valores superiores ao da temperatura de ebulição do azoto líquido, os 77 K, tornando-se o azoto líquido um óptimo substituto do hélio líquido para o sistema criogénico, reduzindo assim drasticamente os custos associados.

Na Figura 2.1 estão representados por ordem cronológica os marcos mais importantes da história da supercondutividade.

2.1.2 Propriedades Macroscópica

A supercondutividade sendo um estado da matéria, apresenta algumas propriedades características. A ausência de resistividade eléctrica foi a primeira propriedade associada a um material supercondutor, descrita por Heike Onnes no ano de 1911. Outra propriedade importante que caracteriza um supercondutor é o efeito Meissner, que permite distinguir um supercondutor de um condutor perfeito.

2.1.2.1 Resistividade Nula

Determinados materiais apresentam uma resistividade praticamente nula quando arrefecidos abaixo de uma determinada temperatura, a temperatura crítica. Estes materiais são materiais supercondutores e a resistividade nula é uma das propriedades deste tipo de materiais. Como têm resistividade nula, não apresentam perdas, contudo isto só ocorre em regime DC, em AC continua a existir perdas, embora muito reduzidas.

A teoria BCS explica o porquê dos materiais supercondutores apresentarem resistência quase nula. Assim, a formação de pares de Cooper está relacionada com este fenómeno.

Um electrão individual no estado normal de condução é disperso por impurezas na rede cristalina do material, e a direcção do seu movimento é obrigada a mudar, portanto, uma resistência eléctrica é criada no material.

No estado supercondutor, o momento \vec{p} do centro de massa de um par de Cooper tem o mesmo valor para todos os outros pares de Cooper, e uma corrente supercondutora percorre o material supercondutor. No caso de \vec{p} diferente de zero, enquanto que a corrente é nula no caso de \vec{p} igual a zero.

Quando a corrente percorre o material supercondutor, um par de Cooper individual não é permitido mudar de direcção de movimento por causa da forte interacção entre os pares, sendo só isto possível depois de um dos pares de Cooper quebrar a força que os une. Para isto acontecer é necessário que a corrente que percorre o material forneça a energia necessária ao par de Cooper, sendo esta corrente muito elevada, então a resistência é nula para correntes mais baixas.

A ausência de resistividade no material supercondutor pode ser verificada experimentalmente pela medição da indução magnética causada por correntes persistentes que se formam em anéis supercondutores, pois uma vez estabelecidas, estas correntes não apresentam diminuições ao longo de muito tempo.

2.1.2.2 Efeito Meissner

Meissner e Ochsenfeld verificam em 1933 que, um supercondutor expulsa do seu interior o fluxo magnético, fenómeno este que ficou conhecido por efeito Meissner. Esta propriedade também é conhecida por diamagnetismo perfeito, ou seja, num supercondutor, um campo magnético externo, inferior ao campo magnético crítico, cria correntes persistentes no interior do supercondutor que anula o campo magnético aplicado. Assim o fluxo magnético mantém-se nulo no seu interior.

A indução magnética relaciona-se com o campo magnético e com a magnetização através da expressão [2,1]

$$\vec{B} = \mu_o(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.1)$$

Como não existe campo no interior do supercondutor, $B=0$, assim

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (2.2)$$

Sendo a susceptibilidade definida por

$$\vec{M} = \chi_m \times \vec{H} \quad (2.3)$$

Então $\chi_m = -1$, o material apresenta diamagnetismo perfeito.

Enquanto num supercondutor não existe fluxo no seu interior pois $B=0$, num condutor perfeito pode existir fluxo no seu interior pois $dB/dt = 0$, ou seja, a variação das linhas de fluxo num condutor perfeito é constante.

A Figura 2.2 mostra a comparação entre um supercondutor e um condutor perfeito. Como se pode verificar, um supercondutor repele sempre o fluxo magnético do seu interior, enquanto um condutor perfeito, caso não tenha fluxo no seu interior antes de se tornar em condutor perfeito, repele o fluxo que tente passar por ele, caso contrário não repele o fluxo do seu interior e mantém-no mesmo depois de ser removido o campo que o criou.

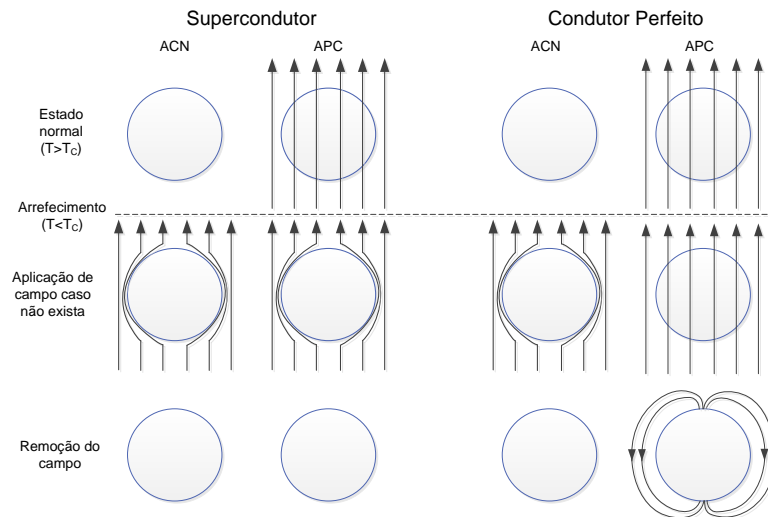


Figura 2.2: Comparação entre supercondutor e condutor perfeito quando arrefecidos em campo nulo (ACN) ou arrefecidos na presença de campo (APC). É aplicado um campo caso não exista e posteriormente é removido

2.1.3 Tipos de Supercondutores

A supercondutividade está dependente de três factores, a temperatura T , o campo magnético H e a densidade de corrente J , que se relacionam através de um diagrama de espaço de fases T - J - H , que representa os limites físicos para o qual o material é supercondutor. Na Figura 2.3 está ilustrado o espaço de fases de um supercondutor,

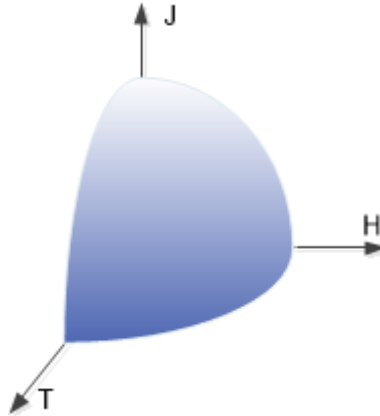


Figura 2.3: Espaço de fases T-J-H. O material apresenta propriedades supercondutoras dentro do volume

Do diagrama pode-se concluir que qualquer uma das grandezas que caracterizam o supercondutor pode destruir a supercondutividade do material. Assim, o material só permanece no estado supercondutor caso (2.4) se verifique e estar limitado pela superfície típica da Figura 2.3.

$$J < J_c; H < H_c; T < T_c \quad (2.4)$$

2.1.3.1 Supercondutor do tipo I

Nos materiais supercondutores do tipo I não existe penetração de fluxo magnético no seu interior, existindo só uma penetração superficial de fluxo que cria uma blindagem na superfície do supercondutor devido às correntes de blindagem induzidas, e evidenciando um comportamento diamagnético perfeito que é caracterizado pelo efeito Meissner.

Para campos externos superiores ao campo magnético crítico, o material perde a propriedade supercondutora, de forma abrupta, como se pode observar pela Figura 2.4 a).

2.1.3.2 Supercondutor do tipo II

Alguns materiais supercondutores mostram um comportamento diferente tanto na temperatura crítica mais elevada que possuem, como na forma que são afectados por campos magnéticos externos ou pela densidade de corrente. Na transição entre o estado supercondutor e o estado normal existe um novo estado, o estado misto. Assim a transição entre os estados supercondutor e normal não ocorre de forma abrupta mas sim de acordo com a Figura 2.4 b). No estado misto, é possível coexistir no material, ao mesmo tempo, tanto o estado supercondutor como o estado normal.

Para o estado misto existem dois campos magnéticos críticos, H_{c1} e H_{c2} . Até ao valor de H_{c1} o material encontra-se no estado Meissner, ou seja, apresenta diamagnetismo perfeito, expulsando todo o fluxo do seu interior. Entre os Campos H_{c1} e H_{c2} , o fluxo foi penetrando uniformemente no interior do material. A esta região chama-se estado misto. Para valores de campo magnético superiores a H_{c2} , a supercondutividade é destruída, voltando o material ao estado normal.

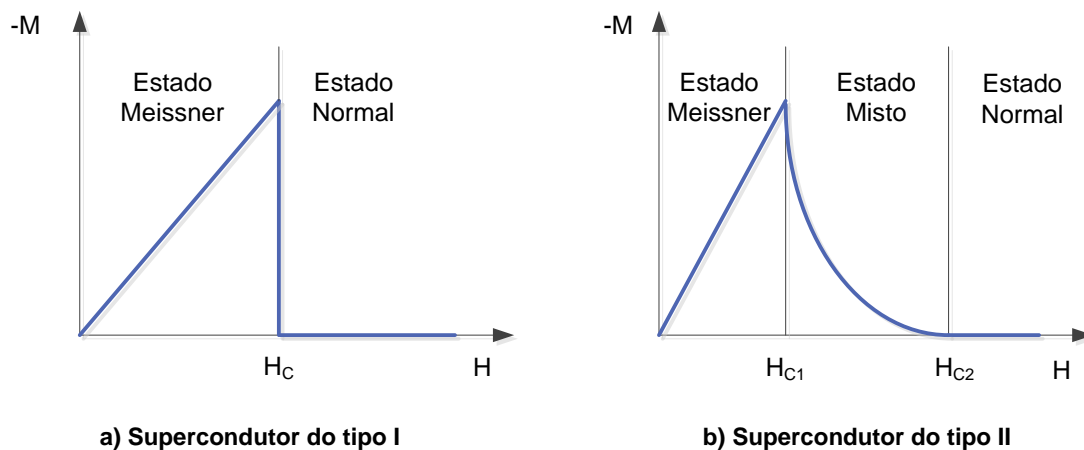


Figura 2.4: Magnetização de um supercondutor em função do campo aplicado

2.2 Supercondutores de Alta Temperatura (SAT)

A descoberta dos materiais supercondutores de alta temperatura, no início de 1987 por Georg Bednorz e Alexander Müller, dois investigadores da IBM, abriu novos horizontes para o desenvolvimento de aplicações baseadas em materiais supercondutores. Estes materiais são sobretudo compostos cerâmicos.

A definição de material SAT não é contudo unânime, para alguns investigadores um supercondutor é considerado SAT quando a temperatura a qual perde o estado supercondutor é superior a 30 K, enquanto para outros, materiais SAT são materiais que apresentam a sua temperatura crítica superior à temperatura do azoto líquido, de 77 K (Pina, 2010).

Estes materiais permitiram também construir sistemas de criogenia mais baratos devido às mais altas temperaturas utilizadas. Para as aplicações de energia, os materiais mais utilizados são os do tipo cerâmico, visto que são materiais SAT. São compostos à base de óxidos de cobre. Exemplos de materiais SAT são o YBCO e o BSCCO, existindo outros mas sendo estes os mais utilizados e produzidos em larga escala.

Tabela 2.1: Materiais SAT mais utilizados em aplicações de energia com respectiva temperatura crítica

SAT	Fórmula Química	Temperatura Crítica (K)
YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	92
BSCCO	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{6+2n}$	105

Os materiais SAT possuem diversos formatos dependendo do fim a que se destinam. Podem ser supercondutores maciços, supercondutores em fita ou em cabo.

Os blocos supercondutores maciços podem ser monocristalino ou policristalinos.

As fitas supercondutoras dizem-se fitas de primeira geração, 1G, e fitas de segunda geração, 2G. As fitas 1G são formadas por supercondutor de BSCCO revestidas por uma matriz de prata que dá robustez à fita. Apresenta um raio mínimo de curvatura até o supercondutor se danificar. As fitas 2G são constituídas por Y-123. Apresentam características melhoradas em comparação com as fitas 1G, apresentando campos, temperatura e densidades de corrente superior, além de melhores propriedades mecânicas.

Os cabos supercondutores têm a vantagem de conduzirem muito mais corrente eléctrica com reduzidas perdas, em relação aos cabos convencionais.

2.3 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

Devido ao aumento da produção de geração distribuída, os sistemas de protecção da rede eléctrica têm-se tornado cada vez mais complexos pois verifica-se um aumento das correntes de CC. Estas correntes de CC podem tomar amplitudes muito elevadas que podem danificar disjuntores, entre outros equipamentos da instalação. Normalmente sobre dimensionam-se os transformadores e outros elementos de potência de modo a suportarem correntes mais elevadas.

Portanto, o uso de limitadores de corrente oferece uma forma de garantir a segurança das redes de nova geração.

Existem diversos tipos de limitadores de corrente instalados nas redes eléctricas, principalmente limitadores convencionais. De momento existem vários projectos de desenvolvimento de limitadores de corrente empregando materiais supercondutores.

Os requisitos genéricos de um limitador de corrente podem ser os seguintes (Pina, 2010):

- Uma impedância desprezável em condições normais de funcionamento.
- Uma impedância considerável para a limitação das correntes de CC.
- Uma rápida acção em situação de falha, em menos de um ciclo de onda.
- Uma recuperação rápida após a falha terminar, em menos de meio ciclo.
- Capacidade de responder a duas falhas num período curto, de 15 segundos.
- Compatibilidade com os sistemas de protecção já existentes, apresentando também uma elevada fiabilidade durante a sua vida útil, baixos requisitos de manutenção, um baixo volume e peso em relação aos sistemas já existentes, reduzidos riscos para as pessoas e baixo impacto ambiental.

2.3.1 Soluções Convencionais para Limitar as Correntes de Curto-Circuito

Entre os métodos convencionais para lidar com as correntes de curto-circuito estão os seguintes (Pina, 2010):

- Construção de novas subestações resolve parte dos problemas contudo é a solução mais dispendiosa.
- Divisão ou construção de novos barramentos, diminuindo assim as fontes que podem contribuir para uma falha, mas também reduz as fontes que contribuem com uma corrente para as situações normais.
- Actualização dos vários disjuntores da rede, no entanto como as falhas costumam atingir vários disjuntores, é necessário actualizar grande parte deles
- Utilização de transformadores de elevada impedância e bobinas de núcleo de ar que limitam a corrente através da impedância, mas apresentam quedas de tensão e perdas em situação normal.
- Utilização de fusíveis de alta tensão, colocados em série com a linha, embora tenham o inconveniente de interromper a corrente de linha, sendo necessário substituí-los o mais rapidamente possível.

- Limitadores de corrente pirotécnicos ou limitadores Is. Estes são constituídos por dois caminhos alternativos para a corrente, num dos caminhos encontra-se o fusível responsável pela interrupção da corrente de linha, no outro caminho um condutor que oferece uma alternativa preferencial para a corrente, com perdas baixas. É através de um sensor que é detectado o aumento da corrente sendo capaz de interromper a passagem da corrente pelo condutor preferencial, passando a corrente a passar pelo fusível, que provoca o fim do CC quando este se funde.

2.3.2 Limitadores de Corrente Supercondutores

Os LCS são limitadores com um tempo de resposta muito curto, permitindo actuar instantaneamente impedindo sobrecargas prejudiciais para os elementos da rede. Estes podem ser inseridos nas redes de geração, transporte e distribuição.

Podem ser integrados em diversos locais da rede eléctrica, entre eles os seguintes (Pina, 2010):

- Nas redes de distribuição, na interligação entre barramentos nas subestações
- Ramais de entrada dos postos de transformação, ficando assim todo o ramal protegido
- Ramais de saída dos postos de transformação, limitando a corrente do circuito onde foi inserido
- Protecção de cargas críticas em média tensão
- Ligação de fontes de produção descentralizada, como em fontes de aproveitamento eólico
- Nas redes de transporte em interligação entre sub-redes de transporte

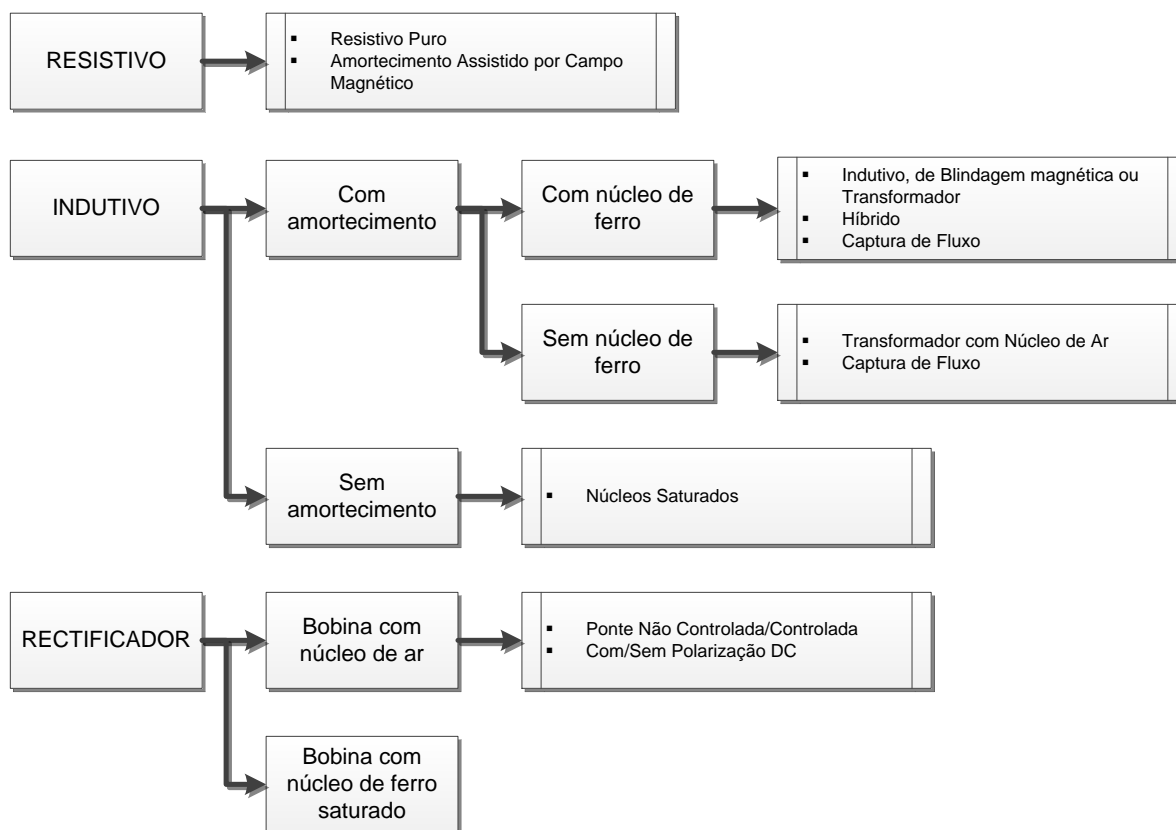


Figura 2.5: Classificação dos limitadores de corrente supercondutores monofásicos

A Figura 2.5 mostra um diagrama com a categorização dos limitadores monofásicos, consoante a relação existente entre o material supercondutor e a linha, ou seja, se o SC estiver em série com a rede então o LCS é resistivo, se for por ligação magnética o LCS é indutivo ou se for através de uma ponte rectificadora, o LCS é do tipo rectificador.

2.3.2.1 LCS de núcleos saturados

Em relação ao LCS de núcleos saturados (Figura 2.6), proposto originalmente por (Raju, Parton, & Bartram, 1982), este mantém os elementos SAT sempre no estado supercondutor.

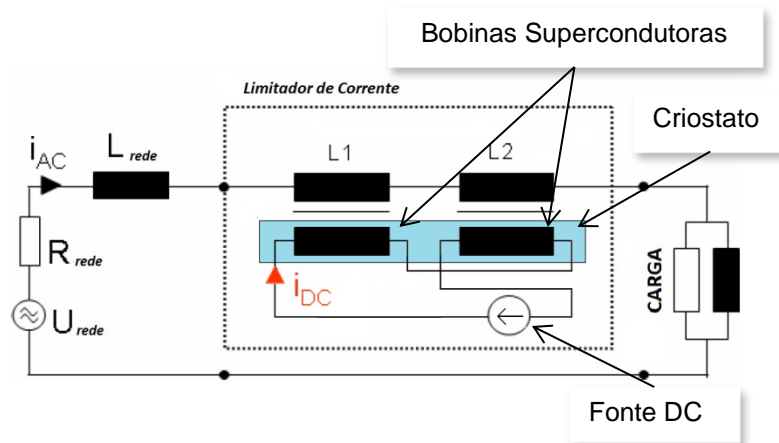


Figura 2.6: Circuito eléctrico do LCS de núcleos saturados (adaptado de (Noe & Steurer, 2007))

O princípio básico de funcionamento deste LCS é manter saturados dois núcleos de ferro independentes, utilizando-se duas bobinas ligadas em série com a rede e em oposição eléctrica de modo a que o fluxo ligado com as bobinas seja em sentidos opostos. É utilizada uma fonte DC que alimenta as bobinas supercondutoras que mantem os núcleos saturados.

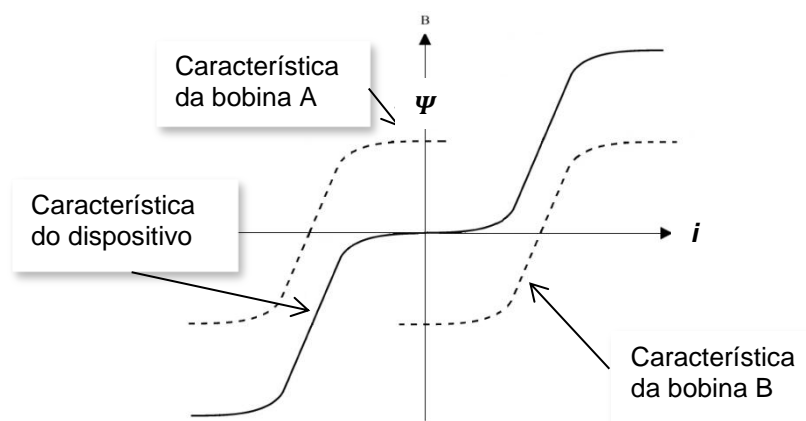


Figura 2.7: Característica magnética do LCS de núcleos saturados.

A Figura 2.7 mostra o andamento da característica magnética do LCS. Em funcionamento normal a corrente permanece em valores onde a característica do dispositivo é horizontal, na zona central. Em

situação de falha, a corrente sai da zona de serviço, a indutância sobe abruptamente, limitando a corrente de CC pela queda de tensão indutiva que é originada. A corrente percorre a característica do dispositivo, indicada na figura, onde os núcleos passam alternadamente pela região de não saturação.

No capítulo seguinte serão abordados as várias topologias de LCCC de núcleos saturados existentes bem como o seu princípio de funcionamento.

As duas principais empresas que trabalham em projectos sobre este tipo de limitador, para fazer deste limitador um produto comercial, são a chinesa Innopower e a inglesa Zenergy Power.

O projecto que a empresa Innopower tem vindo a desenvolver é para a construção de LCS de núcleos saturados trifásico. No ano de 2008 foi ensaiado um protótipo de um LCS para a gama de 35 kV/90 MVA (Gong et al., 2008), representado na Figura 2.8.

Já em 2011, a Innopower instalou um outro LCS, desta vez para a gama de 220 kV/300 MVA, também de fita supercondutora Bi-2223 (Xin et al., 2012).



a) Fotografia do LCS

b) Bobina supercondutora em Bi-2223

Figura 2.8: LCS de núcleos saturados trifásico. Retirado de (Wang, Niu, Gong, & Xin, 2011)

Já a Zenergy Power, desde 2005 que tem vindo a desenvolver um LCS de núcleos saturados (Moriconi, De La Rosa, Darmann, Nelson, & Masur, 2011). Em 2009 instala num circuito de distribuição um protótipo de gama 15 KV/18 MVA. Em 2010 o dispositivo limitou com sucesso múltiplas falhas monofásicas e trifásicas a que se sujeitou a rede onde este estava inserido. Desde aí que a Zenergy tem vindo a desenvolver um modelo mais compacto, com vista do mercado comercial.

2.4 Conclusão

Neste capítulo abordou-se a temática da supercondutividade, sendo descritas as principais propriedades e características dos materiais supercondutores. Falou-se também sobre os limitadores de corrente supercondutores, a sua função e características principais em comum.

3 Estado da Arte

O panorama das redes de energia nos anos setenta apresentou um grande aumento de cargas e de correntes de CC. Isto levou ao aparecimento de diversos projectos para se desenvolver LCCC com materiais supercondutores, inicialmente a partir de materiais supercondutores de baixa temperatura (SBT). Não fora possível comercializar estes LCCC com materiais SBT devido ao elevado esforço de arrefecimento. Após a descoberta de materiais supercondutores de alta temperatura (SAT) por Bednorz e Muller em 1986 (Bednorz J G and Müller K A 1986) a situação mudou. Embora tenha sido necessário alguns anos para se fabricar materiais SAT com alguma qualidade, o marco mais importante teve lugar em 1996 quando a ABB (Asea Brown Boveri) realizou os primeiros ensaios com um LCS com materiais SAT, do tipo blindagem magnética, na rede eléctrica suíça (Paul et al 1997).

Nos inícios dos anos 80 foi criado e testado um protótipo de um LCCC de núcleos saturados, monofásico (Raju et al., 1982), utilizando materiais supercondutores.

O princípio básico de funcionamentos de um LCCC de núcleos saturados permite que haja várias formas de projectar este tipo de limitador. Os projectos diferem principalmente na forma do núcleo, do dimensionamento magnético e da forma como o núcleo é saturado. Várias ideias para implementar um LCCC de núcleos saturados, com fiabilidade, foram propostas na literatura, com e sem a utilização de materiais supercondutores.

De acordo com vários relatórios, num LCS, a fita supercondutora, o criostato e o sistema de arrefecimento, bem como o núcleo ferromagnético e o cobre utilizado são a principal causa dos custos elevados do limitador. Um desafio de engenharia é portanto minimizar os custos dos componentes do projecto para fazer do LCS um dispositivo acessível e comercialmente viável para os sistemas de transmissão e distribuição de energia. Um outro desafio é minimizar a queda de tensão induzida no circuito de polarização DC durante um CC.

Seguidamente serão revistos vários conceitos de LCCC de núcleos saturados.

3.1 Tecnologias de LCCC de núcleos saturados

Serão descritas de seguida várias tecnologias desenvolvidas para LCCC de núcleos saturados, quer se utilizem ou não materiais supercondutores, de acordo com (Patterson, Gomez, Gravely, & Jones, 2011).

3.1.1 LCCC de Núcleos Saturados

Um LCCC de núcleos saturados, monofásico, foi patenteado no início dos anos 80 (Raju et al., 1982).

A estrutura fundamental deste tipo de LCCC é mostrada na Figura 3.1.

O LCCC foi construído a partir de dois núcleos de ferro. Cada núcleo tem duas bobinas enroladas em torno da sua coluna central. As bobinas AC foram bobinas convencionais de cobre, ligadas em série com sentidos opostos e inseridas na linha AC, em série com a carga a ser protegida, como mostra a

Figura 3.2. As bobinas de polarização DC foram enroladas por cima das bobinas AC e alimentadas por uma fonte DC de baixa tensão, elevada corrente DC. Com fita supercondutora (SC), as bobinas DC impõem uma resistência quase nula ao circuito de polarização, assim a corrente de polarização DC era limitada apenas pela resistência interna da fonte. Isto permite ter uma corrente DC muito alta, gerando um campo magnético forte e saturando ambos os núcleos eficientemente.

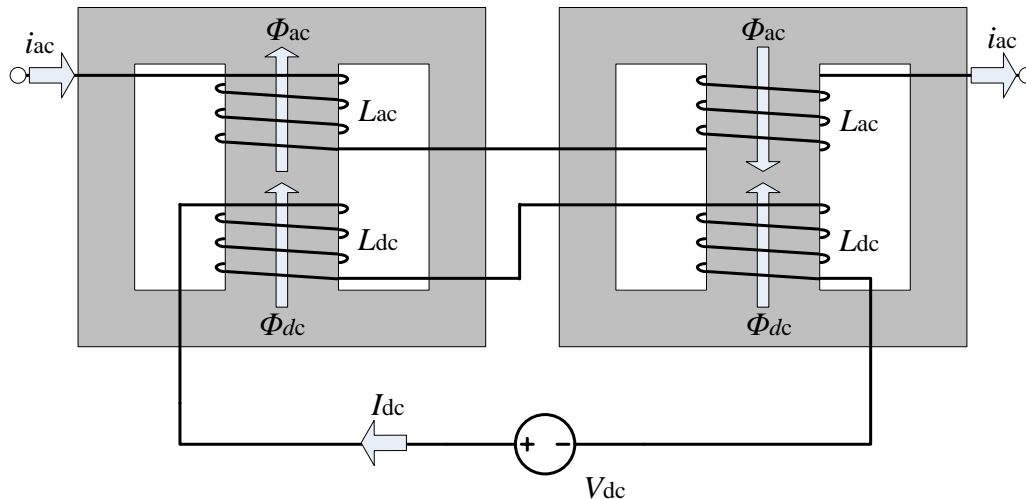


Figura 3.1: Estrutura conceitual do LCS de núcleos saturados.

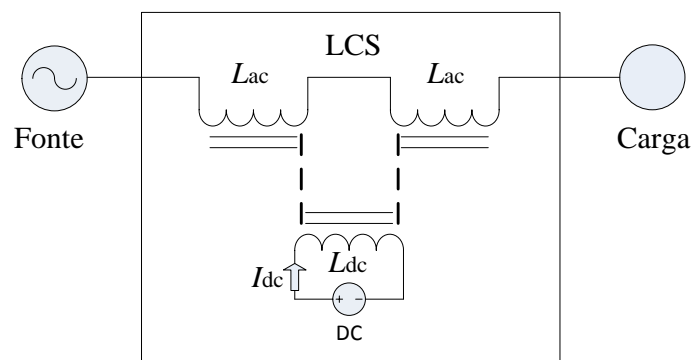


Figura 3.2: Esquema de ligação do LCS de núcleos saturados à rede.

O princípio de funcionamento deste dispositivo é aqui descrito considerando a relação existente entre fluxo e força magnetomotriz (fmm). Através da regulação da corrente da bobina DC, o ponto de funcionamento de ambos os núcleos é estabelecido na proximidade do ponto B (Figura 3.3).

À medida que a corrente AC da linha percorre as bobinas AC, o ponto de funcionamento do núcleo é deslocado. Devido à forma como as bobinas AC estão enroladas em cada núcleo, em sentidos opostos, a fmm provocada pela corrente AC num dos núcleos reforça a fmm provocada pela corrente DC, enquanto no outro núcleo, a fmm provocada pela corrente AC enfraquece-a. Portanto, o ponto de funcionamento de um dos núcleos é deslocado para uma saturação mais profunda, ponto A, enquanto o ponto de funcionamento do outro núcleo desloca-se para uma zona de menor saturação, no ponto C, mais perto do joelho do característica magnética. No estado normal ambos os núcleos

permanecem saturados, pois a corrente da linha não é suficiente para tirar os núcleos da saturação, portanto a indutância incremental das bobinas AC associadas é baixa. Quando ocorre um curto-circuito, a amplitude anormal da corrente de curto-circuito é capaz, com uma fmm contrária, de levar os núcleos para fora da saturação, região C-D da característica magnética. Aqui a permeabilidade incremental magnética do núcleo aumenta muito, resultando num aumento considerável da indutância da bobina, conseqüentemente, uma elevada impedância, o que limita a corrente de curto-circuito. Dependendo da polaridade da corrente AC, as bobinas AC alternadamente levam o núcleo para fora ou para a saturação, de forma a limitar a corrente em cada meio ciclo da corrente.

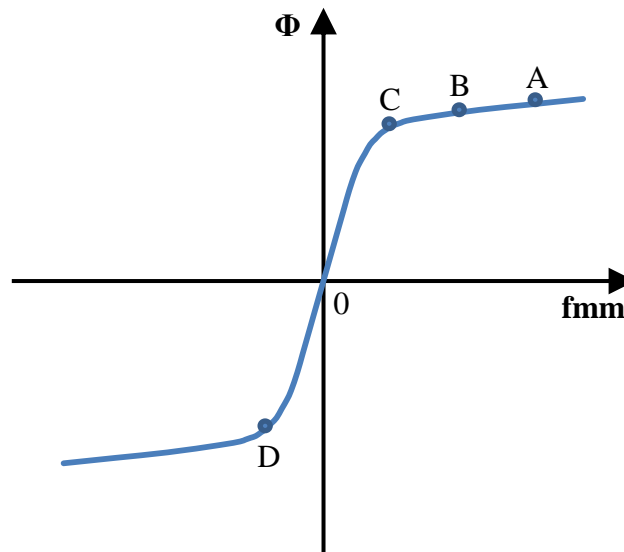


Figura 3.3: Ilustração dos pontos de funcionamento do núcleo.

A indutância do LCCC pode ser caracterizada em função da corrente AC como mostra a Figura 3.4. A corrente i_{joelho} corresponde ao ponto de funcionamento C enquanto que i_{max} corresponde ao ponto de funcionamento D. Se o valor da corrente aumentar acima de i_{max} , o núcleo entra novamente na saturação, como resultado, a indutância do LCCC cai para valores baixos. Portanto i_{joelho} define o valor da corrente na linha para a qual o LCCC começa a limitar e i_{max} define o valor da corrente na linha para a qual o LCCC perde a capacidade de limitação.

As vantagens de se utilizar esta abordagem incluem um projecto de dimensionamento do núcleo simples e simétrico, robustez e um funcionamento seguro. No entanto, a escolha para o projecto de dois núcleos por fase, cada um com bobinas enroladas na coluna central, torna difícil a aplicação desta abordagem num projecto de um LCCC trifásico compacto por serem precisos seis núcleos, afastados uns dos outros por uma margem de segurança. Além do grande volume do LCCC o projecto da criogenia seria um desafio. O projecto original utiliza um criostato de azoto líquido bastante volumoso, para arrefecer a bobina DC supercondutora. Os dispositivos de maior potência podem ter dimensões maiores o que poderá ser necessário que cada núcleo tenha o seu próprio criostato e bobina DC supercondutora. Outro problema com este projecto é o acoplamento magnético entre as bobinas AC e DC quando ocorre um CC. A alta tensão aos terminais da bobina AC pode

induzir uma grande queda de tensão aos terminais da bobina DC e causar a destruição da fonte de alimentação DC. Como medida de protecção, foi utilizada uma resistência em série com a bobina DC, causando perdas elevadas no circuito de polarização.

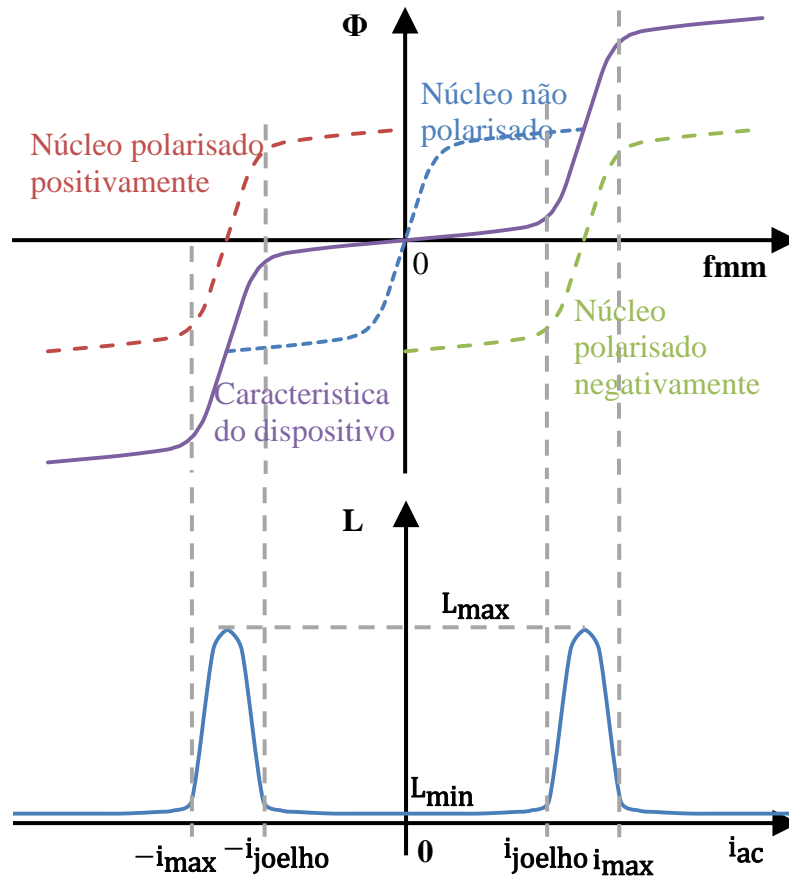


Figura 3.4: Indutância do LCCC de núcleos saturados em função da corrente.

É com base nesta topologia de LCCC de núcleos saturados, proposto por (Raju et al., 1982), que será simulado, construído e ensaiado o LCS ainda que sem núcleos de ferro separados para cada fase.

3.1.2 LCCC de Indutância Saturável

Um limitador de corrente de indutância saturável foi proposto em (Oberbeck, Stanton, & Stewart, 1979). A estrutura do LCCC monofásico é mostrada na Figura 3.5. O LCCC é construído por um núcleo com quatro colunas. A última coluna contém por um entreferro. A bobina de polarização DC é enrolada na terceira coluna. As bobinas AC são enroladas na primeira e segunda coluna e são enroladas em sentidos opostos e ligadas em série com a linha a ser protegida. A corrente DC de polarização da bobina DC provoca um fluxo DC que leva o núcleo à saturação. No estado normal a corrente AC não é suficiente para tirar o núcleo da saturação portanto a indutância das bobinas AC é baixa. Quando ocorre um CC, a elevada corrente do CC provoca uma f_{mm} de intensidade suficiente

que supera a fmm gerada pela corrente DC de polarização e tira da saturação a coluna da bobina AC que gera a fmm contrária. A indutância da bobina AC aumenta durante o CC limitando a corrente de CC.

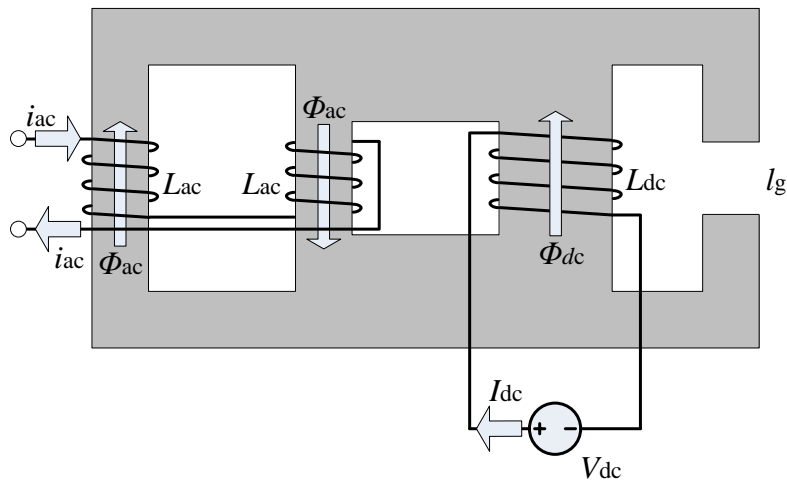


Figura 3.5: Limitador de corrente de indutância saturável.

A grande vantagem desta configuração para o núcleo é que em condição de CC o fluxo AC tira da saturação uma das colunas que contem uma bobina AC e depois flui através da coluna que tem o entreferro em vez da coluna fortemente saturada que contem a bobina de polarização DC. Assim o fluxo AC é desviado da bobina DC, resultando numa redução significativa do acoplamento magnético entre a bobina AC e a bobina DC e conseqüentemente numa tensão induzida no enrolamento DC.

A principal desvantagem é as perdas significativas no circuito de polarização, uma vez que é usado uma bobina DC comum e não supercondutora. Isto restringe o nível da corrente de polarização que se pode atingir e por sua vez, a fmm atingível. Além disso, assumindo que as colunas das bobinas AC e do entreferro têm a mesma secção transversal, de modo a manter as colunas das bobinas AC fortemente saturadas, com o mesmo campo de indução magnética, a secção transversal das travessas do núcleo, entre a coluna da bobina DC e da coluna da bobina AC, terá que ser duas vezes a secção transversal da coluna da bobina AC, enquanto que a secção transversal da coluna DC deverá ser duas e até três vezes a secção transversal da coluna da bobina AC. Como resultado, o LCCC apresenta uma estrutura do núcleo complicada e difícil de fabricar. Assim, o desacoplamento magnético alcançado entre a bobina AC e a bobina DC tem como consequência o aumento dos custos relacionados com o volume e peso adicional do núcleo bem como a complexidade dos custos de fabricação.

No artigo (Oberbeck et al., 1979) não existe nenhuma sugestão sobre como construir um LCCC trifásico. Uma possível solução é utilizar três unidades monofásicas. Outra solução possível é estender o núcleo magnético, de modo a se adicionar dois pares de colunas para bobinas AC, assim pode-se utilizar três pares de bobinas AC, um par para cada fase, só sendo necessário uma bobina DC de polarização, no entanto esta solução torna a estrutura do núcleo ainda mais complicada.

Outra desvantagem que pode resultar da assimetria do núcleo é valores diferentes para i_{joelho} , i_{max} e L_{max} para as arcadas positiva e negativa da corrente.

3.1.3 LCCC do Tipo Interruptor Controlado Magneticamente

O LCCC monofásico mostrado na Figura 3.6 foi proposto em 2008 por Pan Yanxia (Pan & Jiang, 2008). Este LCCC foi construído com um núcleo em EI tendo as bobinas AC enroladas nas colunas exteriores, de secção transversal menor do que a secção transversal da coluna central. A bobina de polarização DC foi enrolada na coluna central. Outra característica adicional é a introdução de uma bobina L_{dc} em série com a fonte de alimentação DC. Devido a estas características, o princípio de funcionamento do LCCC é diferente dos que foram mencionados anteriormente.

O LCCC é ligado à linha como mostra a Figura 3.6. No estado normal, as colunas exteriores estão saturadas enquanto o restante núcleo permanece na região linear. Isto ocorre devido à menor secção transversal das colunas exteriores. Como resultado da saturação das colunas exteriores, a indutância das bobinas AC e portanto a sua impedância, é muito baixa.

Numa condição de CC, a grande amplitude da corrente de CC leva uma das colunas externas para uma saturação mais profunda enquanto a outra coluna externa é levada para fora da saturação. Assim, um circuito magnético fechado com uma permeabilidade magnética elevada é estabelecido o que provoca um elevado acoplamento magnético entre a bobina AC da coluna não saturada e a bobina DC. Assim, o dispositivo começa a funcionar como um transformador linear. Em primeiro lugar, a bobina AC da coluna não saturada exibe uma elevada impedância e começa a agir como primário do transformador. Em segundo lugar, por causa da acção do transformador, a impedância do circuito DC é reflectido para a linha.

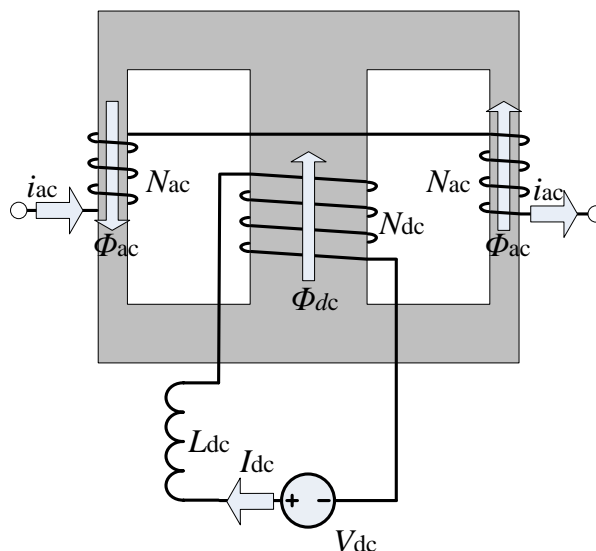


Figura 3.6: LCCC do tipo interruptor controlado magneticamente.

A vantagem de termos só as colunas exteriores saturadas é que a indutância da bobina DC permanece relativamente elevada o que requer uma menor corrente de polarização para manter as

colunas das bobinas AC saturadas. Esta característica permite que se utilize uma bobina de polarização comum, ou seja, não supercondutora. Assim o custo de fabricação e manutenção dos sistemas de suporte auxiliares podem ser inferiores. Esta vantagem compensa o volume adicional, peso e custo do núcleo bem como a bobina DC auxiliar, L_{dc} .

A impedância do dispositivo quando ocorre um CC é determinada pela impedância da bobina L_{dc} , reflectida de acordo com a relação de espiras das bobinas AC e DC, em paralelo com a indutância da bobina AC que se encontra na coluna não saturada. A elevada impedância introduzida na linha ajuda a limitar a corrente de CC. No entanto, uma vez que a impedância reflectida e de magnetização aparecem em paralelo, a impedância equivalente é reduzida. Por conseguinte, a eficácia deste método é um pouco aquém do desejado, de modo que é necessário um maior número de espiras na bobina AC. Isto resulta num dispositivo com uma janela de maior área, um núcleo maior, e mais peso em cobre. Além disso, uma maior impedância no estado normal provoca uma maior queda de tensão aos terminais do LCCC.

Para saturar o núcleo do LCCC requer-se uma fmm intensa, que é conseguida por uma bobina DC com um número considerável de espiras não supercondutoras. Assim, a relação de espiras entre as bobinas AC e DC é considerável, resultando numa elevada tensão induzida na bobina DC, quando ocorre um CC. Assim é necessário um isolamento apropriado para a bobina DC, aumentando ainda mais a espessura e o volume da bobina DC e conseqüentemente a área da janela do núcleo e o tamanho geral deste. Outra preocupação está relacionada com a bobina L_{dc} pois embora a corrente da fonte de alimentação esteja limitada pela bobina L_{dc} , uma alta tensão no circuito de polarização DC provoca um problema de segurança. Todas estas desvantagens são graves.

3.1.4 LCCC de Núcleos Saturados Melhorado com Desacoplamentos Magnético

O LCCC proposto em (Oberbeck et al., 1979) foi melhorado por (Cvoric, De Haan, & Ferreira, 2008) de modo a se obter um melhor desacoplamento entre as bobinas AC e DC. A ideia foi mudar a posição das bobinas DC e AC como mostra a Figura 3.7. A bobina de polarização foi enrolada na coluna exterior enquanto a bobina AC foi enrolada na coluna central. Caso contrário o princípio de funcionamento seria o mesmo.

A vantagem desta configuração é que quando ocorre um CC, o fluxo AC flui através da coluna não saturada com entreferro, colocada a uma maior distância da bobina DC. Assim o acoplamento magnético entre as bobinas AC e DC é mais fraco que na configuração original (Oberbeck et al., 1979). Portanto este LCCC apresenta uma menor queda de tensão induzida na bobina DC. De notar que, em caso de CC, a permeância do caminho magnético da bobina AC é determinada principalmente pelo entreferro. Quanto menor for o entreferro, maior é a permeância, assim a bobina AC pode ser construída com um menor número de espiras, resultando em menos quantidade de cobre utilizado, uma impedância menor no estado normal, uma menor queda de tensão e menos perdas.

No entanto, a necessidade de uma coluna adicional, a estrutura do núcleo assimétrica e o volume de ferro utilizado, e os custos continuam a ser as principais desvantagens.

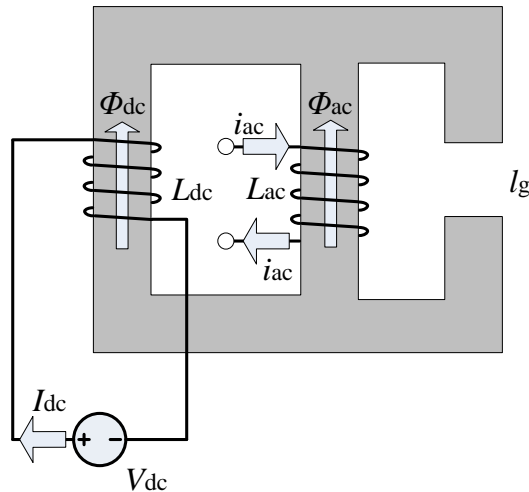


Figura 3.7: LCCC de núcleos saturados com desacoplamentos magnético.

Outra ideia para implementar o LCCC com um menor volume foi apresentado em (Cvoric, De Haan, & Ferreira, 2011). Este LCCC foi projectado com um par de núcleos do tipo EI com a coluna do meio apresentando um entreferro.

3.1.5 LCCC de Núcleo Aberto Saturado

A estrutura do LCCC de núcleo aberto saturado (Rozenshtein et al., 2007) é mostrada na Figura 3.8. Este LCCC apresenta uma ideia original diferente de todas as anteriores. A bobina DC é enrolada numa das travessas de um núcleo de ferro em UI, fechado. A bobina AC é enrolada à volta do núcleo de modo a englobar ambas as colunas do núcleo. Devido a esta configuração, o núcleo proporciona um caminho magnético fechado para o fluxo de polarização DC, no entanto, apresenta-se como um núcleo aberto para a bobina AC.

O núcleo de ferro de permeabilidade magnética elevada pode ser facilmente saturado por uma corrente de amplitude moderada para a bobina de polarização DC. De notar que o fluxo DC flui pelas colunas em sentidos opostos através do interior da bobina AC. Independentemente da polaridade da corrente AC, a fmm imposta pela bobina AC cria um fluxo AC que reforça o fluxo DC em uma coluna do núcleo e enfraquece o fluxo DC na outra coluna do núcleo. No estado normal o fluxo AC é baixo, então todos os segmentos do núcleo encontram-se saturados e a bobina AC actua como se de uma bobina com núcleo de ar se tratasse, resultando numa indutância baixa da bobina AC. No caso de um CC, a grande amplitude da corrente AC tira da saturação a coluna do núcleo que apresenta o fluxo DC de sentido contrário ao fluxo AC criado. Assim, a bobina AC actua como se tivesse um núcleo de ferro com uma elevada permeabilidade magnética e, conseqüentemente, uma grande indutância.

A principal vantagem neste LCCC é que apenas um núcleo de ferro e uma bobina AC são necessários, por fase. Um LCCC trifásico requer três núcleos e apresenta aproximadamente metade do tamanho dos dispositivos anteriormente mencionados. Uma única bobina DC pode ser utilizada nos três núcleos. Além disso, se for utilizada uma bobina supercondutora para a bobina DC, aumenta

a performance do circuito de polarização e reduz as perdas deste. Esta abordagem permite diminuir o volume, peso e custo do LCCC e permite projectar um dispositivo mais compacto.

Outra vantagem importante deste LCCC é a diminuição do acoplamento magnético entre a bobina AC e a bobina DC resultante da forma como as bobinas estão inseridas no núcleo.

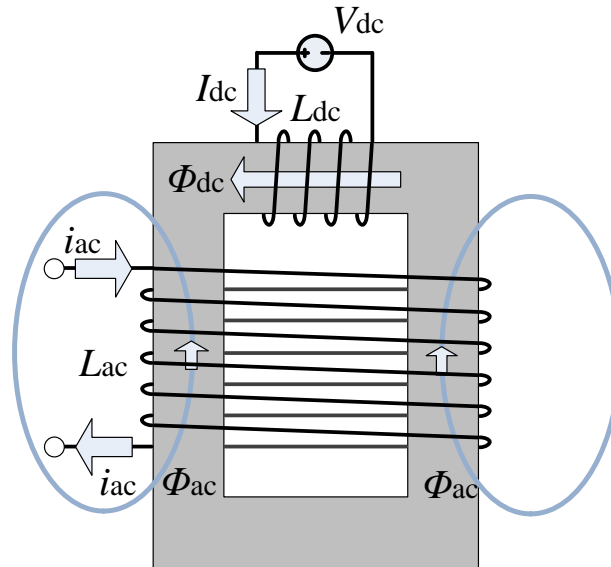


Figura 3.8: LCCC de núcleo aberto saturado.

3.2 Circuito de Polarização DC

A maioria dos LCCC de núcleos saturados necessita de uma fonte de polarização DC, de baixa tensão, que forneça elevadas correntes ao circuito de polarização. O circuito de polarização pode ser constituído por uma ponte rectificadora não regulável ou controlada por fase, ou por uma fonte de alimentação comutada. A principal vantagem de se usar uma fonte de alimentação controlada é poder controlar o ponto de funcionamento do limitador ajustando-se a corrente de polarização.

O uso de uma fonte de tensão comutada é preferido devido à sua eficiência ser muito maior. A Figura 3.9 mostra um exemplo de um circuito de polarização comutado.

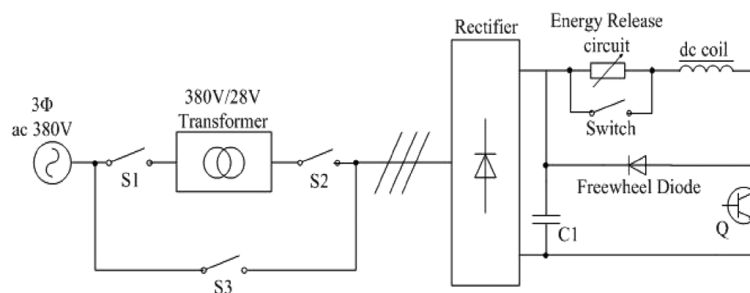
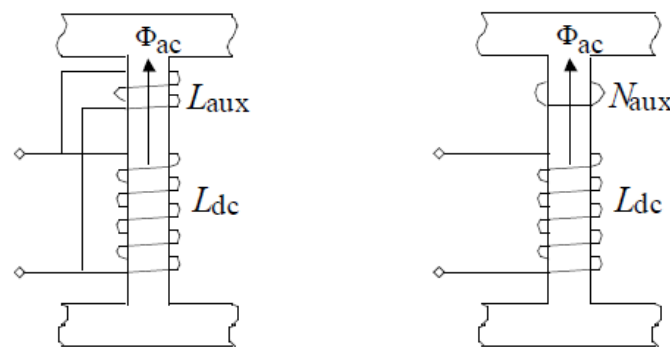


Figura 3.9: Retirado de (Patterson et al., 2011).

Este circuito é composto por um conversor redutor alimentado por um rectificador trifásico (Hong et al., 2009). A bobina supercondutora DC é utilizada como a bobina do circuito redutor. A alta indutância da bobina DC permite atingir uma ondulação de corrente de saída baixo. O conversor é controlado pelo ciclo de serviço de modo a providenciar uma regulação precisa para a corrente média da bobina DC.

Uma das principais preocupações, comum aos LCCC de núcleos saturados, é o aumento da tensão na bobina de polarização DC. Este aumento de tensão pode ocorrer quando o núcleo onde a bobina está inserida sai da saturação para a zona linear do núcleo, que pode induzir uma tensão muito elevada na bobina DC. Uma vez que o número de espiras da bobina DC é maior do que o número de espiras da bobina AC, torna este problema muito sério, pois pode danificar a fonte de polarização, queimar o supercondutor ou queimar o seu isolamento eléctrico ou destruir o crióstato.

Um resistor de óxido de zinco (ZnO) que permite libertar a energia acumulada no circuito de polarização, instalado em série com a bobina DC foi proposto por (Hong et al., 2009), como se pode ver pela Figura 3.9. No estado normal de funcionamento, um interruptor é utilizado para curto-circuitar o resistor ZnO, de modo a melhorar a eficiência do circuito de polarização. Quando uma falha ocorre, o interruptor é aberto de modo a que a corrente da bobina DC seja desviada para o resistor ZnO, que absorve a energia acumulada ao mesmo tempo que mantém uma tensão constante aos terminais da bobina DC. Isto ajuda a proteger a bobina DC e o circuito de polarização das tensões induzidas. A desvantagem deste método é a rapidez com que o interruptor é actuado, pois necessita-se de uma rápida actuação no interruptor.



a) Enrolamento auxiliar em paralelo

b) Enrolamento auxiliar curto-circuitado

Figura 3.10: Enrolamentos supressores. Retirado de (Patterson et al., 2011).

Uma abordagem diferente foi proposta por (Xin, Zhang, & Gong, 2010). Um enrolamento não supercondutor de poucas espiras, L_{aux} , foi enrolada em redor da coluna da bobina DC e ligada electricamente em paralelo com o enrolamento de polarização supercondutor, L_{dc} , como é mostrado na Figura 3.10 a). No estado normal, a corrente de polarização DC percorre o enrolamento supercondutor devido à sua resistividade nula. Numa condição de falha, a tensão aos terminais dos dois enrolamentos paralelos é determinado pelo baixo número de espiras do enrolamento auxiliar de

modo que a tensão que surge aos terminais da bobina DC é efectivamente reduzida. A desvantagem deste método é que, embora a tensão aos terminais da bobina seja baixa, a tensão AC induzida, por causa dos enrolamentos agirem como um transformador, contribui para aumentar a corrente no circuito de polarização.

Uma outra ideia foi proposta em (Oberbeck et al., 1979). De modo a proteger a bobina DC de correntes induzidas por causa do fluxo magnético AC, um enrolamento curto-circuitado foi adicionado à coluna que contem a bobina DC, Figura 3.10 b). Este enrolamento curto-circuitado não tem qualquer efeito sobre o fluxo DC criado pela bobina de polarização, contudo reagem ao fluxo magnético AC. A corrente que surge por indução no enrolamento curto-circuitado tende a reduzir o fluxo AC indesejado na coluna da bobina DC. Isto parece ser uma óptima solução para este problema, no entanto, (Oberbeck et al., 1979) não fornece nenhum relatório experimental sobre a eficácia ou limitações deste método.

3.3 Conclusão

Neste capítulo analisaram-se as diferentes tecnologias de LCCC de núcleos saturados para sistemas de energia. A pesquisa e desenvolvimento de dispositivos LCCC já vêm de há muitos anos, contudo a diversidade de conceitos de LCCC ainda é bastante limitado. Aparentemente, a maior parte do esforço tem vindo a ser dedicado à optimização dos componentes, melhorar a eficácia e reduzir os custos de um número limitado de ideias básicas. Em todas as topologias podem ser usadas bobinas supercondutoras para saturarem os núcleos, dependendo isto dos custos associados.

As maiores dificuldades dos dispositivos de LCCC de núcleos saturados predem-se com o acoplamento magnético e, mais importante, o elevado volume necessário de núcleos ferromagnético, o que influencia no peso. Isto desafia a viabilidade comercial destes dispositivos.

4 Simulação do Limitador de Corrente de Núcleos Saturados por Elementos Finitos

Neste capítulo pretende-se descrever todos os passos realizados para a simulação do LCS de núcleos saturados.

Em primeiro lugar procedeu-se à obtenção da característica de primeira magnetização, em termos de B-H, do núcleo utilizado para a construção do LCS, por ensaio experimental.

De seguida procederam-se às simulações do LCS num programa de elementos finitos, o Flux2D. Para a realização das simulações definiram-se o tipo de núcleo utilizado, a partir da característica de primeira magnetização, a configuração das bobinas AC e da bobina DC, a configuração da rede eléctrica onde o LCS foi simulado e o modo como são feitos os curtos-circuitos na rede. Foi utilizado um computador com um processador Intel Core 2 Quad Q9550, de quatro núcleos a funcionar a 2,83GHz, com 3,25GB de memória RAM utilizável e sistema operativo Windows 7 Professional com SP1 de 32bits.

O limitador estudado é o proposto no capítulo 3.1.1, representado na Figura 4.1 a). Por razões construtivas, as duas bobinas AC estão ambas montadas no mesmo núcleo de duas janelas (Figura 4.1 b). Também o circuito de magnetização poderá levar uma bobina amortecedora em curto-circuito, feita de cobre.

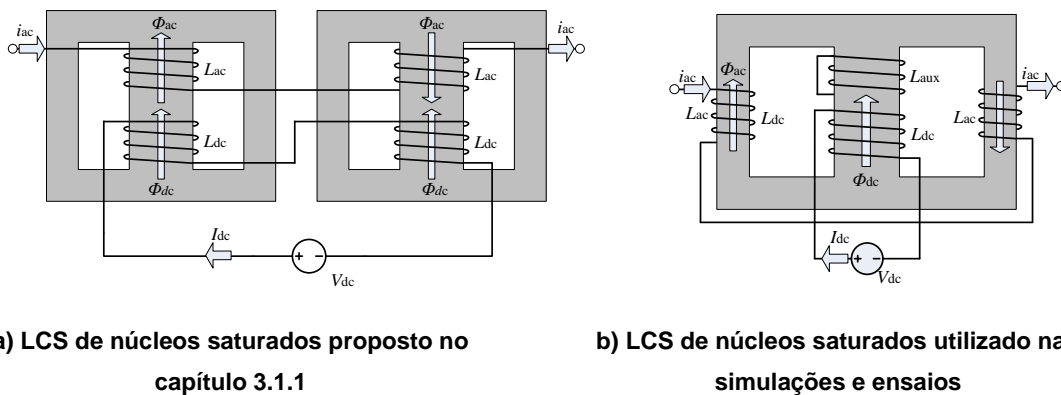


Figura 4.1: Estrutura conceptual do LCS de núcleos saturados proposto no capítulo 3.1.1 e o utilizado para as simulações e montagem experimental.

Discutem-se por fim os resultados obtidos nas simulações efectuadas.

4.1 Característica Magnética de Primeira Magnetização do Núcleo Ferromagnético Utilizado para a Construção do Protótipo

Um material magnético produz no seu interior e no espaço que o rodeia um campo de indução magnética, B, quando for submetido à acção de um campo magnético, H. A indução magnética é dada assim pela seguinte equação, num meio linear:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (4.1)$$

Na realidade, num meio ferromagnético a relação B-H é essencialmente não linear. Se se submeter à acção de um campo magnético, H, um material desmagnetizado, e fazer variar H de zero até se atingir a magnetização de saturação (em H_{max}), regista-se o valor de B e de H. O gráfico B em função de H é o gráfico da curva de primeira magnetização, como está representado na Figura 4.2.

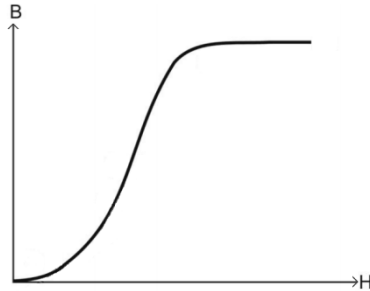


Figura 4.2: Exemplo de curva de primeira magnetização de um material magnético.

Fazendo-se variar H entre H_{max} e $-H_{max}$ obtém-se uma curva fechada que se repete, curva esta designada de ciclo de histerese.

A forma do ciclo de histerese depende do valor máximo que o campo magnético toma. A Figura 4.3 apresenta vários ciclos de histerese correspondente a vários valores máximos de H. A curva da Figura 4.3 que se obtém ao se ligar os vértices dos ciclos de histerese simétricos, é a característica de primeira magnetização.

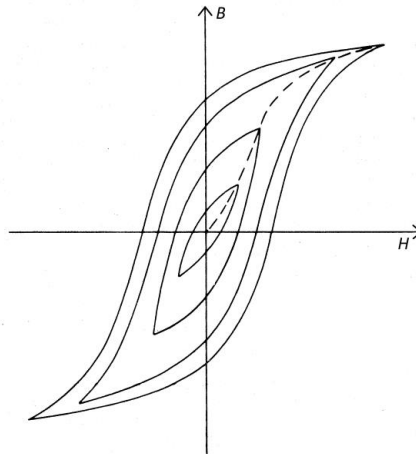


Figura 4.3: Curvas de histerese em função de Hmax.

Para a determinação dos ciclos de histerese dinâmicos foi utilizado o esquema eléctrico da Figura 4.4 para a montagem experimental.

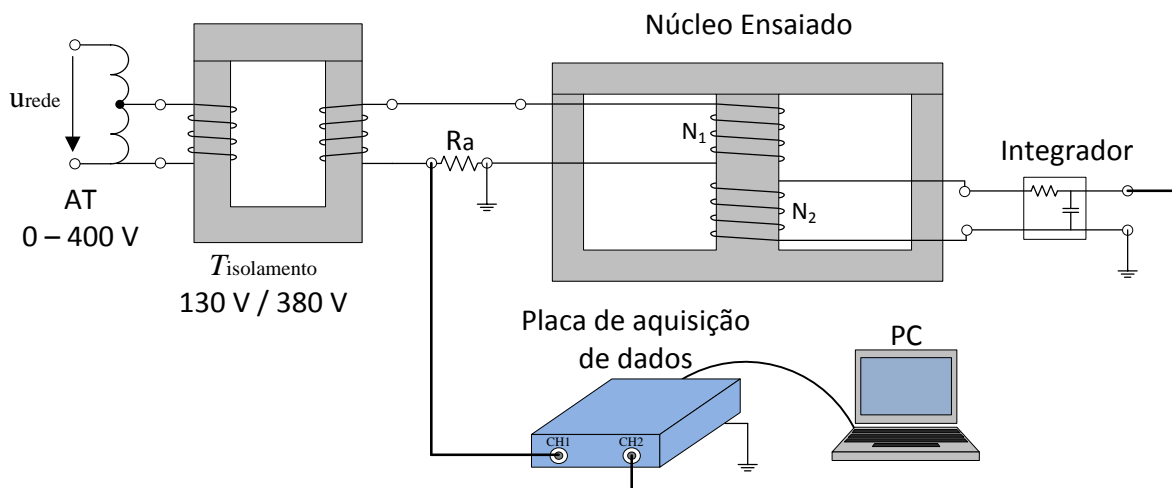
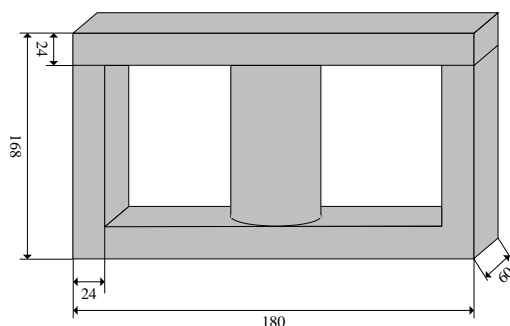


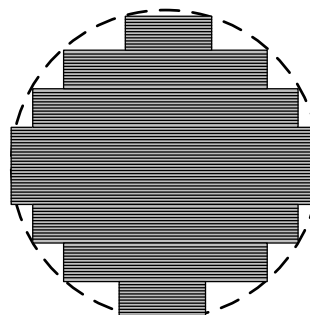
Figura 4.4: Montagem experimental para a determinação da característica de primeira magnetização do núcleo.

O material utilizado e esquematizado na Figura 4.4 foi o seguinte:

- ➔ Autotransformador (AT) de 0 – 400 V que permite variar a tensão no primário do núcleo ensaiado.
- ➔ Transformador de isolamento (Tisolamento) utilizado para fazer o isolamento galvânico da montagem experimental da rede eléctrica.
- ➔ Resistor de amostragem (R_a), de $0,5 \Omega$ que permitiu medir a corrente no primário do núcleo ensaiado.
- ➔ Integrador passivo com uma constante de tempo de 1 segundo.
- ➔ Aparelho para aquisição de dados, PicoScope 3204, que permitiu adquirir o valor das tensões no resistor de amostragem e a tensão à saída do integrador.
- ➔ Computador (PC) para receber e tratar os dados vindos do PicoScope.
- ➔ Bobina primária, B_{prim} , com 70 espiras e Bobina secundária, B_{sec} , com 65 espiras.
- ➔ Núcleo Ensaiado com configuração em EI, com as medidas presentes na Figura 4.5 (medidas em milímetros). O diâmetro da coluna central é de 60 milímetros.



a) Esquema do núcleo



b) Secção da coluna central

Figura 4.5: Esquema do núcleo ensaiado.

Pretendia-se que a soma das áreas das secções das colunas exteriores fossem igual à da coluna central, na realidade há uma diferença de cerca de 6,3%, ou seja, a área da secção da coluna central deveria ser 6,3% maior. Isto deve-se sobretudo ao facto de a coluna central não ser totalmente circular como se pode ver na Figura 4.5 b).

Para a obtenção do ciclo de histerese necessitou-se adquirir a corrente de magnetização e o fluxo no ferro, sinais independentes um do outro.

O Núcleo ensaiado tem duas bobinas, uma que serviu para magnetizar o núcleo, B_{prim} , a partir da corrente de magnetização, i_1 , e outra bobina em aberto, B_{sec} , que serviu para se obter uma tensão que depois de integrada, é proporcional ao fluxo no núcleo.

A corrente de magnetização foi obtida a partir da corrente que atravessa a bobina B_{prim} . Isto foi feito colocando em série com B_{prim} um resistor de baixa resistência, R_a , e adquiriu-se a queda de tensão neste resistor, u_A , que é proporcional à corrente de magnetização.

$$u_A = R_a i_1 \Leftrightarrow i_1 = \frac{u_A}{R_a} \quad (4.2)$$

A tensão numa bobina de um transformador é dada pela equação (4.3).

$$u_{bobina} = ri + \lambda \frac{di}{dt} + N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.3)$$

Sendo u_{bobina} a tensão aos terminais da bobina, i a corrente que a atravessa, r a resistência da bobina, λ o coeficiente de auto indução relativo à dispersão, N o número de espiras da bobina e ϕ o fluxo simples no núcleo da bobina.

Como a bobina B_{sec} está em aberto, a corrente é zero, então a equação (4.3) resume-se à equação (4.4).

$$u_{bobina} = N \frac{d\phi}{dt} \Leftrightarrow \phi = \frac{1}{N} \int u_{bobina} dt \quad (4.4)$$

O fluxo no núcleo da bobina pode assim ser obtido a partir da integração da tensão aos terminais da bobina.

O integrador deve apresentar uma impedância de entrada muito elevada, muito maior que a impedância da bobina em estudo, para que a corrente absorvida por este seja desprezável e a bobina possa ser considerada em vazio.

O integrador usado foi um integrador passivo RC (Figura 4.4) de constante de tempo igual a 1 segundo. A tensão de saída do integrador, u_s , e a tensão à entrada do integrador, u_e , relacionam-se pela equação (4.5). Foi escolhido uma constante de tempo de 1 segundo pois para que este circuito funcione de integrador para sinais de entrada de frequência ω , a constante de tempo deverá ser muito maior que o inverso da frequência ω .

$$u_s = \frac{1}{\tau} \int u_e dt \quad (4.5)$$

A constante de tempo é dada pela resistência R e pela capacidade C dos elementos passivos do integrador (equação (4.6)).

$$\tau = RC \quad (4.6)$$

Assim, combinando as equações (4.4) e (4.5) podemos calcular o fluxo no núcleo através da seguinte expressão.

$$u_s = \frac{N}{\tau} \phi \Leftrightarrow \phi = \frac{\tau}{N} u_s \quad (4.7)$$

Fez-se então a montagem experimental da Figura 4.4. Aplicou-se uma tensão alternada sinusoidal ao primário. O valor da indução máxima, B_m , foi controlado a partir da variação da tensão do autotransformador, assim cada valor de tensão impõe um determinado B_m . O PicoScope envia para o PC os valores das tensões u_{Ra} (queda de tensão do resistor de amostragem) e u_s (queda de tensão à saída do integrador). Programou-se um programa de computador (em linguagem C# e no Microsoft Visual Studio 2012) presente na Figura 4.6, para recolher e tratar os dados vindos do PicoScope, devolvendo num ficheiro os pontos da característica de primeira magnetização em termos de fluxo simples-corrente. Configurou-se o programa com o valor da resistência do resistor de amostragem, a constante de tempo do integrador e o número de espiras do secundário. Em determinados momentos, indicados pelo programa, aumentou-se a tensão do AT de forma a se obter vários ciclos de histerese, de seguida calcular o ponto máximo de cada ciclos e a partir das equações (4.2) e (4.7) calcular a corrente de magnetização e o fluxo simples associados a cada ponto. Obtiveram-se 26 pontos no total.

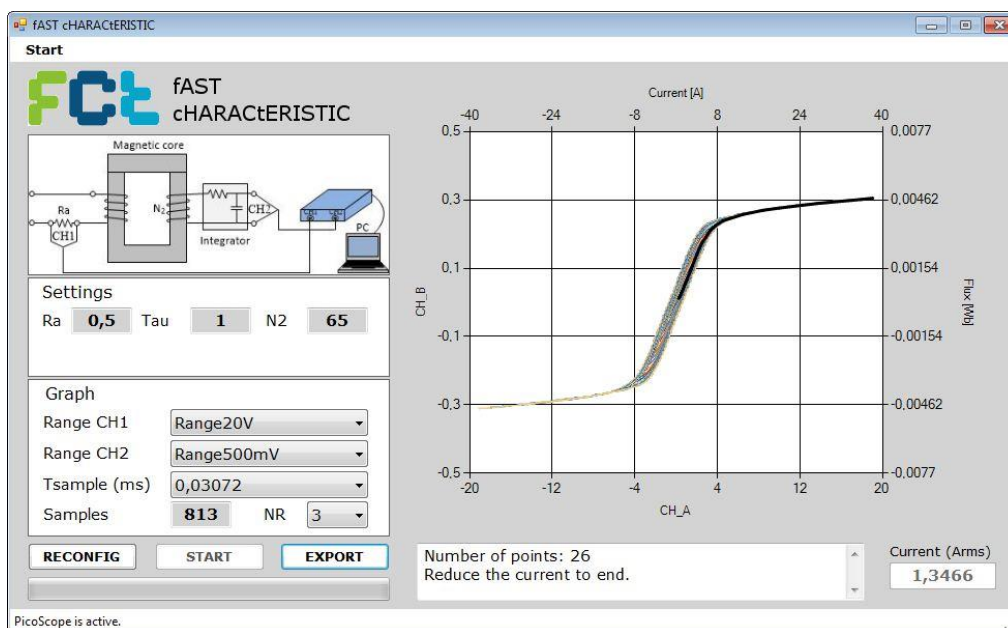


Figura 4.6: Programa que obtém a característica de primeira magnetização a partir dos dados recebidos do ensaio anteriormente descrito.

Os pontos da característica de primeira magnetização devolvidos pelo programa estão em unidades de fluxo simples e corrente, ϕ e i , para se obter a característica em termos de B e H necessitou-se utilizar as equações a seguir indicadas.

Pela lei de Ampère obtém-se a relação entre a corrente i_1 e o campo magnético H , equação (4.8), onde N é o número de espiras do primário e l é o caminho de integração, indicado na Figura 4.7. Fez-se uma aproximação onde se considera que o campo magnético é invariante ao longo do caminho l (tratando-se de um meio homogêneo exige-se que a indução magnética seja invariante o que só é verdade caso a secção ao longo do caminho l se mantenha constante, que na prática não se verifica).

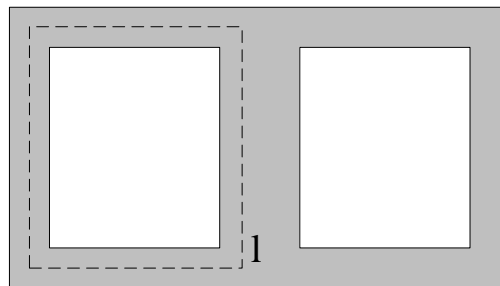


Figura 4.7: Caminho utilizado para a aplicação da lei de Ampère.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot i \Leftrightarrow H = \frac{N \cdot i}{l} \quad (4.8)$$

A relação entre o fluxo simples e o campo de indução magnético é dado pela equação (4.9) onde S é a secção transversal a \vec{B} .

$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \underset{B=cte.}{\Leftrightarrow} B = \frac{\phi}{S} \quad (4.9)$$

Assim, a partir das equações (4.8) e (4.9) obteve-se a característica de primeira magnetização em B-H, representada na Figura 4.8.

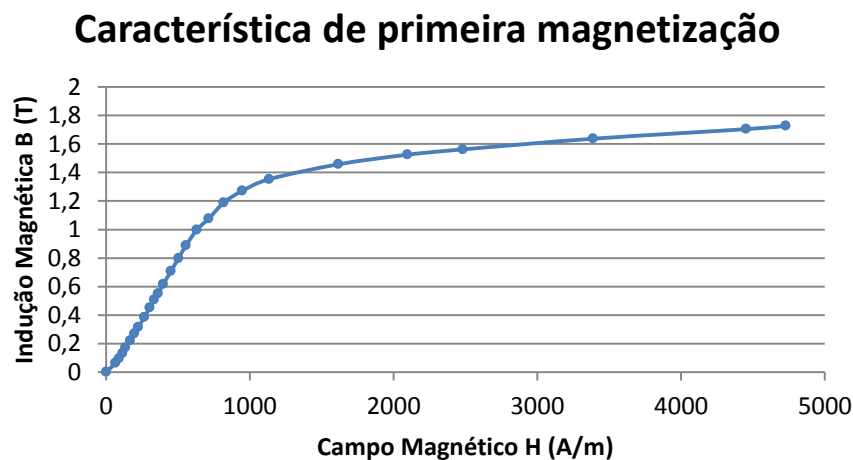


Figura 4.8: Característica de primeira magnetização do núcleo ensaiado.

Pode-se concluir que a característica de primeira magnetização é aproximadamente linear até perto de 1,2 T, joelho da curva, a partir deste ponto começa a haver saturação magnética.

4.2 Configuração do Flux2D

Antes de se construir o protótipo do LCS de núcleos saturados, foram efectuadas várias simulações para verificar o comportamento do LCS. Estas simulações foram feitas num programa de elementos finitos, o Flux2D. De seguida foram analisados os dados das simulações, todas as grandezas electromagnéticas envolvidas, principalmente a corrente da linha e o fluxo ligado com as bobinas AC do dispositivo.

4.2.1 Topologia do Limitador Utilizado nas Simulações

O primeiro passo tomado foi a definição da geometria do limitador no Flux2D. As medidas utilizadas são as do núcleo adquirido para a construção do LCS mas adaptadas a uma configuração em 2D. A Figura 4.9 apresenta as dimensões do núcleo utilizado nas simulações. O núcleo tem as colunas exteriores e a travessa superior e inferior com a mesma largura, 24 mm. Para a coluna central foi utilizada uma largura de 45 mm de modo a manter a mesma área de secção da mesma coluna do núcleo real, pois este apresenta a coluna central em formato cilíndrico. A profundidade do núcleo definida no Flux2D foi de 60 mm.

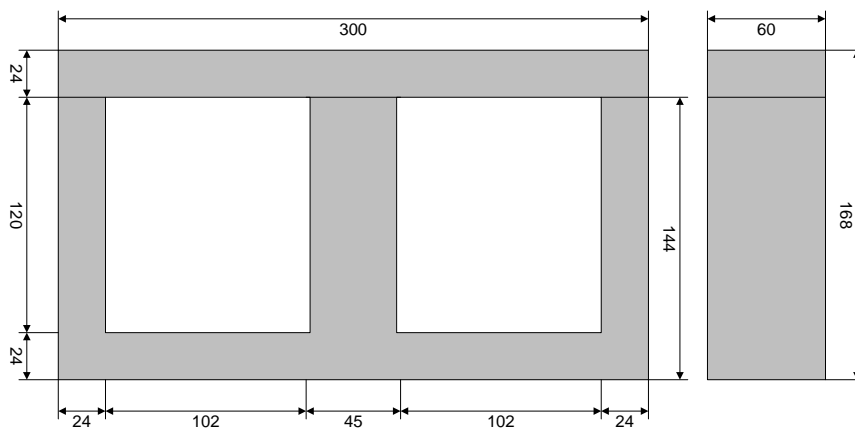


Figura 4.9: Dimensões do núcleo utilizado nas simulações, com dimensões em milímetros.

A Figura 4.10 mostra a geometria do limitador, implementada no Flux2D e composta por várias zonas geométricas, que são zonas limitadas por linhas ou curvas. O núcleo é composto por duas zonas geométrica, a travessa superior e o restante núcleo, ambas representadas a cor cinzenta, separadas por um pequeno entreferro, linha branca. As bobinas são caracterizadas cada uma por duas zonas geométricas (duas placas), zona à esquerda e zona à direita da respectiva coluna do núcleo. As bobinas AC estão representadas a cor de laranja e a bobina DC a vermelho. O programa usado exige que se defina independentemente a corrente em cada uma destas placas, o que obriga a que o circuito equivalente tenha duas bobinas fictícias em série, uma para cada placa, representando assim uma bobina real.

O Flux2D é um programa de elementos finitos em 2D, ou seja, inseriu-se no programa a topologia do limitador mostrada na Figura 4.10, em 2D, e depois indicou-se uma profundidade para se poder simular como se em 3D se tratasse. A profundidade do domínio corresponde à profundidade do núcleo, 60 mm. Um dos problemas de se simular em 2D é que as bobinas são modelizadas como placas paralelas quando deviam ser cilindros, o que influencia nos resultados finais obtidos.

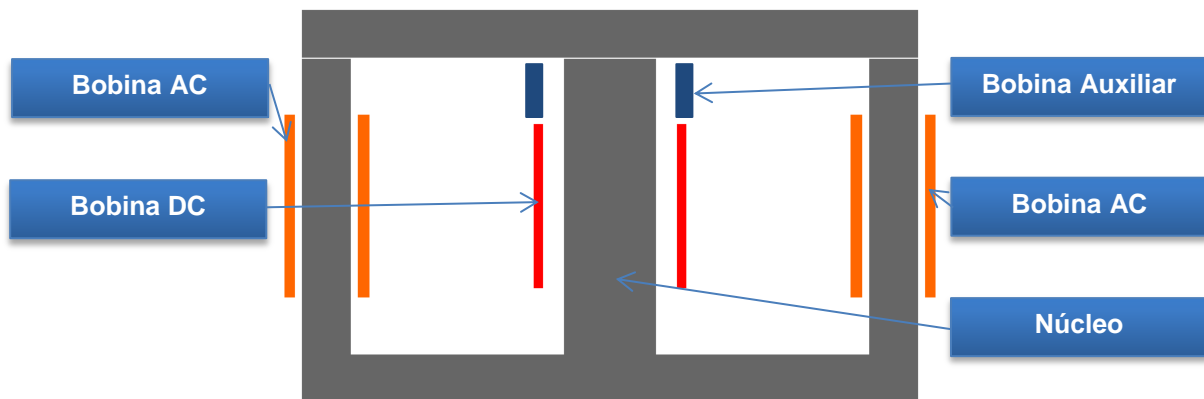


Figura 4.10: Geometria do limitador no Flux2D.

4.2.2 Malha de Elementos Finitos

O próximo passo foi a definição da malha de elementos finitos. A Figura 4.11 mostra a malha de elementos finitos utilizada nas simulações que é do tipo triangular. Como se pode observar, a malha é mais fina nas zonas onde a variação da densidade de fluxo é maior, nas zonas entre as bobinas e o núcleo.

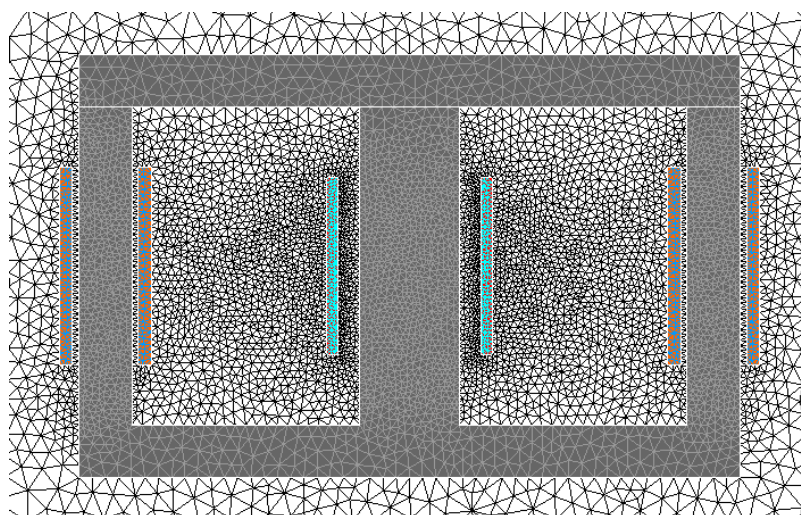


Figura 4.11: Geometria utilizada para simulação e respectiva malha de elementos finitos.

4.2.3 Definição das Propriedades Físicas

Antes de se iniciar as simulações foi necessário definir varias propriedades físicas do limitador. Para cada zona geométrica apresentada na Figura 4.10 foi preciso definir que tipo de material lhe está associado.

As zonas geométricas que representam o núcleo foram definidas como uma região magnética não condutora onde o tipo de material é caracterizado pela característica magnética apresentada na Figura 4.8.

As zonas geométricas que representam as bobinas foram definidas como uma região condutora de uma bobina. O tipo de material utilizado para caracterizar as bobinas AC foi o cobre e para a bobina DC foi um material supercondutor. As duas zonas geométricas que definem cada bobina foram definidas com uma orientação de corrente contrária, ou seja, a zona geométrica esquerda foi definida com uma orientação positiva da corrente e a zona geométrica direita com uma orientação negativa da corrente. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros definidos para as regiões que representam as bobinas.

Foi definida uma zona geométrica que representa o entreferro existente entre a travessa superior e o topo das colunas. Este entreferro é muito pequeno e de valor 0,01 mm de comprimento.

Toda a zona envolvente do limitador foi definida como uma região de ar.

Tabela 4.1: Parâmetros do limitador de corrente supercondutor.

Bobinas AC	Valor	Bobina supercondutora	Valor
Tipo de material	Cobre	Tipo do supercondutor	Bi-2223
Número de espiras	45	Temperatura crítica (K)	108
		Corrente crítica a 77K (A)	360
		Expoente n	15
		Número de espiras	50

4.2.4 Topologia da Rede Eléctrica para a Simulação do LCS

A rede eléctrica onde o LCS foi simulado está representada na Figura 4.12. É uma rede básica, composta por uma fonte de tensão alternada, V_1 , uma impedância que representa a rede, R_{Linha} , uma impedância que representa a carga, R_{Carga} , um interruptor que permite simular o CC, S_1 , e o limitador em série com a carga (representado pelas bobinas fictícias B_{1L} , B_{1R} , B_{2L} e B_{2R}).

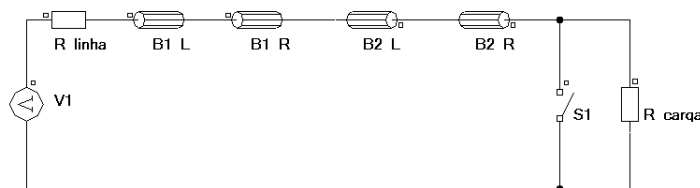
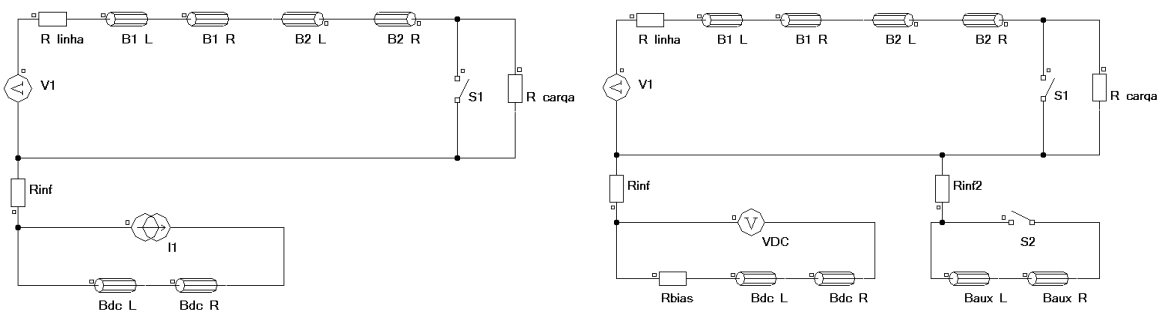


Figura 4.12: Esquema da rede eléctrica onde o limitador foi integrado.

Para a alimentação da bobina DC foram utilizados dois circuitos diferentes. Um dos circuitos utilizados tem uma fonte de corrente ideal que garante que o circuito de polarização apresente sempre a mesma corrente (Figura 4.13 a)). O outro circuito utilizado é composto por uma fonte de tensão V_{DC} que alimenta o circuito, um resistor R_{bias} que define qual a corrente imposta ao circuito, pois a bobina DC tem uma resistência muito baixa por ser supercondutora, e as bobinas fictícias B_{dcL} e B_{dcR} , bobinas estas que representam a bobina supercondutora. Existe ainda um circuito auxiliar, composto pelas bobinas fictícias B_{auxL} e B_{auxR} que tem como função reduzir os efeitos do acoplamento magnético entre as bobinas AC e a bobina DC, pois as correntes induzidas neste circuito podem danificar a fonte de alimentação (ver capítulo 3.2). O interruptor S_2 permite ligar e desligar este circuito auxiliar (Figura 4.13 b)).

As impedâncias R_{inf} e R_{inf2} têm por função ligar o circuito de polarização e o circuito auxiliar à rede, visto que se estivessem separados o simulador daria erro e não iniciava as simulações. Têm uma resistência muito elevada para se puder desprezar a corrente que as atravessa.



a) Rede com circuito de polarização composto por uma fonte de corrente

b) Rede com circuito de polarização composto por uma fonte de tensão

Figura 4.13: Esquema da rede eléctrica com os dois tipos de circuito de polarização utilizados.

Alguns componentes deste circuito eléctrico tiveram de ser associados a algumas zonas geométricas do limitador para que se possa estabelecer um paralelismo entre a parte eléctrica e a parte magnética. Os componentes B_{1L} , B_{1R} , B_{2L} e B_{2R} representam as bobinas AC do limitador e terão de ser associadas às respectivas zonas geométricas, mostradas na Figura 4.10. B_{1L} e B_{1R} representam a primeira bobina AC sendo que B_{1L} representa a zona esquerda que define a bobina enquanto que B_{1R} representa a zona direita. O mesmo se sucede para os componentes B_{2L} e B_{2R} , que representam a segunda bobina AC e B_{dcL} e B_{dcR} que representam a bobina DC. Pela Figura 4.12 pode-se verificar que as duas bobinas AC se encontram ligadas em oposição eléctrica.

A Tabela 4.2 mostra o valor dos parâmetros da rede.

Tabela 4.2: Especificação da rede utilizada na simulação.

Parâmetros	Valor
Fonte de alimentação AC $V1$ (Vef)	50 e 100
Resistência da linha R_{Linha} (Ω)	0,5
Resistência da carga R_{Carga} (Ω)	20
Resistência infinita R_{inf} e R_{inf2} (Ω)	1×10^9
Resistência de <i>bias</i> R_{bias} (Ω)	1
Resistência das bobinas AC (Ω)	0,15
Resistência da bobina DC (Ω)	1×10^{-9}
Amplitude da fonte de alimentação DC VDC (V)	variável

4.3 Simulação e Análise da Magnetização das Colunas do Núcleo do LCS

Devido às restrições de projecto associados à bobina DC e o respectivo sistema de criogenia, a posição preferida para cada bobina AC é numa coluna separada da coluna da bobina DC.

Foi realizada uma simulação em regime estático que permitiu analisar a magnetização das colunas exteriores, onde estão colocadas as bobinas AC, e da coluna central, onde está colocada a bobina DC. Este tipo de simulação é estático, ou seja, não existem referência ao tempo, o limitador não foi simulado integrado na rede da Figura 4.12, somente se alimentou a bobina DC e se registou a indução magnética em cada coluna. Fez-se variar a fmm aplicada pela bobina DC de 0 Ae até 3000 Ae de modo a se obterem a respectivas induções magnéticas nas colunas do núcleo. A Figura 4.14 mostra a indução magnética nas colunas das bobinas AC e na coluna central em função da fmm. Como se pode verificar, a indução magnética na coluna central é superior à indução magnética nas colunas exteriores, para uma dada fmm. Isto deve-se ao facto de que a secção transversal do núcleo ao longo do caminho fechado por onde passa o fluxo magnético não é constante e também devido ao fluxo de dispersão existente ao longo desse caminho fechado. O facto de a secção não ser constante ao longo do caminho por onde o fluxo passa é devido à área da secção da coluna central ser menor que a soma das áreas das secções das colunas exteriores, considerando que o fluxo magnético em cada coluna exterior é metade do fluxo magnético na coluna central e pela relação da equação (4.9), conclui-se que a indução magnética não é igual em todas as colunas. Pela figura podia-se concluir aparentemente que as colunas exteriores saturam na mesma altura que a coluna central, pois as duas curvas acompanham-se, mas observando os valores de indução magnética conclui-se que as colunas exteriores só começam a saturar bem depois da coluna central começar a saturar. Todas as colunas começam a saturar a partir de aproximadamente 1,35 T, como se pode observar na característica B-H da Figura 4.8.

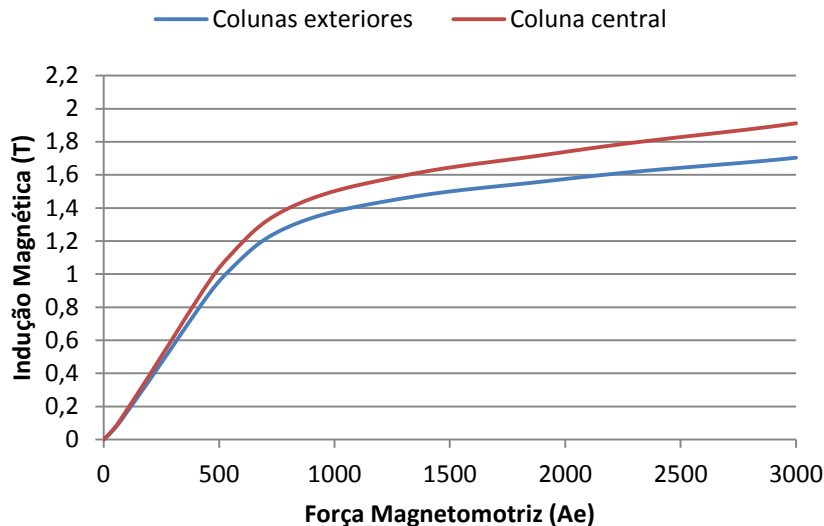


Figura 4.14: Estado da magnetização do núcleo na zona das colunas.

4.4 Simulação e Análise do Comportamento do LCS

Foram realizadas várias simulações para verificar o comportamento do limitador quando inserido na rede eléctrica. Foram feitas várias simulações com determinadas correntes de polarização, foram simuladas falhas a partir de quando a corrente na linha passa por zero, quando a corrente na linha não passa por zero e falhas sucessivas. Foram analisados os respectivos gráficos das formas de onda da corrente na linha, quedas de tensão aos terminais do limitador, fluxo ligado-corrente das bobinas AC.

Num LCS de núcleos saturados uma corrente DC é utilizada para polarizar o núcleo. A fmm fornecida pela bobina de polarização DC necessita ser suficientemente elevada para saturar completamente o núcleo. Um enrolamento separado é então utilizado para conduzir a corrente AC da linha a proteger. No estado normal de funcionamento, a baixa corrente no enrolamento AC não é suficiente para levar o núcleo para fora da saturação. Na saturação, a permeabilidade incremental do núcleo é aproximadamente igual à permeabilidade do ar, por isso a impedância² do enrolamento AC é equivalente ao de uma bobina com núcleo de ar. Durante uma situação de falha o aumento da corrente leva o núcleo para fora da saturação, levando a um aumento da permeabilidade incremental do núcleo e conseqüentemente a um aumento da impedância do enrolamento AC, limitando-se a corrente de curto-circuito. Uma vez que apenas um meio ciclo da corrente de curto-circuito leva o núcleo para fora da saturação, são necessários duas bobinas AC e dois núcleos para efectivamente limitar tanto o meio ciclo positivo como o meio ciclo negativo de uma corrente de curto-circuito. As duas bobinas têm que estar ligadas em oposição magnética para se limitar cada meio ciclo da

² Utiliza-se o termo impedância embora não seja o mais adequado, pois implica regime alternado sinusoidal e circuitos lineares.

corrente. O ponto de funcionamento do LCS está associado ao estado de saturação das colunas exteriores do LCS pois é isto que determina o poder de limitação do limitador.

O gráfico da Figura 4.15 mostra uma simulação da corrente na linha AC, antes, durante e depois da ocorrência de uma falha aos 40 ms, numa rede alimentada com 50 V_{ef} e com uma corrente de polarização de 60 A.

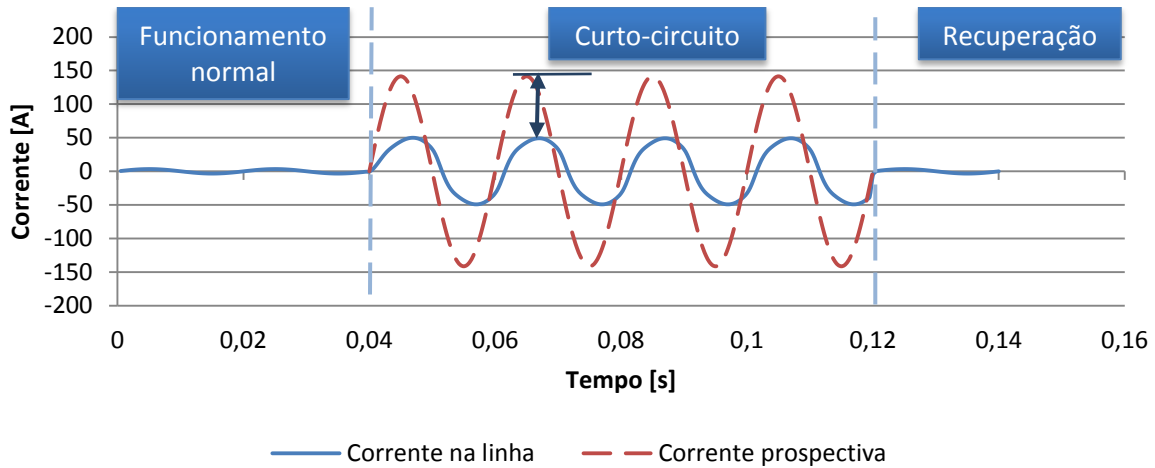
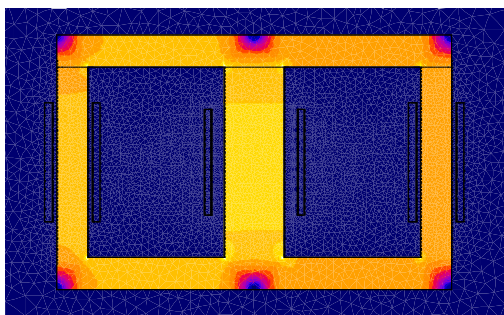
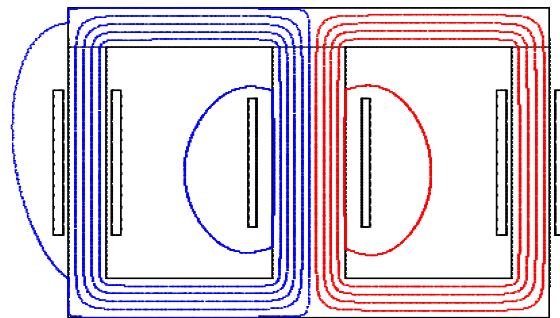


Figura 4.15: Corrente na linha AC para uma corrente de polarização de 60 A e a ocorrência de um curto-circuito aos 40 ms com recuperação a partir dos 120 ms.

No estado normal o núcleo encontra-se completamente saturado, logo não existe qualquer limitação da corrente normal da linha AC. A Figura 4.16 a) mostra a indução magnética no núcleo neste estado e durante um pico da onda de corrente normal da linha, mostrando assim que o núcleo continua saturado.



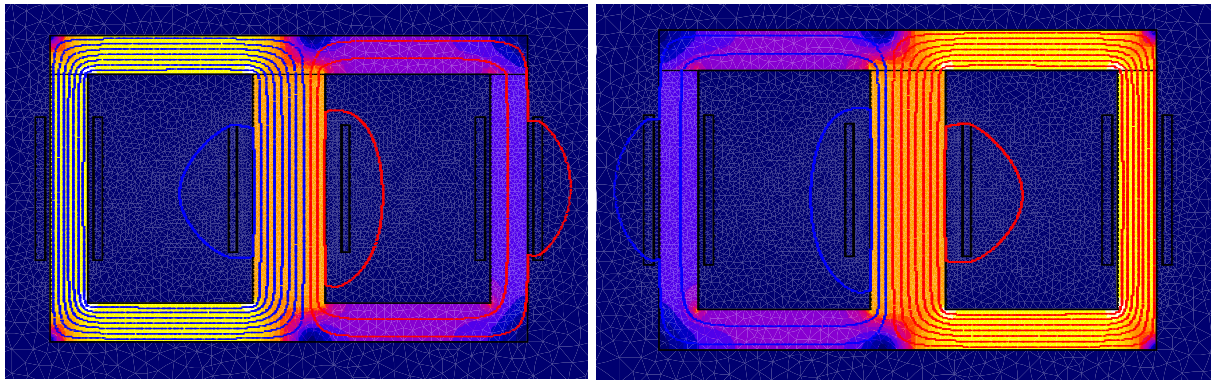
a) Indução magnética ao longo do núcleo



b) Linhas de fluxo magnético no núcleo

Figura 4.16: Estado de magnetização do núcleo quando o LCS funciona no estado normal.

Durante o curto-circuito, a corrente de linha é limitada pois em cada meio ciclo da corrente, uma das colunas do núcleo onde está inserida a bobina AC sai da saturação, aumentando assim a impedância da bobina que está associada a essa coluna. A Figura 4.17 a) mostra a indução magnética no núcleo no meio ciclo de corrente positivo (aos 87 ms) e a Figura 4.17 b) no meio ciclo de corrente negativo (aos 97 ms).



a) Meio ciclo positivo da corrente de CC

b) Meio ciclo negativo da corrente de CC

Figura 4.17: Estado de magnetização do núcleo numa situação de falha, para cada meio ciclo da corrente de CC

Como se pode verificar pela Figura 4.17, durante uma falha uma das colunas exteriores do núcleo é levada para fora da saturação, aumentando assim a impedância da bobina a ela associada, enquanto a outra coluna exterior é saturada mais profundamente fazendo com que a bobina a ela associada não contribua para a limitação da corrente de CC.

Após o fim do CC a recuperação é quase instantânea e o limitador volta ao estado normal de funcionamento.

O Anexo 1: Escala de Cor Para a Indução Magnética apresenta o gráfico de cor dos valores de indução magnética, para a interpretação das Figura 4.16 e Figura 4.17.

4.4.1 Operação do LCS para Diversos Pontos de Funcionamento

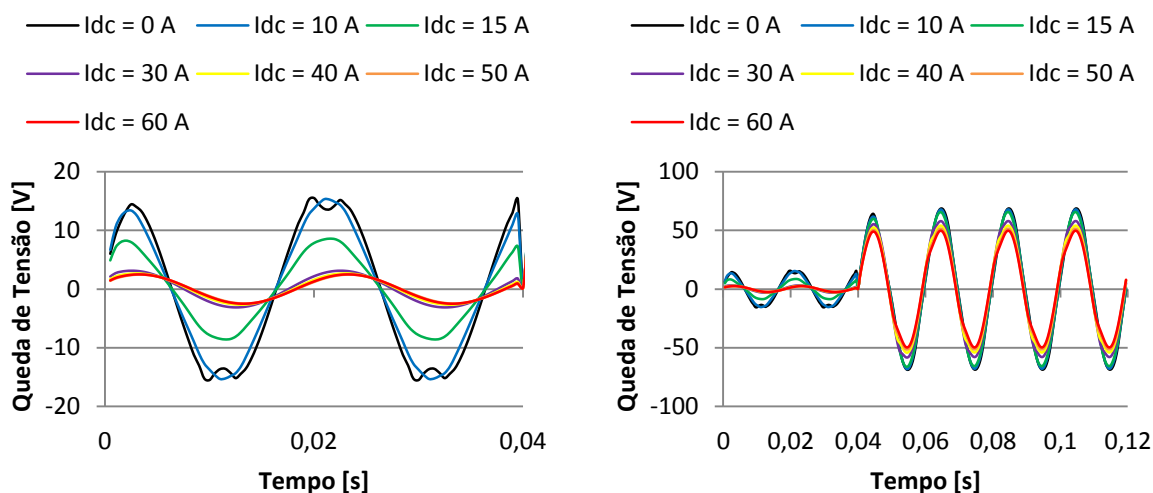
Foram efectuadas várias simulações para vários pontos de funcionamento de modo a se analisar o poder de limitação do LCS e a sua invisibilidade à rede.

Todas as simulações foram efectuadas com um passo temporal de 0,5 ms e com um número de passos igual a 240, o que representa 120 ms de tempo simulado. A tensão da fonte foi $u_{rede}(t) = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot \sin(2\pi 50t)$. Aplicou-se um curto-circuito em $t = 40 \text{ ms}$. A partir do gráfico da Figura 4.14 escolheram-se vários valores de fmm para diferentes pontos de funcionamento do limitador, que estão tabelados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de fmm aplicados na bobina de polarização para diversos pontos de funcionamento.

$fmm (Ae)$	$I_{DC} (A)$	Local em B-H
0	0	Zona de não saturação
500	10	Zona de não saturação
750	15	Joelho da curva
1500	30	Zona de saturação
2000	40	Zona de saturação
2500	50	Zona de saturação
3000	60	Zona de saturação

A Figura 4.18 mostra a queda de tensão aos terminais do limitador para diferentes pontos de funcionamento. Como se pode observar, em situação normal de funcionamento a queda de tensão diminui à medida que se leva o núcleo para a saturação sendo que a partir de um determinado ponto, ponto a partir do qual o núcleo já se encontra saturado, a diminuição da queda de tensão estabiliza. É a partir deste ponto que o limitador se encontra suficientemente saturado para que a corrente de linha normal não o tire da saturação e este seja o mais invisível à rede possível. Contudo, em situação de falha, a queda de tensão também diminui ligeiramente pois é mais difícil, com a mesma corrente de CC, levar o núcleo para fora da saturação à medida que o saturamos cada vez mais. Com as colunas exteriores saturadas, a queda de tensão aos terminais do limitador é inferior a 3 V apresentando o LCS assim uma queda de tensão inferior 4,2% referente à tensão de alimentação, o que é um valor aceitável. Verifica-se também a existência de uma não linearidade para quando a corrente de polarização é nula, como se pode ver pela depressão no gráfico correspondente da queda de tensão.



a) LCS no estado normal

b) LCS no estado normal e em situação de falha

Figura 4.18: Queda de tensão aos terminais do limitador para várias correntes de polarização

A Figura 4.19 mostra a corrente que atravessa a linha AC onde o limitador foi inserido. Em situação normal de funcionamento, esta aumentou à medida que se aumentou a saturação do núcleo até um determinado ponto, ponto onde o núcleo já saturado fez com que a bobina diminuísse a sua impedância e tornou o limitador o mais invisível à rede. Em situação de falha, à medida que se satura ainda mais o núcleo, o poder de limitação vai diminuindo, isto porque torna-se mais difícil levar o núcleo para fora da saturação, zona onde a corrente de CC é limitada. É perceptível que existe um desfasamento entre as diferentes ondas de corrente, isto porque à medida que se satura o núcleo, a componente indutiva das bobinas AC vai diminuindo. De notar que quando o núcleo não se encontra saturado e se a corrente AC que atravessa as bobinas AC não for suficiente para o saturar, as duas bobinas introduzem uma impedância na rede. Enquanto com o núcleo saturado e em situação de falha, só uma bobina AC contribui com uma elevada impedância para a limitação da corrente de CC.

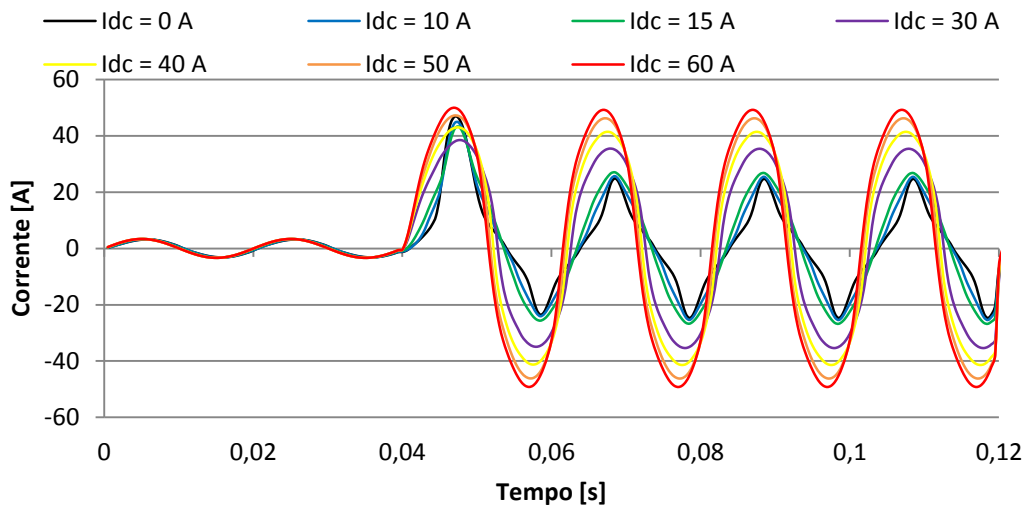


Figura 4.19: Corrente na linha AC para várias correntes de polarização DC.

A escolha do ponto de polarização DC é um factor importante que deve garantir que a impedância inserida pelo limitador em condições normais de funcionamento é minimizada ao máximo, enquanto se providencia uma boa redução da falha e uma tensão induzida na bobina de polarização DC reduzida.

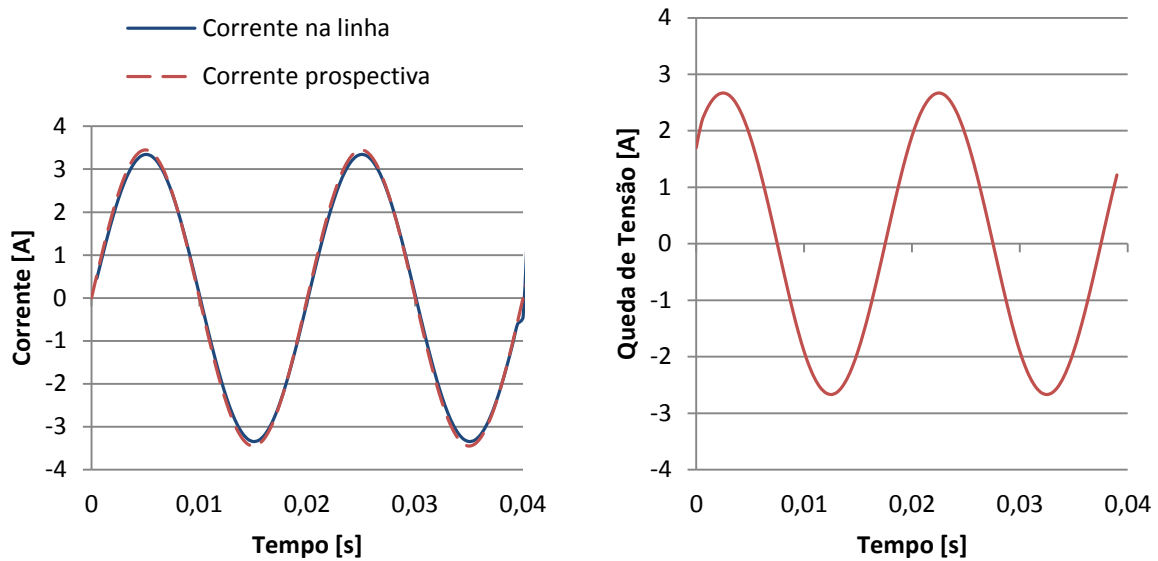
A escolha de um ponto de polarização DC muito perto do joelho da curva de magnetização faz com que a própria corrente de linha normal leve as colunas exteriores do núcleo para fora da saturação, aumentando assim a impedância normal do limitador; por outro lado a escolha do ponto de polarização DC para um ponto de muita saturação faz diminuir o poder de limitação pois será preciso uma maior corrente de CC para que este saia da saturação e limite a corrente de CC.

Assim, pela análise das simulações efectuadas, escolheu-se uma corrente de polarização DC de 40 A utilizada nas próximas simulações, garantindo assim que o limitador apresenta um óptimo poder de limitação e uma queda de tensão muito pequena em funcionamento normal.

4.4.2 LCS em Funcionamento Normal

Após ser escolhida uma corrente de polarização DC de $I_{DC} = 40$ A foi simulado o LCS numa rede com uma fonte de tensão da fonte $u_{rede}(t) = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot \sin(2\pi 50t)$. Em operação normal é indiferente qual dos circuitos de polarização foi utilizado pois está garantido que todas as colunas se encontram saturadas e a corrente de linha normal não é suficiente para as tirar da saturação.

A Figura 4.20 b) mostra a evolução da queda de tensão aos terminais do LCS. A queda de tensão máxima aos terminais do limitador quando este se encontra a funcionar no estado normal é de $\Delta U_{lim} = 2,67$ V, o que representa 3,8% da tensão de alimentação da rede eléctrica. Este valor é aceitável. Na Figura 4.20 a) pode verificar-se que a corrente na linha é ligeiramente menor que a corrente prospectiva normal, por causa da queda de tensão de 3,8% aos terminais do limitador. A corrente apresenta uma redução de 0,11 A em relação à prospectiva para o funcionamento normal.



a) Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p

b) Evolução da queda de tensão aos terminais do LCS

Figura 4.20: Resultados para o LCS a funcionar no estado normal.

4.4.3 LCS Inserido numa Rede com Circuito de Polarização Composto por uma Fonte de Corrente

Considerou-se para a tensão da fonte $u_{rede}(t) = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot \sin(2\pi 50t)$ e para a corrente de polarização DC $I_{DC} = 40 A$. O limitador foi inserido na rede da Figura 4.13 a), tendo por isso como fonte de polarização uma fonte de corrente que garantiu uma corrente constante. Foram efectuadas três simulações onde se aplicou uma falha quando a corrente de linha passa em zero, quando a corrente de linha não passa por zero e para duas falhas consecutivas na linha. Foi ainda feita uma última simulação onde se alterou a tensão da fonte para o dobro e se aplicou uma só falha na linha.

4.4.3.1 Aplicação do Curto-Circuito quando a Corrente de Linha Passa por Zero

A simulação foi efectuada com um passo temporal de 0,5 ms. O tempo de computação foi aproximadamente de meia hora para simular 140 ms. Foi aplicado um curto-circuito em $t = 40 ms$.

No gráfico da Figura 4.21 pode observar-se a corrente da linha bem como a corrente prospectiva, I_p .

A corrente prospectiva tem como amplitude $I_p = \frac{\sqrt{2} \cdot 50}{0,5} = 141A$.

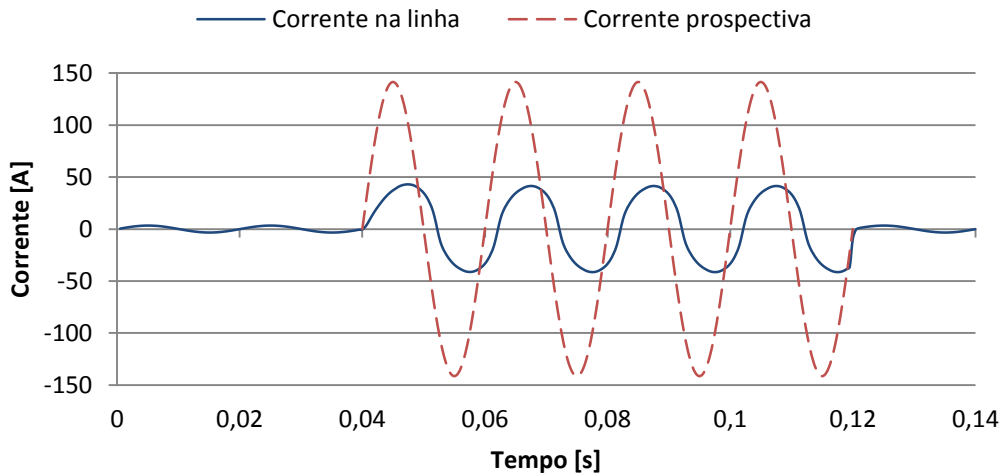
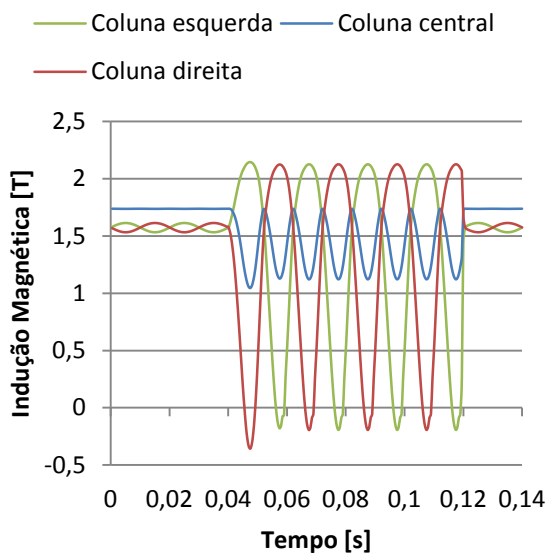
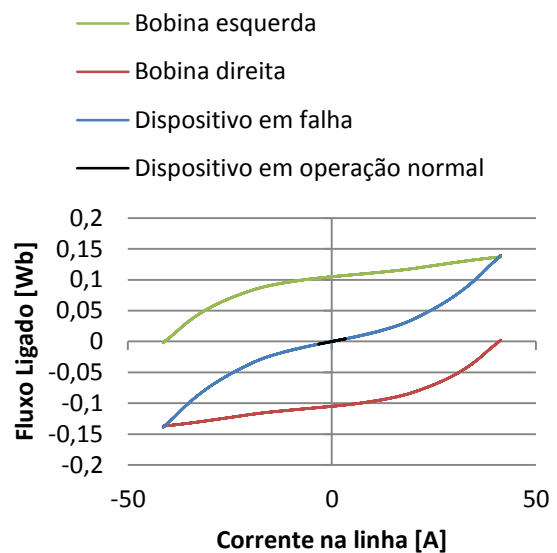


Figura 4.21: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p para uma falha em $t = 40\text{ ms}$

A corrente de CC foi limitada a 42,4 A o que representa uma redução da falha de 70% e que excede o mínimo requerido industrialmente de 50% de redução da corrente de CC (Moscrop & Darmann, 2009). A indução magnética nas colunas do LCS está representada na Figura 4.22 a). Como se pode verificar, antes do CC ambas as colunas se encontram saturadas. Após o início do CC, as colunas exteriores saem da saturação alternadamente limitando assim a corrente de CC. Também se pode verificar que a indução magnética tornou-se negativa porque a respectiva coluna atingiu o 3º quadrante da curva B-H.



a) Indução magnética nas colunas do núcleo



b) Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano $i\psi$

Figura 4.22: Resultados de simulação do LCS para uma falha em $t = 40\text{ ms}$ e quando a corrente na linha passa por zero.

A coluna da bobina DC como era previsível é levada para fora da saturação até ao joelho da curva no pico máximo da corrente de CC, o que não faz com que a outra coluna exterior que deve ficar saturada saia também da saturação, como se pode observar pela Figura 4.22 a). Um problema que isto trás é que como a bobina DC está acoplada magneticamente com as bobinas AC, surgem correntes induzidas nesta, o que pode originar problemas no circuito de polarização. Na Figura 4.22 b) está representada a excursão $i\psi$ do ponto de funcionamento do dispositivo. Como se pode observar, quando a corrente na linha varia entre valores que não façam as colunas exteriores saírem da saturação, a variação do fluxo ligado em relação à corrente é pequena fazendo com que a impedância inserida pelo dispositivo seja pequena. Assim que a corrente atinja valores que façam as colunas do núcleo saírem da saturação, a partir de aproximadamente 25 A de corrente, começa-se a entrar no joelho da curva, a impedância do dispositivo aumenta e a corrente é limitada. Em situação de falha o dispositivo realiza a excursão completa da Figura 4.22 b).

4.4.3.2 Aplicação do Curto-Circuito quando a Corrente de Linha Não é Nula

Na seguinte simulação aplicou-se um curto-circuito em $t = 44 \text{ ms}$ de forma a se puder avaliar o desempenho do limitador quando a falha ocorresse num instante onde a corrente de linha não era nula, foi desfeito o curto-circuito em $t = 117 \text{ ms}$.

Foi considerado o mesmo passo temporal e tempo de computação da simulação anterior.

No gráfico da Figura 4.23 pode-se observar a corrente da linha e a corrente prospectiva.

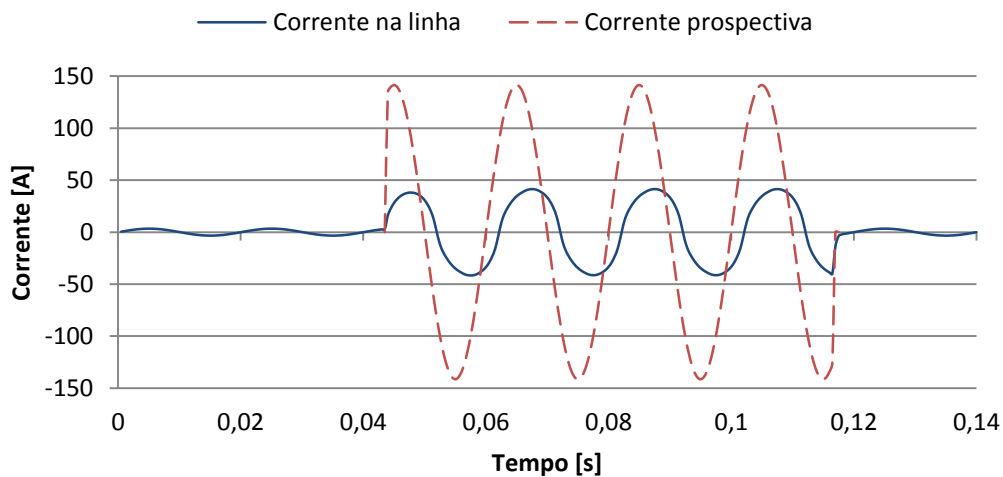
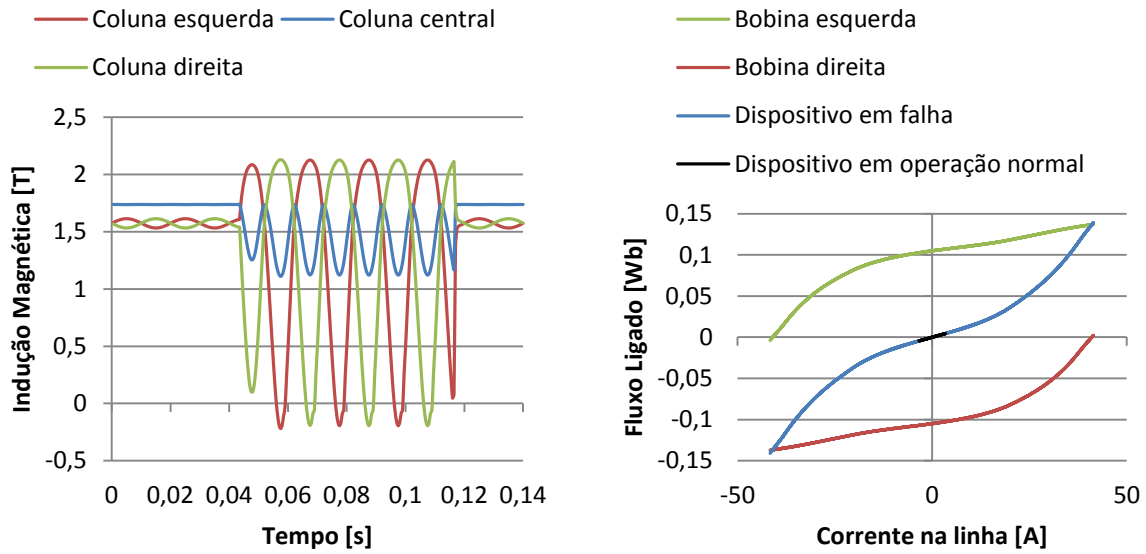


Figura 4.23: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p para uma falha em $t = 44 \text{ ms}$

Nesta simulação, a corrente de CC foi limitada a 41,4 A o que representa uma redução da falha também de 70%.

Já os gráficos da Figura 4.24 a) e b) são também semelhantes. Assim verifica-se que o limitador apresenta o mesmo comportamento para qualquer que seja o momento de ocorrência da falha.



a) Indução magnética nas colunas do núcleo

b) Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano $i\psi$

Figura 4.24: Resultados de simulação do LCS para uma falha em $t = 44 \text{ ms}$ e quando a corrente na linha não passa por zero.

4.4.3.3 Aplicação de Falhas Consecutivas

De seguida consideram-se duas falhas consecutivas, a primeira em $t = 20 \text{ ms}$ e suprimida em $t = 78 \text{ ms}$ e a segunda inicia-se em $t = 114 \text{ ms}$ e foi removida em $t = 172 \text{ ms}$.

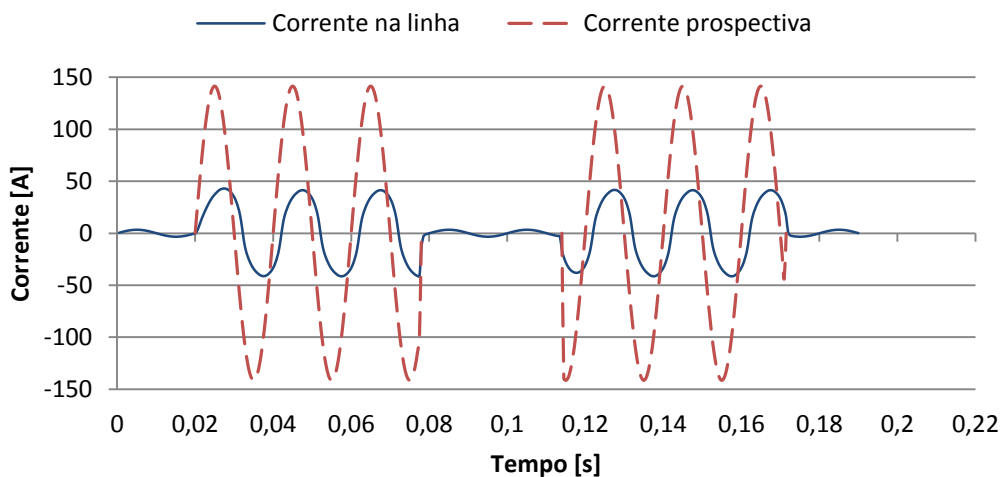


Figura 4.25: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p para duas falhas consecutivas de 58 ms, uma falha em $t = 20 \text{ ms}$ e outra em $t = 114 \text{ ms}$.

A Figura 4.25 mostra a evolução da corrente na linha e pode-se comprovar que o comportamento do LCS em poder de limitação se mantém igual. Isto deve-se à recuperação quase instantânea do LCS,

como se pode comprovar pela Figura 4.26 em que quando o CC é desfeito, as colunas voltam à saturação quase instantaneamente. Assim sendo, o limitador apresenta o mesmo comportamento mesmo em falhas consecutivas. A curva da excursão i_{ψ} é semelhante às obtidas anteriormente pois o limitador apresenta o mesmo comportamento.

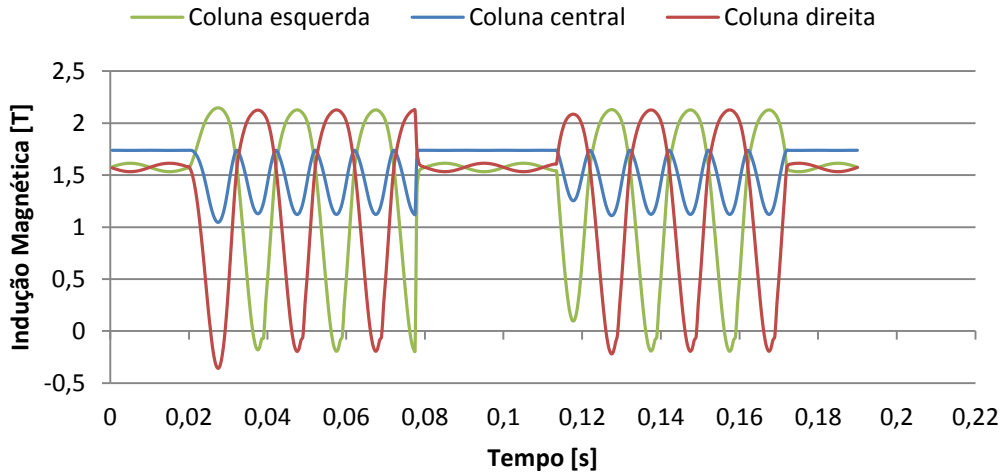


Figura 4.26: Indução magnética nas colunas do núcleo para duas falhas consecutivas de 58 ms, uma falha em $t = 20 \text{ ms}$ e outra em $t = 114 \text{ ms}$.

4.4.3.4 Aplicação de uma Falha quando a Corrente de Linha Não é Nula e Para Uma Tensão de Alimentação do Dobro

Considerou-se agora para a tensão da fonte $u_{rede}(t) = \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \sin(2\pi 50t)$.

Aplicou-se um curto-circuito em $t = 44 \text{ ms}$ e foi desfeito em $t = 117 \text{ ms}$.

Foi considerado o mesmo passo temporal e tempo de computação das simulações anteriores.

A Figura 4.27 mostra o andamento temporal da corrente da linha bem como a corrente prospectiva.

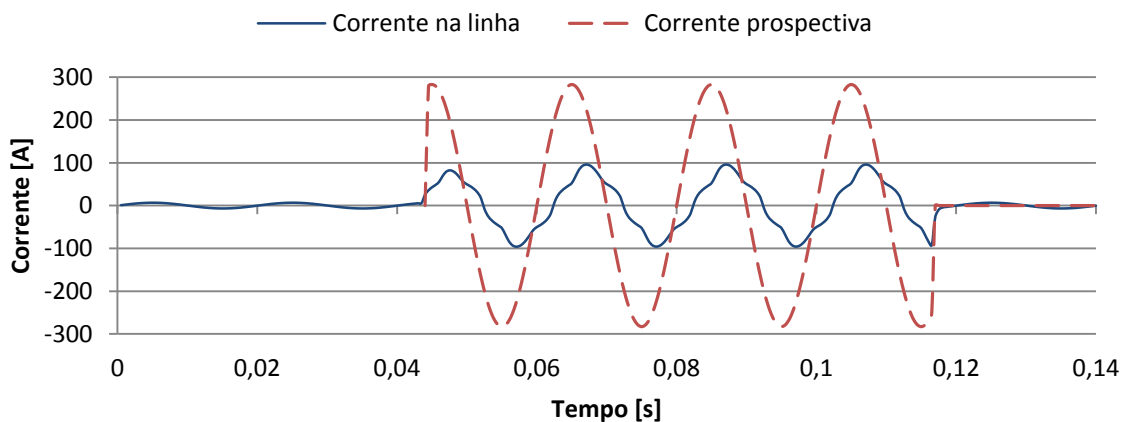
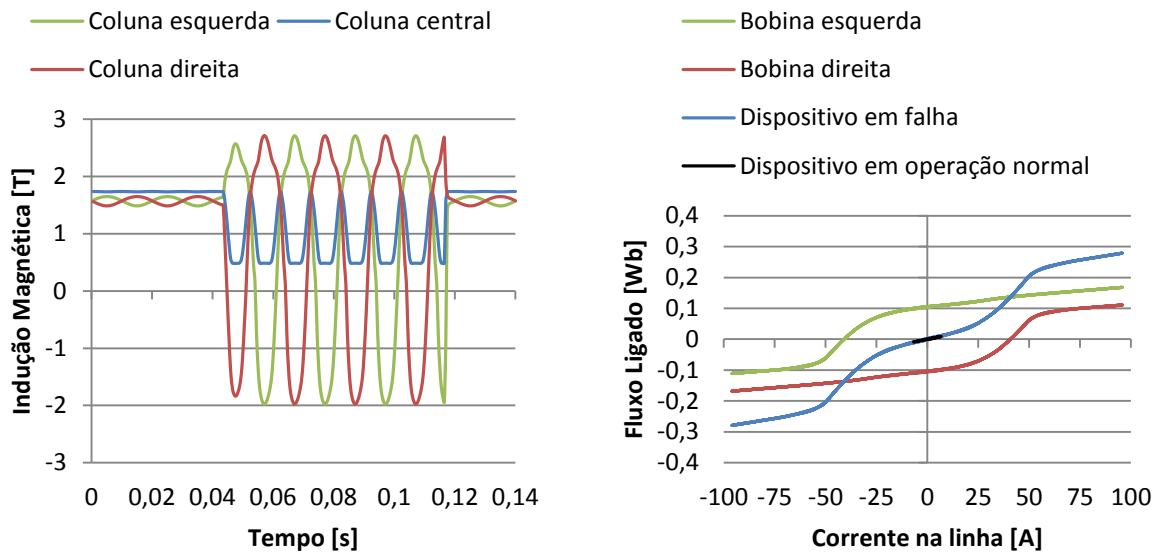


Figura 4.27: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p para uma falha em $t = 44 \text{ ms}$ de 73 ms.



a) Indução magnética nas colunas do núcleo

b) Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano $i\psi$

Figura 4.28: Resultados de simulação do LCS para uma falha em $t = 44 \text{ ms}$ e quando a corrente na linha não passa por zero, com o dobro da tensão de alimentação.

A corrente limitada pelo LCS, da Figura 4.27, apresenta-se distorcida. Isto ocorre sempre que a oscilação da indução magnética levar as colunas do núcleo a saturarem no terceiro quadrante da curva B-H, ou seja, quando ocorre um CC, o núcleo sai da saturação e percorre a curva B-H até voltar a saturar novamente devido à elevada corrente de CC. Pode-se comprovar isto pelo gráfico da Figura 4.28 a). Assim sendo, percebe-se porque a excursão no plano $i\psi$ apresentada na Figura 4.28 b), é semelhante a característica para quando se utilizou a tensão normal mas com mais os ramos que representam a saturação novamente.

4.4.4 LCS Inserido numa Rede com Circuito de Polarização Composto por uma Fonte de Tensão

Nas próximas simulações considerou-se igualmente para a tensão da fonte de alimentação da rede $u_{rede}(t) = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot \sin(2\pi 50t)$ e para a corrente de polarização DC $I_{DC} = 40 \text{ A}$. O limitador foi desta vez inserido na rede da Figura 4.13 b). O circuito de polarização não fornece desta vez uma polarização constante uma vez que o acoplamento magnético existente entre as bobinas AC e a bobina de polarização DC faz com que apareçam correntes induzidas na bobina DC e caso esta tenha o seu núcleo fora da saturação o valor das correntes induzidas aumenta consideravelmente pois dependem da variação do fluxo sentido pela bobina DC.

Foram efectuadas quatro simulações, duas onde se aplicou uma só falha ao circuito, sem e com bobina auxiliar, e outras duas onde se aplicou duas falhas consecutivas, também sem e com a bobina auxiliar.

4.4.4.1 Aplicação do Curto-Circuito quando a Corrente de Linha Não é Nula

A simulação foi efectuada com um passo temporal de 0,5 ms e o tempo de computação foi aproximadamente de uma hora para simular 220 ms. Foi aplicado um curto-circuito em $t = 83 \text{ ms}$. No gráfico da Figura 4.29 pode observar-se a corrente da linha bem como a corrente prospectiva, I_p . A corrente prospectiva tem como amplitude $I_p = \frac{\sqrt{2} \cdot 50}{0,5} = 141 \text{ A}$.

A Figura 4.29 a) mostra a evolução das correntes na linha com e sem a bobina auxiliar, bem como a corrente prospectiva. Sem a bobina auxiliar a corrente é limitada nos 46,0 A, uma redução de 67,5%. Com a bobina auxiliar a corrente é limitada nos 49,8 A, uma redução de 64,8%. Com a introdução da bobina auxiliar o poder de limitação diminuiu ligeiramente devido ao cancelamento de parte do fluxo AC do caminho fechado que passa pela coluna central e pela coluna exterior associada à bobina AC que o cria.

Na Figura 4.30 estão apresentados os gráficos da queda de tensão no limitador. Em a) está representada a queda de tensão quando o limitador está a funcionar normalmente. Como se pode verificar, no início ambos os gráficos, para com e sem bobina, apresentam uma elevada queda de tensão, pois o núcleo ainda não se encontra saturado. Verifica-se também que o núcleo satura mais depressa caso não tenha a bobina auxiliar introduzida. Após a falha, a recuperação é mais rápida para o circuito sem a bobina auxiliar.

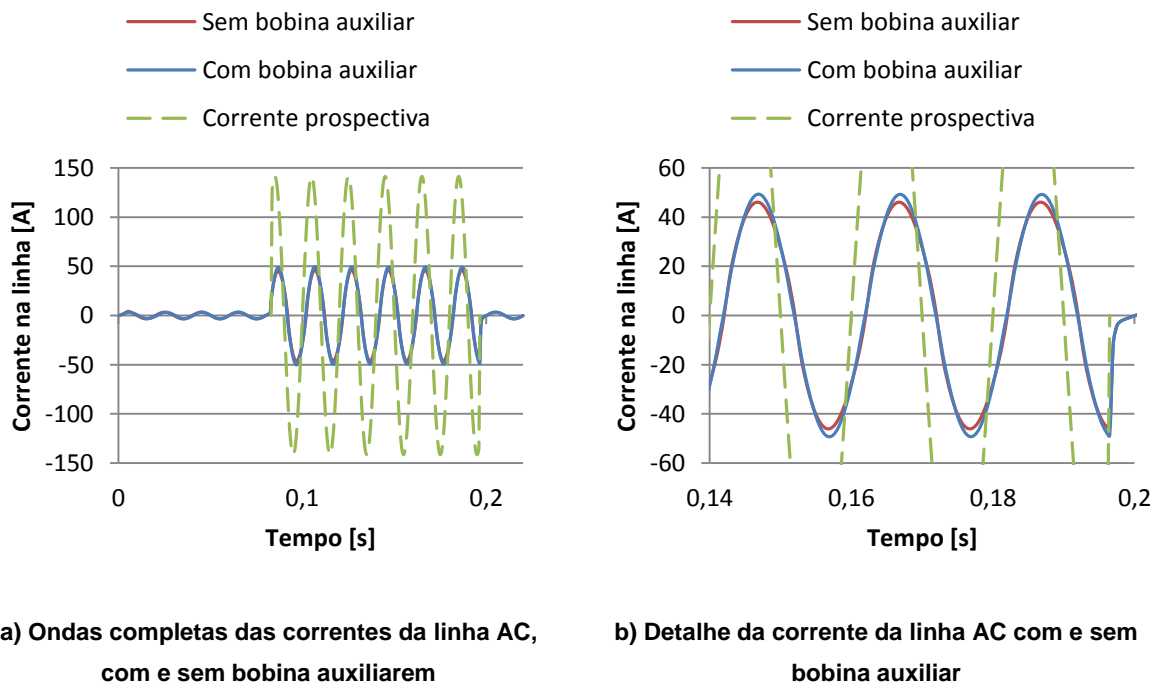
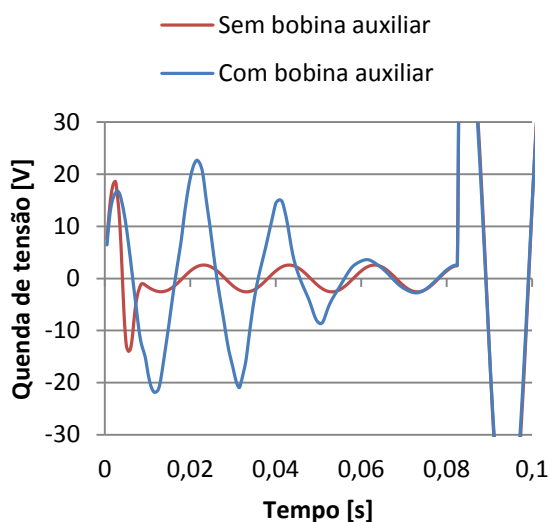
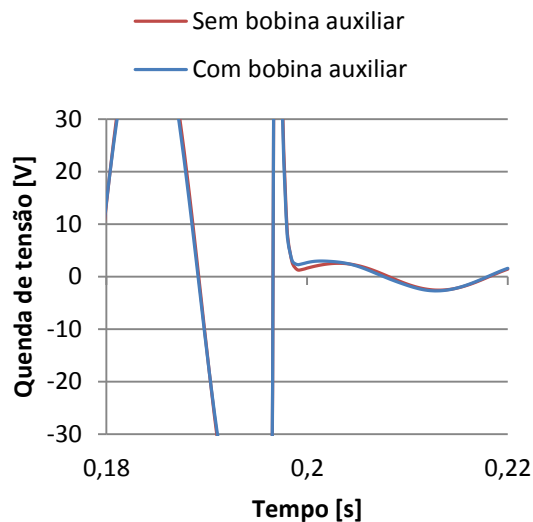


Figura 4.29: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p para uma falha em $t = 83 \text{ ms}$ de $t = 114 \text{ ms}$ e com circuito de polarização com fonte de tensão.



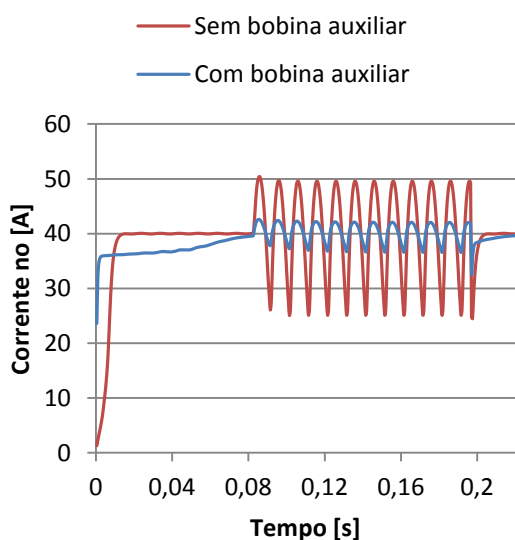
a) LCS no estado normal



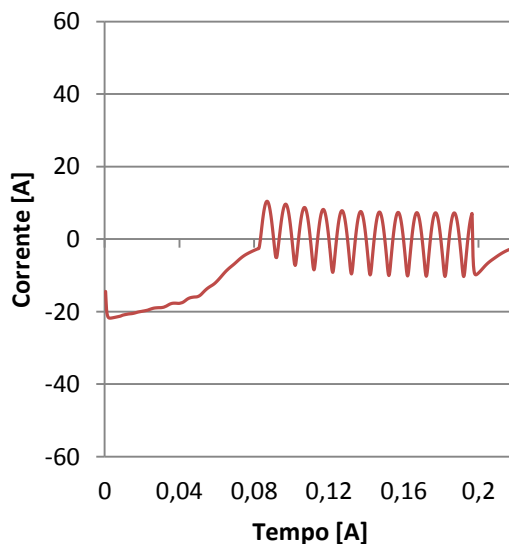
b) Logo após a falha

Figura 4.30: Queda de tensão aos terminais do LCS para uma falha em $t = 83 \text{ ms}$ de $t = 114 \text{ ms}$ e com circuito de polarização com fonte de tensão.

A Figura 4.31 a) mostra a corrente no circuito de polarização DC. Como seria de esperar, com a bobina auxiliar a corrente induzida na bobina DC é muito inferior em relação à corrente induzida caso não existisse a bobina auxiliar. A corrente induzida na bobina DC não é sinusoidal. A cada meio ciclo da corrente da linha, positivo e negativo, a corrente induzida faz um pico, como se pode ver na Figura 4.32. Isto ocorre porque é o fluxo magnético AC desmagnetizante, fluxo magnético contrário ao fluxo magnético DC e que leva a coluna central para fora da saturação, que induz corrente na bobina DC, sendo este criado por cada bobina AC alternadamente, em cada meio ciclo da corrente da linha e apresentando o mesmo sentido.



a) Corrente no circuito de polarização



b) Corrente no circuito auxiliar da bobina auxiliar

Figura 4.31: Corrente no circuito de polarização DC para uma falha em $t = 83 \text{ ms}$ de $t = 114 \text{ ms}$ e com circuito de polarização com fonte de tensão.

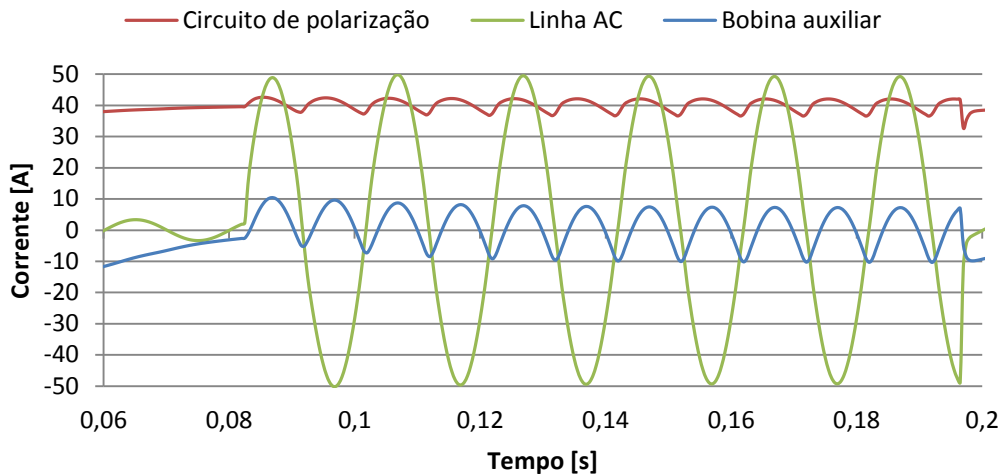


Figura 4.32: Corrente no circuito de polarização DC, na linha AC e na bobina auxiliar, para uma falha em $t = 83 \text{ ms}$ de $t = 114 \text{ ms}$ e com circuito de polarização com fonte de tensão.

A Figura 4.33 mostra a indução magnética nas colunas do núcleo, com e sem a bobina auxiliar. Verifica-se que, no caso de não existir bobina auxiliar, o núcleo satura mais rapidamente do que no caso de existir a bobina auxiliar, isto deve-se ao facto de que a corrente que alimenta a bobina DC aumenta de zero até ao valor estabelecido de alimentação do circuito de polarização, existindo assim uma variação na corrente, logo uma variação de fluxo sentida pela bobina auxiliar e que esta vai tentar anular. De referir que quando a corrente de linha passa por zero, a corrente na bobina auxiliar tem o seu valor máximo o que pode ter influência na corrente da linha caso o núcleo não estivesse saturado.

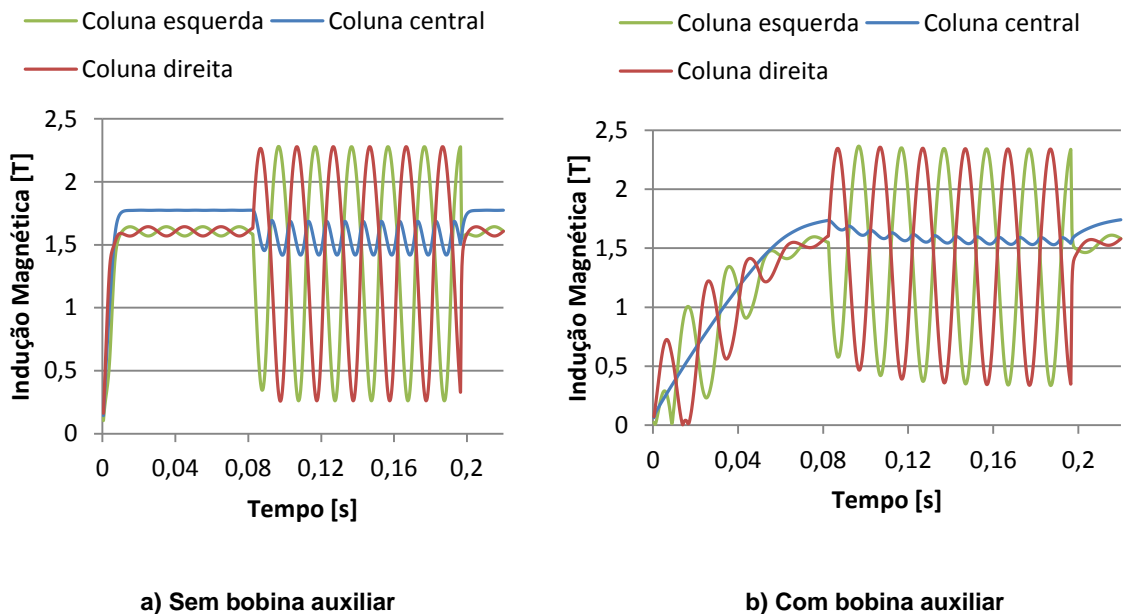


Figura 4.33: Indução magnética nas colunas do núcleo, para uma falha em $t = 83 \text{ ms}$ de $t = 114 \text{ ms}$ e com circuito de polarização com fonte de tensão.

Em Figura 4.34 estão representadas as excursões no plano $i\psi$ realizadas pelo limitador, sem e com a bobina auxiliar. Em ambas as imagens, a curva a preto representa a excursão quando o limitador está a funcionar em operação normal, sendo esta menos inclinada que a excursão quando o dispositivo está em falha. Em a), os laços efectuados pela excursão devem-se ao facto de que as correntes induzidas na bobina DC fazem com que o fluxo DC não seja constante, e como se pode verificar, os laços só aparecem quando as colunas exteriores saem da saturação. Em b) como as correntes induzidas são menores, os laços também o são.

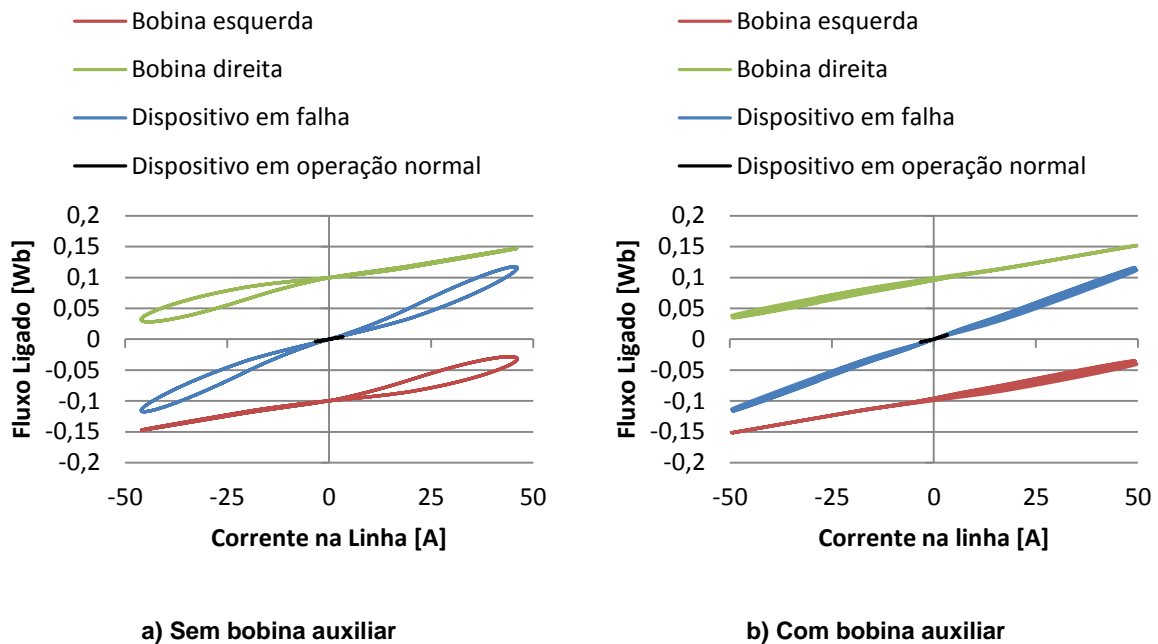


Figura 4.34: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano $i\psi$, para uma falha em $t = 83 \text{ ms}$ de $t = 114 \text{ ms}$ e com circuito de polarização com fonte de tensão.

4.4.4.2 Aplicação de Falhas Consecutivas

De seguida consideram-se duas falhas consecutivas, a primeira em $t = 106 \text{ ms}$ e suprimida em $t = 166 \text{ ms}$ e a segunda inicia-se em $t = 189 \text{ ms}$ e foi removida em $t = 249 \text{ ms}$.

A Figura 4.35 mostra a evolução temporal da corrente na linha. Como se pode verificar, a corrente de CC é menor quando não temos a bobina auxiliar no circuito, o limitador apresenta o mesmo comportamento anteriormente analisado para uma só falha. Nos gráficos da Figura 4.36 podemos verificar o mesmo comportamento, ou seja, a recuperação do limitador é muito rápida quer tenhamos ou quer não tenhamos a bobina auxiliar inserida no LCS. Contudo, com a bobina auxiliar e após uma falha, o estado de saturação das colunas só estabiliza aproximadamente ao fim de 20 ms mas o que não influencia na protecção contra falhas consecutiva e a queda de tensão do limitador neste intervalo de tempo é aproximadamente igual à queda de tensão existente no estado normal de funcionamento.

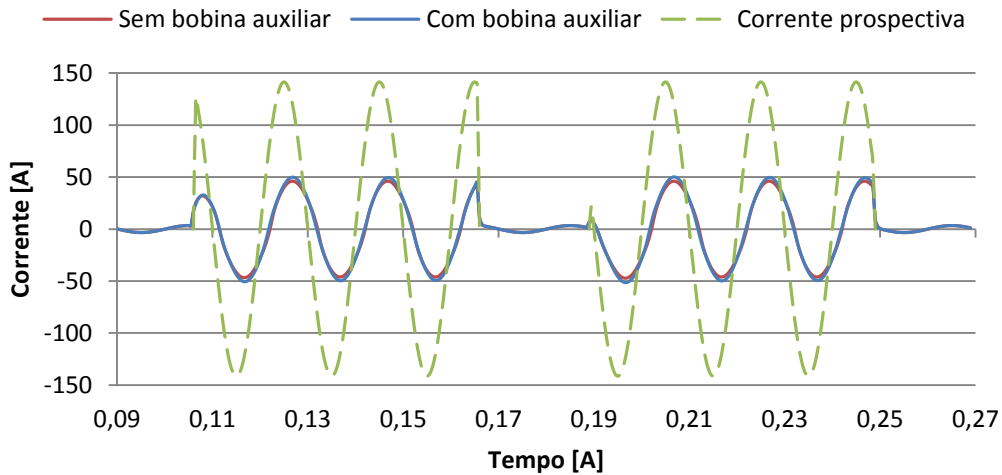


Figura 4.35: Evolução da corrente na linha para duas falhas consecutivas de 60 ms com circuito de polarização com fonte de tensão.

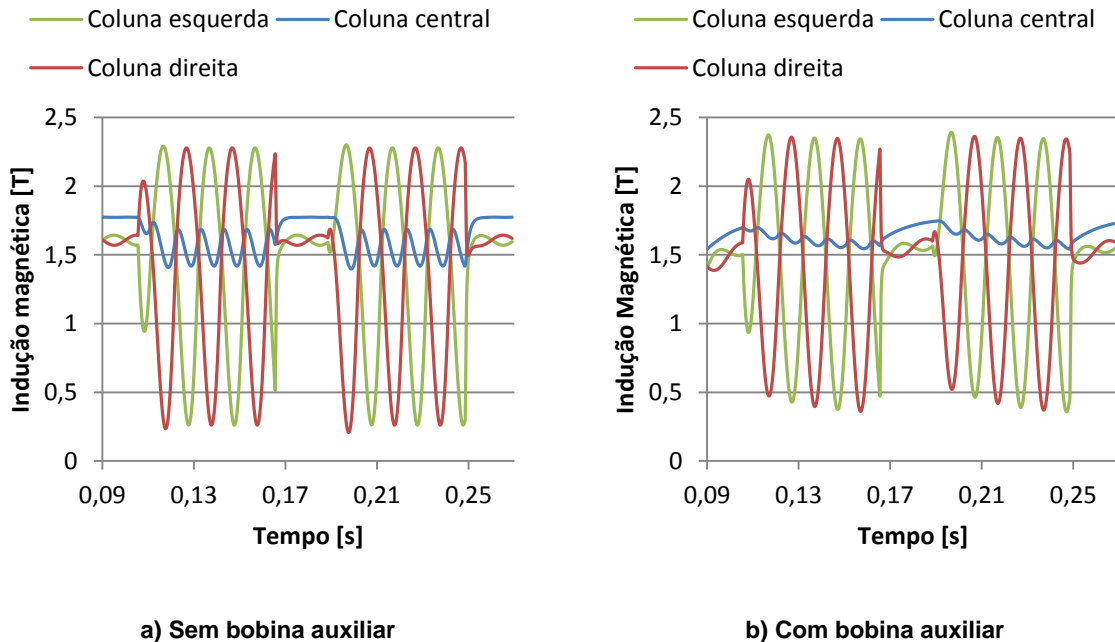


Figura 4.36: Indução magnética nas colunas do núcleo para duas falhas em $t = 106 \text{ ms}$ e $t = 189 \text{ ms}$, de $t = 60 \text{ ms}$ e com circuito de polarização com fonte de tensão.

4.5 Conclusão

Neste capítulo foram descritos os passos tomados antes de se poder iniciar as simulações do LCS.

Em primeiro lugar foi descrito o ensaio realizado para a obtenção da característica de primeira magnetização, em termos de B-H, do aço eléctrico utilizado na concepção do núcleo. Esta foi necessária para se poder definir no simulador o material do núcleo ferromagnético.

As simulações foram efectuadas num programa de elementos finitos, o Flux2D. Antes de qualquer simulação no Flux2D, é necessário introduzirem-se os dados necessários. Começou-se por definir

qual a topologia do LCS a simular, a respectiva malha de elementos finitos, as propriedades físicas do limitador, ou seja, os tipos de materiais utilizados, etc, e a topologia da rede eléctrica onde o LCS foi simulado.

Por fim, realizaram-se diversas simulações de modo a verificar o comportamento do LCS. Analisou-se o estado de magnetização das colunas do LCS, importante para se ter uma ideia da fmm que foi necessária ser aplicada pela bobina DC de modo a saturar as colunas exteriores com uma indução magnética ideal.

Simulou-se por fim o LCS inserido na rede eléctrica definida no simulador. Foram realizadas várias simulações para diferentes tipos de falhas e para os dois tipos de circuito de polarização utilizados para a polarização do núcleo ferromagnético. Analisaram-se todos os resultados obtidos nas simulações.

Da simulação realizada para verificar o estado de saturação das colunas do núcleo, verificou-se que a indução magnética na coluna central é sempre superior à indução magnética em cada coluna exterior. Isto deve-se, entre outras coisas, à dispersão de fluxo magnético existente ao longo do caminho magnético e à área da secção da coluna central não ser pelo menos o dobro da área de cada coluna exterior.

A escolha adequada do ponto de polarização é muito importante, influenciando a capacidade de limitação do LCS, que deverá maximizar o poder de limitação de correntes de CC, e da queda de tensão aos seus terminais que em estado normal deverá ser muito pequena para que o LCS seja o mais invisível possível pela rede.

O LCS foi simulado utilizando-se dois tipos diferentes de circuito de polarização. O circuito de polarização com uma fonte de corrente garantiu sempre o mesmo valor de corrente no circuito. O poder de limitação do LCS foi o mesmo para cada um dos tipos de falha simulado, cerca de 70 % de redução da corrente de CC. Já o circuito com uma fonte de tensão, não manteve a corrente no circuito constante uma vez que em situações de falha, apareceram correntes induzidas na bobina DC. Estas correntes induzidas, devido ao facto de a bobina DC estar acoplada magneticamente com as bobinas AC, podem ser prejudiciais para os componentes que compõem o circuito de polarização. Para reduzir o efeito das correntes induzidas colocou-se um enrolamento curto-circuitado, em redor da coluna central, com o objectivo de anular o fluxo magnético AC que se fecha pela coluna central e é responsável pelas correntes induzidas na bobina DC (ver capítulo 3.2). O poder de limitação baixou 2,5% sem a bobina auxiliar inserida e 5,2% com a bobina auxiliar inserida, em comparação com o poder de limitação do LCS com o circuito de polarização com fonte de corrente, as correntes induzidas no circuito de polarização baixaram significativamente com a bobina auxiliar inserida.

As excursões no plano $i\psi$, aquando da limitação, para os diferentes tipos de falha são semelhantes. Já para com os dois tipos de circuito de polarização utilizados, as diferenças são notórias tornando-se a excursão efectuada quase como se fossem lineares. No estado normal as excursões efectuadas são iguais, uma vez que as colunas do núcleo se encontram igualmente saturadas.

O LCS apresenta uma capacidade de recuperação instantânea, devendo-se em parte ao facto da bobina DC, de polarização do núcleo, se encontrar sempre no estado SC e portanto após o fim do CC, o núcleo volta a ser rapidamente saturado.

5 Construção do Protótipo do LCS de Núcleos Saturados

Neste capítulo pretende-se descrever todos os passos realizados no projecto e construção do protótipo do LCS de núcleos saturados. O LCS foi construído com um núcleo de ferro de formato EI, com a coluna central de secção aproximadamente circular e as colunas exteriores de secção rectangular. Na coluna central foi colocada a bobina DC supercondutora, que tem como objectivo saturar o núcleo nas colunas onde estão inseridas as bobinas AC. Nas colunas exteriores foram colocadas as bobinas AC, ligadas em série e em oposição eléctrica.

5.1 Placa de Aquisição de Dados

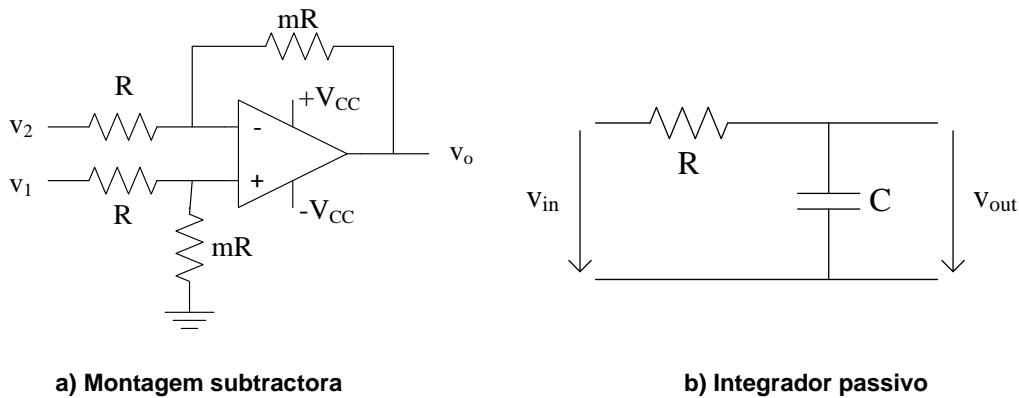
Para a aquisição de dados pelo computador, ou seja, para a leitura das quedas de tensão em pontos específicos da montagem experimental foi necessário construir uma placa de ensaios (Figura 5.3) uma vez que o método de aquisição utilizado no capítulo 4.1 só permite adquirir até dois sinais analógicos. Utilizou-se a placa de aquisição de dados (PAD) NI-6009 da National Instruments (NI), Figura 5.1. Esta é uma PAD com oito entradas analógicas, tem um *analog-to-digital converter* (ADC) de 14 bits e uma taxa de amostragem de 48 KS/seg, entre outras características. Para a aquisição dos dados no computador utilizou-se o *software* LabVIEW SignalExpress também da NI.



Figura 5.1: Placa de aquisição de dados NI-6009.

Pretendeu-se obter as quedas de tensão em determinadas zonas da montagem experimental, assim foi necessário implementar um circuito electrónico auxiliar. Foi implementada uma montagem inversora do tipo subtractora ou diferencial, mostrada na Figura 5.2 a), para cada entrada analógica da PAD. Como a gama de tensão nas entradas analógicas da PAD é de -10V a 10V, foi também necessário aplicar um ganho menor que um ao sinal diferencial lido. Assim, além de garantir que não se ultrapassa a gama de tensão da PAD, protege-se também a PAD de eventuais picos de tensão que a podia danificar.

A Figura 5.2 a) mostra o esquema da montagem subtractora utilizada onde v_1 e v_2 são os sinais que vêm de dois pontos específicos da montagem experimental, v_o é o sinal diferencial que representa a queda de tensão entre os dois pontos escolhidos e m é o ganho diferencial do circuito.



a) Montagem subtratora

b) Integrador passivo

Figura 5.2: Esquema dos circuitos utilizados.

A equação (5.1) mostra a relação entre os sinais de entrada v_1 e v_2 e a saída v_o .

$$v_o = m(v_1 - v_2) \quad (5.1)$$

Os amplificadores operacionais utilizados foram alimentados a +10V e -10V de modo a limitar a tensão de saída nestes valores por causa da gama de tensão da PAD.

Utilizaram-se dois integradores passivos, com uma constante de tempo de 1 segundo, representados esquematicamente na Figura 5.2 b). Estes foram utilizados para se adquirir uma tensão que é proporcional ao fluxo magnético.

Foi assim implementada uma placa de ensaios, que integra os circuitos electrónicos auxiliares e a PAD, mostrada na Figura 5.3. A Tabela 5.1 mostra os ganhos dos canais da placa de ensaios, bem como a indicação de que canais o sinal é integrado.

Tabela 5.1: Ganhos utilizados nos canais da placa de ensaios

Canais	Ganho	Outras informações
A	1/8,33	
B	1/16,67	
C	1	Sinal integrado
D	1/8,33	
E	1/4,55	
F	1/4,55	
G	1	Sinal integrado
H	1/4,55	

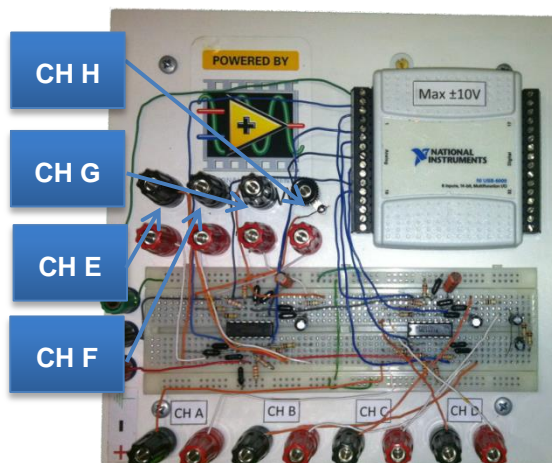


Figura 5.3: Placa de ensaios

Posteriormente não se fará distinção entre placa de ensaios e placa de aquisição de dados, assim, qualquer referência à PAD é na realidade referência à placa de ensaios.

5.2 O Protótipo Desenvolvido

O protótipo desenvolvido está esquematizado na Figura 5.4. Este é constituído por um núcleo de ferro de formato EI, por duas bobinas AC colocadas nas colunas exteriores do núcleo de ferro e um crióstato colocado na coluna central, onde será introduzida a bobina DC de fita supercondutora.

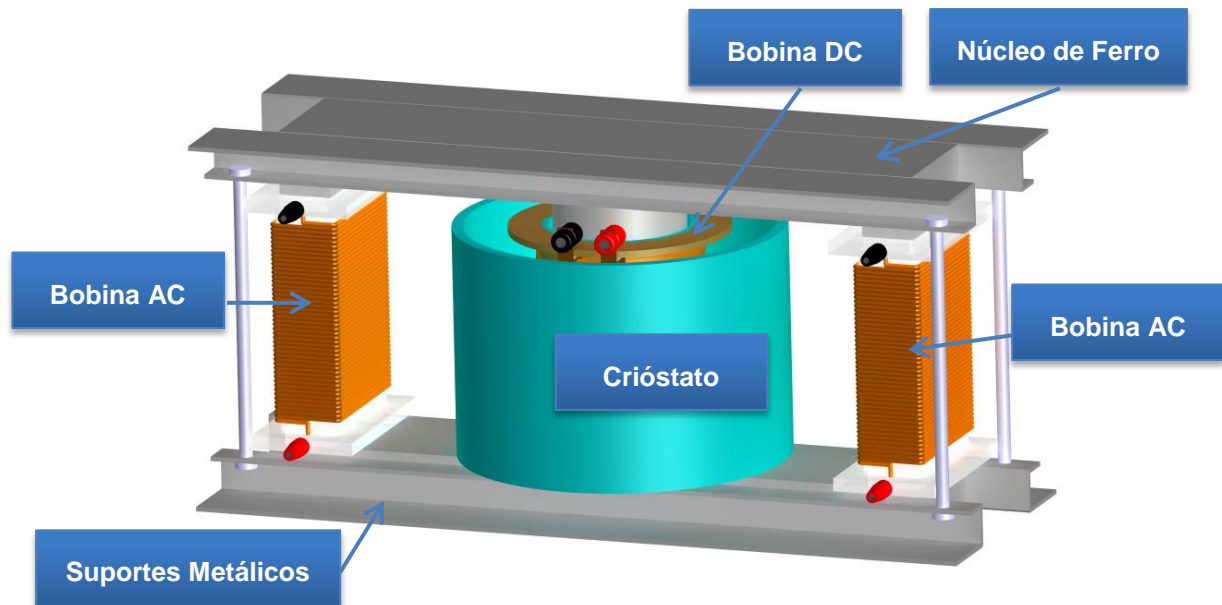


Figura 5.4: Protótipo do LCS de núcleos saturados

5.2.1 Núcleo ferromagnético

O núcleo ferromagnético adquirido está representado na Figura 5.5. Tem um formato em EI, as colunas exteriores têm secção rectangular, a coluna central tem secção aproximadamente circular, as travessas superior e inferior têm a mesma secção das colunas exteriores sendo a travessa superior amovível de forma a se ter acesso ao interior das janelas do núcleo. O núcleo é constituído por 115 chapas de aço com uma espessura de 0,5 mm cada. As chapas são presas através de suportes metálicos de aço estando isoladas do núcleo ferromagnético. No Apêndice 1 encontram-se as dimensões do núcleo ferromagnético.

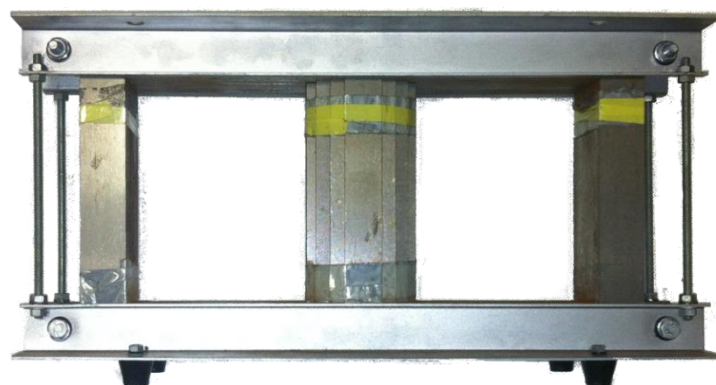


Figura 5.5: Núcleo ferromagnético adquirido para a construção do LCS.

5.2.2 Bobinas AC

Para a construção das bobinas AC foram construídos dois suportes em acrílico mostrados na Figura 5.6, de formato rectangular, de modo a se ajustarem às colunas laterais do núcleo. Em cada suporte existe um enrolamento de fio de cobre com isolamento de verniz, de 1 mm^2 de secção, que corresponde ao enrolamento primário. Existe também em cada suporte um enrolamento extra, de fio de cobre com isolamento de verniz e $0,5\text{ mm}^2$ de secção, com o objectivo de ser utilizado para se medir o fluxo magnético no núcleo da bobina e sem ligação eléctrica ao primário. São utilizados conectores para que as bobinas sejam facilmente integradas na montagem experimental. Na Figura 5.6 estão representadas as bobinas AC e na Tabela 5.2 as suas características.

Tabela 5.2: Características das bobinas AC.

	Número de espiras
Enrolamento primário	45
Enrolamento em aberto para medição do fluxo	80

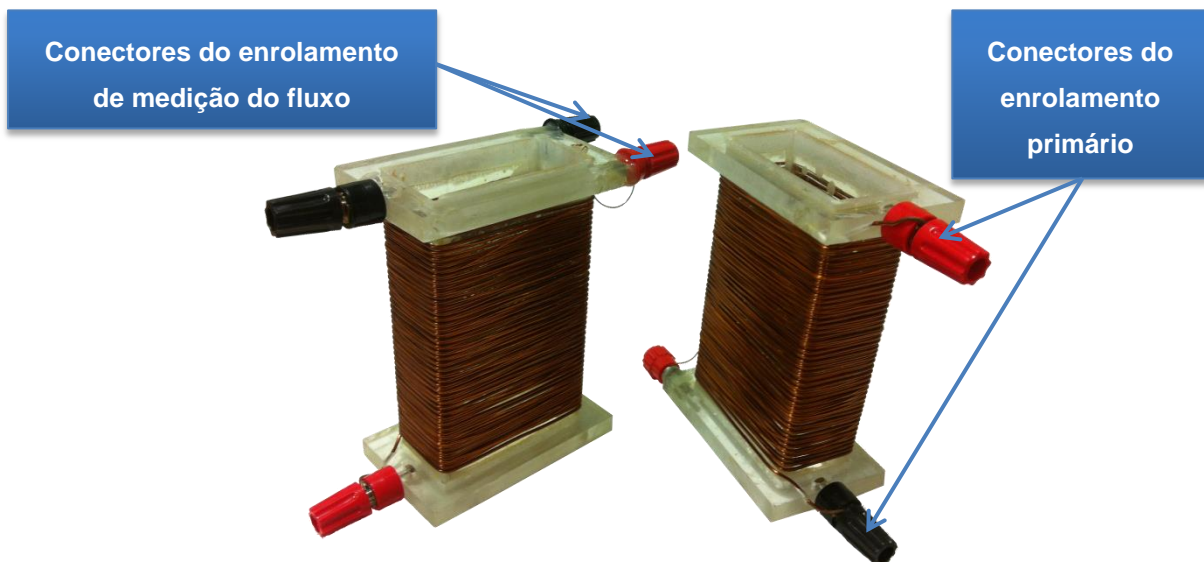


Figura 5.6: Bobinas AC construídas em suporte de acrílico.

5.2.3 Bobina DC

A bobina DC tem por objectivo saturar o núcleo ferromagnético na zona das colunas onde as bobinas AC estão inseridas. Nesta bobina é utilizada fita supercondutora de BISCCO-2223 da InnoST com as características presentes na Tabela 5.3, tendo sido feitas 52 espiras.

Tabela 5.3: Característica da fita supercondutora utilizada.

Tipo da fita HTS	Fita com camada isoladora
Corrente crítica a 77K	85 A
Largura média (sem isolamento)	$4,20 \pm 0,10$ mm
Espessura média (sem isolamento)	$0,23 \pm 0,01$ mm
Espessura da camada de isolamento	15 μm

Foi utilizado um suporte feito do material Celeron³ por este apresentar um baixo coeficiente térmico de expansão e compressão, uma elevada resistência mecânica e ser um isolante eléctrico, o que o torna ideal para aplicações a baixas temperaturas.

Foram utilizados dois conectores, devidamente presos ao suporte, que permitem ligar facilmente a bobina à fonte de corrente e tornar esta independente. A estes conectores foram ligadas duas barras de cobre que serviram para fazer a ligação das extremidades da fita supercondutora aos conectores, pois a fita supercondutora tem um limite para as deformações mecânicas, limite este que se ultrapassado danifica irremediavelmente a fita. A fita foi soldada às barras de cobre com solda de estanho, tendo-se utilizado uma fina camada de soldadura entre a fita e a barra de cobre e uma outra camada a cobrir a superfície da fita.

A bobina DC está representada na Figura 5.7.

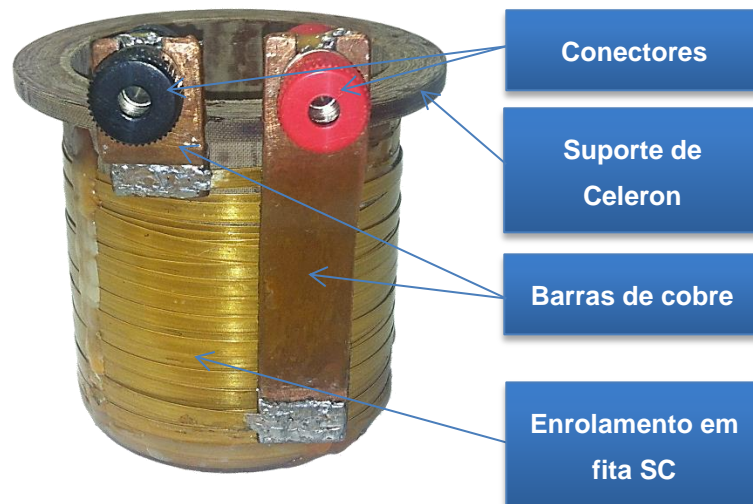


Figura 5.7: Bobina DC de fita supercondutora construída.

No Apêndice 3 apresentam-se as dimensões do suporte desta bobina.

5.2.4 Crióstato

Para que a fita SC presente na bobina DC se torne supercondutora necessita ser arrefecida. Utiliza-se o azoto líquido para tal fim pois este apresenta uma temperatura de 77K, o que leva a fita SC ao estado supercondutor. Para tal fabricou-se um crióstato com as dimensões adequadas de forma a ser colocado na coluna central do núcleo ferromagnético e onde foi introduzida a bobina DC banhada posteriormente em azoto líquido. Assim, além de se tornar o protótipo compacto, tornam-se mais prático os ensaios laboratoriais uma vez que não se necessita mergulhar o protótipo todo em azoto líquido, poupando-se assim azoto líquido.

³ O Celeron é um composto fenólico, plástico termolaminado com base em tecidos de algodão.

Foi utilizado um plástico do tipo poliestireno extrudado (XPS) para a fabricação do crióstato visto este plástico ser barato, fácil de moldar, é um isolante térmico e apresenta alguma resistência mecânica.

Para a moldagem do XPS projectou-se e construiu-se uma máquina de construção de crióstatos (MCC) que permitiu molda-lo facilmente, realizando um corte térmico no XPS. A máquina está representada na Figura 5.8.

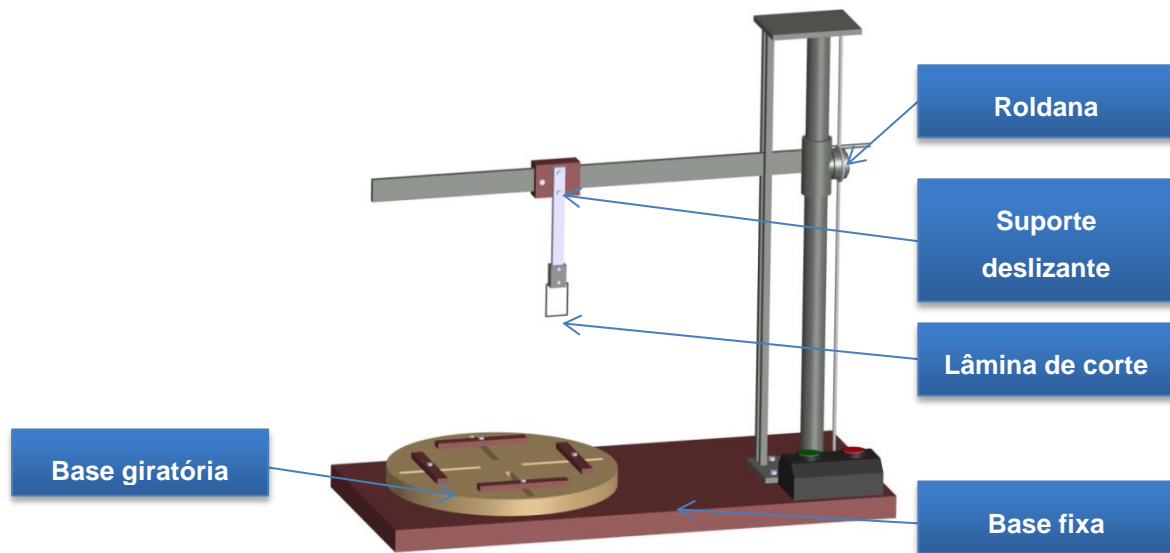


Figura 5.8: Máquina de construção de crióstatos.

A placa de XPS é colocada presa na base giratória, através do suporte deslizante coloca-se a lâmina de corte na posição pretendida. A lâmina de corte é composta por um condutor metálico que quando percorrido por um determinado valor de corrente eléctrica, aquece por efeito de Joule, e ao entrar em contacto com o XPS corta-o termicamente. Através da roldana, baixa-se a lâmina de corte até esta entrar em contacto com o XPS e corta-lo verticalmente, após este primeiro corte coloca-se a base giratória em movimento para se começar a cortar o XPS em partes circulares, como mostrado na Figura 5.9.

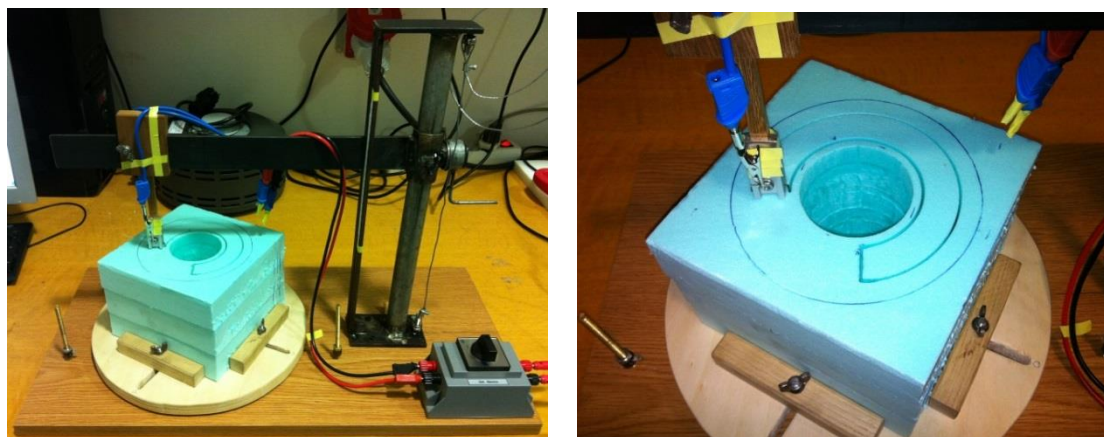


Figura 5.9: Máquina de construção de crióstatos em funcionamento.

A Figura 5.10 mostra o crióstato que foi fabricado pela MCC. De notar que foram precisas três camadas de placas de XPS para o crióstato, sendo que estas foram coladas através de cola especial para este tipo de plástico, cola que se mostrou resistente às variações bruscas de temperatura e manteve as partes bem coladas.



Figura 5.10: Crióstato feito em XPS fabricado pela máquina de fazer crióstatos.

No Apêndice 2 encontram-se as dimensões do crióstato fabricado.

5.2.5 Protótipo Final

O protótipo desenvolvido está representado na Figura 5.11. Como se pode constatar, as bobinas AC estão inseridas nas colunas exteriores, o crióstato está inserido na coluna central e a bobina DC é inserida no interior do crióstato.

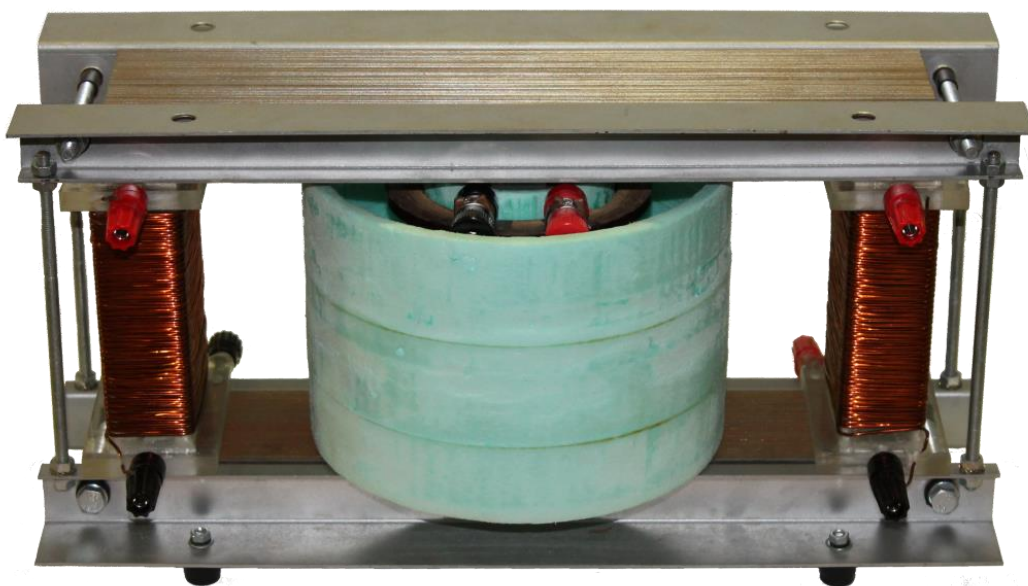


Figura 5.11: Protótipo desenvolvido.

5.3 Conclusão

Neste capítulo descreveu-se todas as partes constituintes do protótipo desenvolvido, bem como o instrumento utilizado para a aquisição de dados pelo computador.

A aquisição de dados foi realizada pela PAD, permitindo posteriormente analisar o comportamento do protótipo. Esta possui oito canais, diferentes ganhos, integrador passivo integrado e uma forma de ligação simples a um computador. Além disso apresenta uma alta taxa de amostragem ideal para a recolha e análise dos dados com o máximo de rigor.

A utilização de fita SC na bobina DC exigiu cuidados extras na forma como se fez o enrolamento DC. Isto porque além da fita SC ser frágil, se se dobra para além de um determinado ângulo, danifica-se internamente o material SC deixando assim de conduzir a corrente pelo material SC. Outro ponto importante foram as soldaduras entre a fita SC e as barras de cobre que estão ligadas aos conectores, uma vez que estes são pontos resistivos e onde pode haver perdas.

A utilização de um suporte em Celeron, para o enrolamento DC, além de garantir suporte mecânico ao enrolamento, apresenta boas características térmicas, ou seja, a dilatação/contracção com a variação da temperatura é muito reduzida.

A utilização de um crióstato, além de dar um formato mais compacto ao protótipo, permite uma maior agilidade na realização dos ensaios e na poupança de azoto líquido.

6 Procedimento Experimental, Resultados Obtidos e Discussão

Neste capítulo descreveu-se como se procedeu à montagem do circuito e ao ensaio do dispositivo de forma a verificar o seu comportamento. De seguida foram apresentados e discutidos os resultados obtidos do ensaio realizado.

6.1 Procedimento Experimental

Para se poder observar o comportamento do LCS inseriu-se este numa determinada rede, representada na Figura 6.1. Assim foi possível verificar o comportamento do LCS em situações normais de funcionamento e em situações de falha.

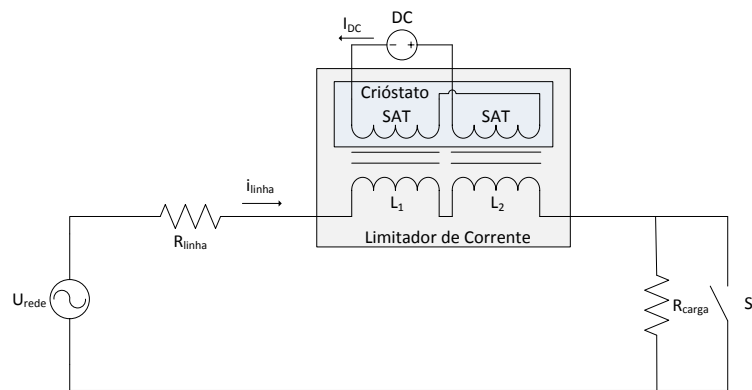


Figura 6.1: Circuito eléctrico para a realização do ensaio do LCS

O ensaio do limitador foi efectuado em regime alternado sinusoidal à frequência de 50 Hz.

Implementou-se a montagem experimental representada na Figura 6.2.

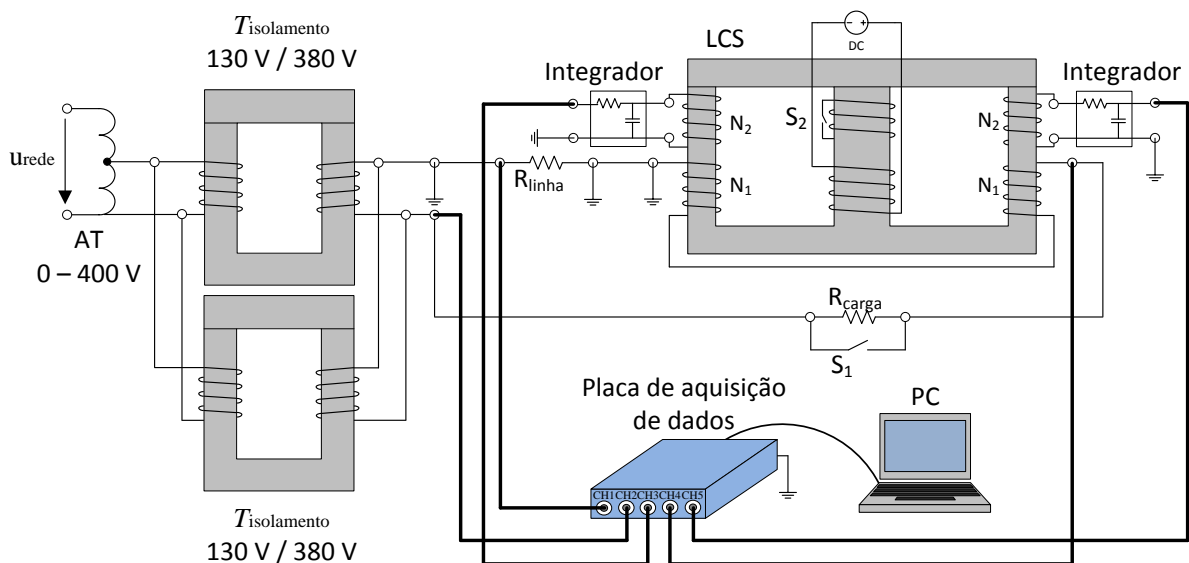


Figura 6.2: Diagrama esquemático da montagem experimental para ensaio do LCS

O material utilizado e esquematizado na Figura 6.2 foi o seguinte:

- Autotransformador (AT) de 0 – 400 V que permite variar a tensão de alimentação.
- Transformadores de isolamento ($T_{isolamento}$) em paralelo, utilizados para fazer o isolamento galvânico da montagem experimental da rede eléctrica e para permitir correntes de até 80 A.
- Resistor de linha (R_{linha}), de 0,5 Ω que representa a impedância da linha e que permite medir a corrente que a atravessa.
- Resistor de carga (R_{carga}) de 20 Ω , corresponde à carga do circuito.
- Dois integradores passivos com uma constante de tempo de 1 segundo.
- Placa para aquisição de dados que permitiu adquirir o valor das tensões em vários pontos do experimento.
- Computador (PC) para receber e tratar os dados vindos da placa de aquisição de dados.
- Protótipo do LCS: Bobinas AC com 45 espiras cada e Bobinas em aberto, com 70 espiras cada, todas de fio de cobre, e Bobina DC, com 52 espiras de fita supercondutora.
- Interruptor (S_1) que permitiu estabelecer curtos-circuitos na rede, curto-circuitando a carga e Interruptor (S_2) que permitiu curto-circuitar a bobina auxiliar.
- Duas fontes de corrente da TTI, modelo QPX1200L 60 V 50 A PSU.
- Multímetros para controlo da tensão de alimentação e corrente de linha.
- Sonda de corrente da Tektronix, modelo A622.

Serão adquiridos seis sinais para posterior análise e tratamento de dados. Os sinais adquiridos foram a tensão na impedância de linha (R_{linha}), que permitiu obter a corrente na linha através da equação (6.1), a tensão aos terminais do limitador, que representa a queda de tensão aos terminais do limitador, a tensão aos terminais dos transformadores de isolamento que representam a fonte de alimentação da rede são obtidas a partir da equação (6.2), as tensões aos terminais das bobinas em aberto ($Bobina_{Aberto_Esq}$ e $Bobina_{Aberto_Dir}$) que permitem calcular o fluxo ligado com as respectivas bobinas AC, através da equação (6.3), e a corrente DC do circuito de polarização através da sonda de corrente.

$$i_{linha} = \frac{u_{linha_medida} \cdot G_{CH1}}{R_{linha}} \quad (6.1)$$

$$u = u_{medida} \cdot G_{CH} \quad (6.2)$$

$$\psi = N_1 \phi = N_1 \frac{\tau}{N_2} u_{bobina_aberto} \cdot G_{CH3_5} \quad (6.3)$$

Os ganhos dos canais da placa de aquisição utilizados de dados estão tabelados na Tabela 5.1.

A Figura 6.3 mostra a bancada de trabalho onde foi realizada a montagem experimental e realizados os ensaios do LCS.

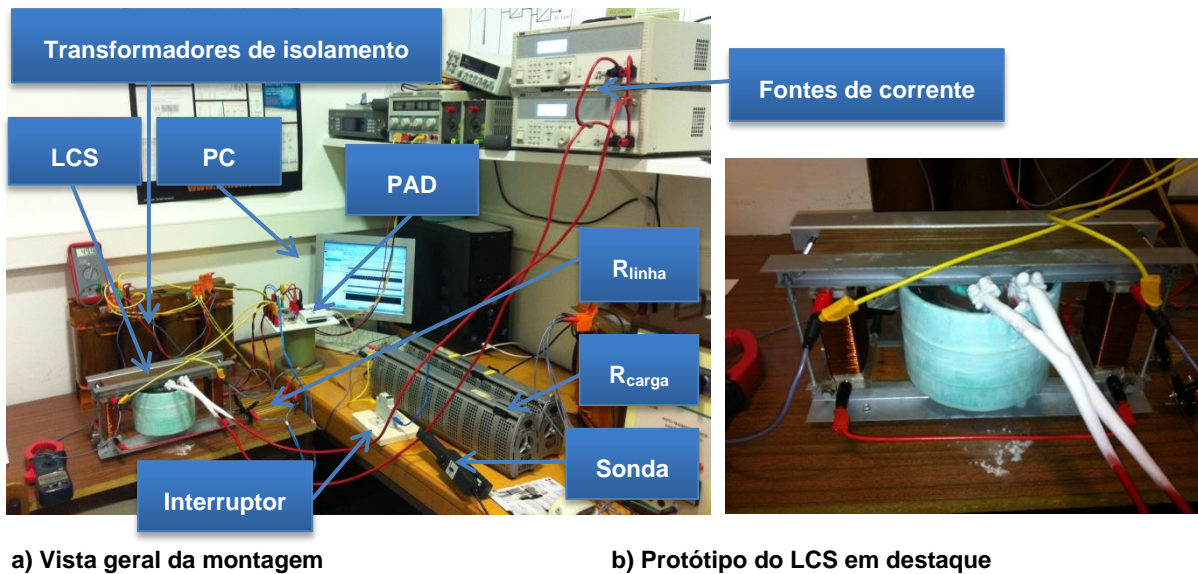


Figura 6.3: Montagem experimental para o ensaio do LCS

Foram realizados vários ensaios para verificar o comportamento do LCS em situação normal de funcionamento e em situação de falha. Para o ensaio em falha, os CC foram realizados através do interruptor S_1 que permitiu curto-circuitar a carga estabelecendo-se assim uma corrente de CC.

A tensão de alimentação do limitador foi $u_{rede} = \sqrt{2} \cdot 50 \text{ V}$ a 50 Hz . O circuito de polarização foi alimentado a partir de duas fontes de corrente ligadas em paralelo.

Foi ainda realizado um ensaio para verificar o estado da magnetização das colunas do núcleo. Pretende-se com isto verificar em que estado de saturação as colunas se encontram. Neste ensaio, que foi realizado em regime alternado, foi colocada a bobina supercondutora na coluna central e alimentada por um autotransformador, registando-se o valor da corrente que a percorre. Tanto na coluna central como numa coluna lateral foram colocadas bobinas de cobre em aberto para se poder obter o fluxo magnético nas respectivas colunas e posteriormente calcular a indução magnética nessas colunas. A bobina colocada na coluna central para magnetizar o núcleo foi a bobina DC supercondutora de 52 espiras de fita supercondutora, a bobina em aberto colocada na coluna central tem 90 espiras de diâmetro $1,5\text{mm}^2$ e a bobina em aberto colocada numa das colunas exteriores tem 80 espiras de diâmetro 1mm^2 . Este ensaio é semelhante ao ensaio descrito no capítulo 4.1.



Figura 6.4: Bobina supercondutora com enrolamento auxiliar.

6.2 Resultados Obtidos e Discussão dos Resultados

No seguinte capítulo pretende-se discutir os resultados obtidos a partir do ensaio do protótipo. Assim pretende-se verificar o comportamento do protótipo em operação normal e em situação de falha, ou seja, a invisibilidade deste pela rede e a eficácia na limitação das correntes de CC.

6.2.1 Magnetização das Colunas do Núcleo

Como descrito no capítulo 6.1, foi realizado um ensaio de modo a verificar a magnetização do núcleo do protótipo do LCS utilizando-se para isso a bobina SC de 52 espiras inserida na coluna central.

A Figura 6.5 mostra a indução magnética nas colunas do núcleo do protótipo. Isto permitiu ter a noção da força magnetomotriz que foi necessária aplicar na coluna central de modo a que as colunas exteriores fiquem saturadas magneticamente. Como só foi possível ensaiar até uma fmm de 2200 Ae (40 A de corrente), aplicou-se uma regressão linear às curvas de modo a prolonga-las para valores maiores de fmm. As equações (6.4) e (6.5) são das regressões lineares a preto, aplicadas às curvas da Figura 6.5.

$$B_{Coluna\ central} = 1,345 \times 10^{-4} \cdot fmm + 1,394 \quad (6.4)$$

$$B_{Coluna\ exterior} = 6,176 \times 10^{-5} \cdot fmm + 1,259 \quad (6.5)$$

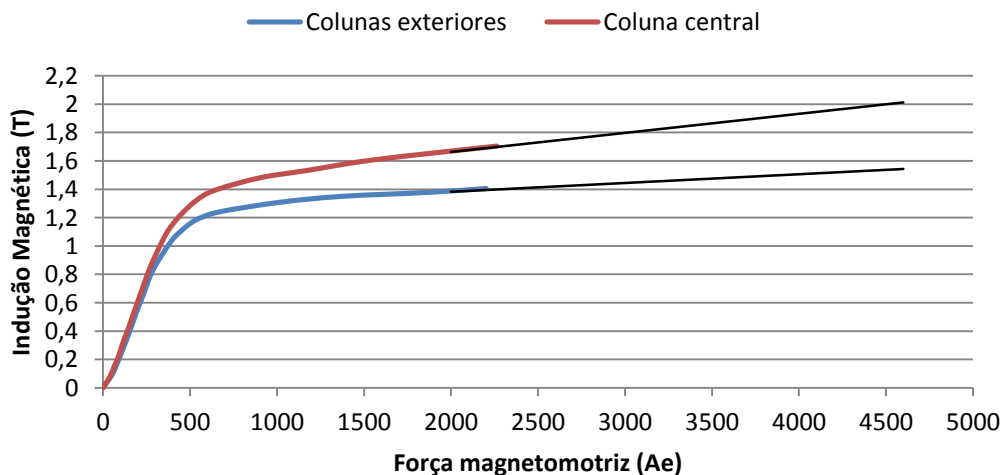


Figura 6.5: Valor para a indução magnética nas colunas do núcleo em função da fmm aplicada à coluna central.

Como se pode verificar, a indução magnética na coluna central é sempre superior à existente nas colunas exteriores para os mesmos valores de fmm. Quando a coluna central começa a saturar, as colunas exteriores aparentemente também começam a saturar mas com uma indução magnética menor. Na realidade, as colunas exteriores não começam a saturar em parte devido ao fluxo de

dispersão existente, ao entreferro existente entre a travessa superior e as colunas do núcleo, também devido ao facto da secção das colunas exteriores serem 52,9% da secção da coluna central e possivelmente por a bobina DC apresentar um raio aproximadamente 1 cm maior que o raio da coluna central aumentando o fluxo de dispersão. Torna-se assim mais difícil levar as colunas exteriores para a saturação.

O gráfico da Figura 6.6 compara os gráficos da magnetização das colunas do núcleo para valores obtidos por ensaio e por simulação (capítulo 4.3). Para as simulações efectuadas foi escolhida uma corrente de polarização DC de 40 A de modo a saturar as colunas exteriores a 1,57 T. Para este mesmo valor de indução magnética seria necessário aplicar à coluna central uma fmm de 5036 Ae (de acordo com (6.5)). Devido ao facto da bobina DC utilizada só possuir 52 espiras de fita supercondutora, da fita supercondutora apresentar uma corrente crítica de 90 A o que fez com que se utilizasse uma corrente de polarização no máximo de 80 A para se ter uma margem de segurança devido às correntes induzidas na bobina supercondutora em situação de falha, a fmm fornecida ficou limitada a 4160 Ae, que impõe nas colunas exteriores uma indução magnética de 1,52 T. Contudo, como se virá mais à frente, este valor de fmm não foi suficiente para saturar as colunas laterais profundamente, ficando estas apenas parcialmente saturadas.

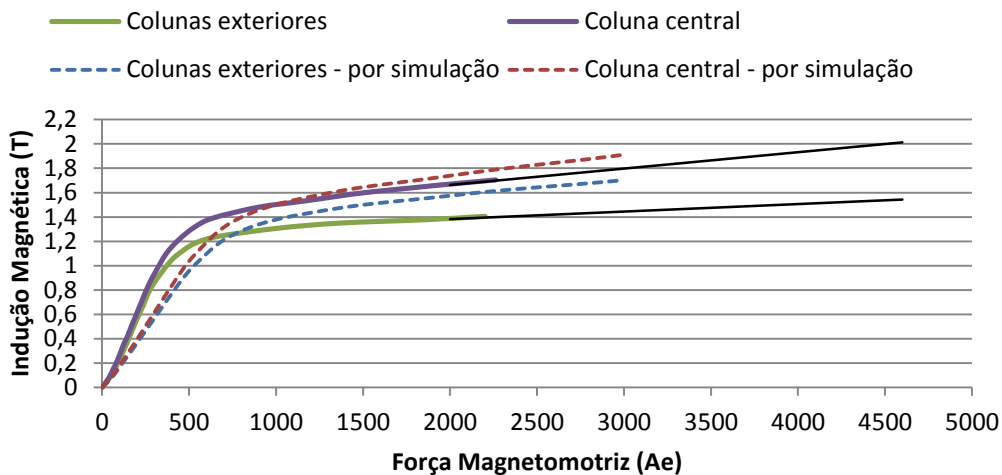


Figura 6.6: Comparação das curvas de indução magnética simuladas e obtidas experimentalmente, nas colunas do núcleo em função da fmm aplicada à coluna central

6.2.2 LCS em Funcionamento Normal

Em situação normal de funcionamento, é necessário que o protótipo apresente uma baixa impedância para que seja o mais invisível possível pela rede. Isto consegue-se fazendo saturar os núcleos das bobinas AC que estão ligadas em série com rede.

Será analisada a queda de tensão aos terminais do limitador para verificar o quão invisível o LCS é.

Foi ainda analisado o tempo necessário para que o LCS estabilize após se ligar a alimentação DC do circuito de polarização e o seu comportamento quando a fonte DC é desligada.

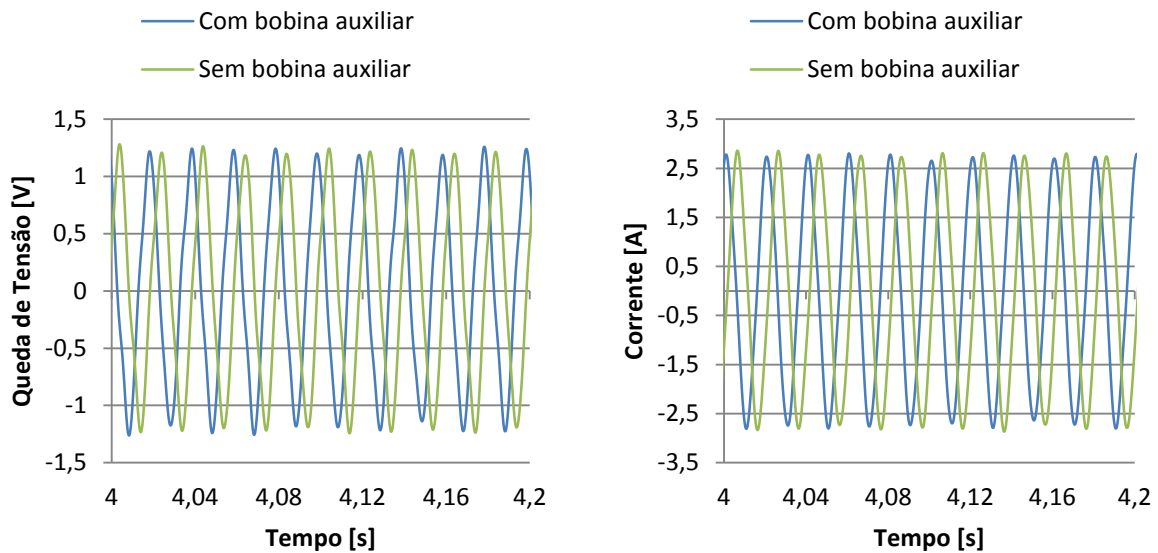
6.2.2.1 Queda de Tensão aos Terminas do LCS

A Figura 6.7 a) apresenta a queda de tensão aos terminais do limitador, quando este está a funcionar no estado normal, ou seja, num estado em que idealmente a queda de tensão deveria ser nula para que o LCS seja o mais invisível possível pela rede. Quer se tenha a bobina auxiliar inserida no LCS ou não, o valor da queda de tensão é o mesmo. A bobina auxiliar não tem qualquer influência por estar colocada na coluna central que se encontra saturada.

A queda de tensão apresenta uma amplitude de cerca de 1,3 V para ambos os gráficos da Figura 6.7. Sendo que o transformador de alimentação da rede tem uma amplitude de $\sqrt{2} \times 50$, então a queda de tensão aos terminais do limitador é de cerca 1,8% em relação à tensão de alimentação da rede, o que é um valor aceitável.

De referir ainda que o LCS representa uma impedância variável que tem uma componente real. Assim os valores de queda de tensão são também influenciados pelo valor de resistência do cobre das bobinas e contactos eléctricos e não só pela reactância do dispositivo sendo a parte resistiva a mais importante em operação normal devido à reactância ser baixa.

A Figura 6.7 b) apresenta a evolução da corrente também para o caso de se ter a bobina auxiliar inserida ou não no LCS. A corrente também apresenta a mesma amplitude para os dois casos, com uma amplitude de $i_{linha} = 2,81$ A.



a) Queda de tensão aos terminais do limitador

b) Evolução da corrente na linha

Figura 6.7: Limitador quando está a funcionar no estado normal.

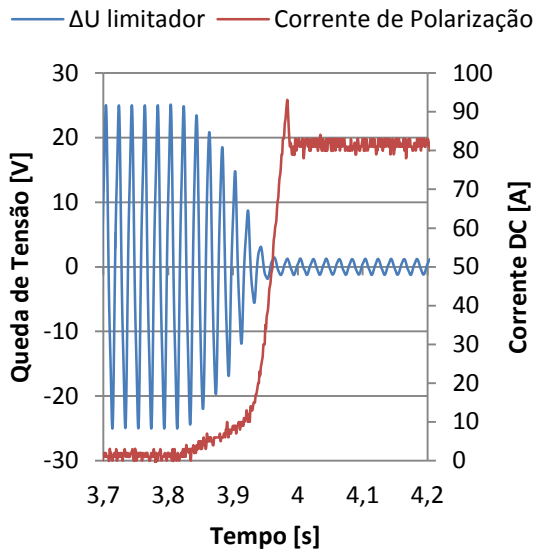
6.2.2.2 Magnetização e desmagnetização do LCS quando este se encontra inserido na rede eléctrica

De seguida foi analisado o comportamento do LCS quando este se encontra inserido na rede eléctrica e se liga e desliga a fonte de polarização. Isto permitiu perceber como reage o LCS após uma falha no circuito de polarização e após o seu restabelecimento. Para as seguintes simulações registaram-se a queda de tensão aos terminais do LCS bem com a corrente de polarização DC, apresentados na Figura 6.8 para dois casos, sem e com a bobina auxiliar ligada. Antes de se ligar a fonte de polarização a queda de tensão é de cerca de 25 V, pois como ambas as colunas exteriores não estão saturadas nem tão pouco perto da saturação, a impedância do circuito é muito elevada e com ambas bobinas AC a contribuírem para esta impedância.

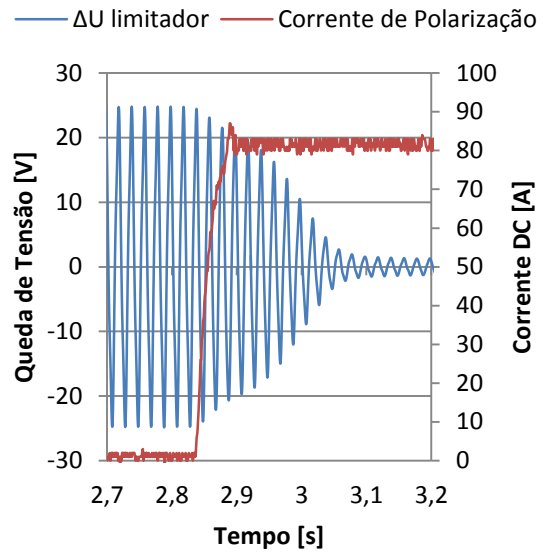
A Figura 6.8 a) mostra o momento em que se liga a fonte do circuito de polarização e sem a bobina auxiliar inserida. A fonte foi ligada em $t = 3,82 \text{ s}$ tendo demorado aproximadamente oito períodos até atingir os 80 A. A queda de tensão estabilizou ao fim de aproximadamente oito períodos, quer isto dizer que desde que se liga a fonte de polarização, o LCS necessita de 160 ms para atingir o estado normal de funcionamento. Com a bobina auxiliar inserida no circuito, Figura 6.8 b), a fonte foi ligada aos $t = 2,83 \text{ s}$ e estabilizou ao fim de aproximadamente três períodos, contudo a queda de tensão só estabilizou ao fim de aproximadamente treze períodos.

Já na Figura 6.8 c) e d) temos apresentados os momentos em que se desliga a fonte de alimentação do circuito DC. A fonte de alimentação é desligada manualmente e esta apresenta os mecanismos adequados para desmagnetizar a bobina SC. O comportamento é semelhante aos casos de quando se liga a fonte de polarização. Na Figura 6.8 c), sem a bobina auxiliar inserida, a fonte foi desligada aos $t = 7,7 \text{ s}$ demorando-se quinze períodos até se atingir os 0 A no circuito de polarização. O mesmo período demorou a a queda de tensão a atingir o máximo e estabilizar, indicando isto que o núcleo encontra-se desmagnetizado. Em Figura 6.8 d), com a bobina auxiliar introduzida, a fonte foi desligada aos $t = 7,3 \text{ s}$ e atingiu-se os 0 A no circuito de polarização ao fim aproximadamente 5 períodos. A queda de tensão só estabilizou no seu valor máximo por volta dos 150 períodos.

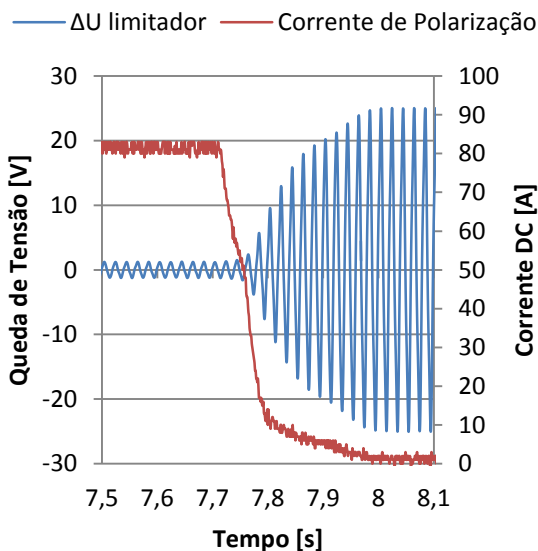
Pode concluir-se que sem a bobina auxiliar introduzida, o tempo de estabelecimento da corrente de polarização é mais elevado do que se tivesse a bobina auxiliar colocada. Isto deve-se ao facto de que, antes de se ligar a fonte de alimentação do circuito de polarização, a coluna central está desmagnetizada, devido também à forma como as bobinas AC estão ligadas, em série com a rede e em oposição magnética, o fluxo magnético AC anula-se na coluna central. Quando se liga a fonte de alimentação, esta impõe uma tensão na bobina DC de forma a estabelecer uma corrente DC, sendo que a corrente ao aumentar de zero até ao valor pretendido, varia no tempo, o que faz aparecer uma reactância na bobina DC que cai para zero à medida que o núcleo satura, e é esta variação na impedância da bobina que faz aumentar o tempo de estabelecimento da corrente DC. Isto é também válido para o caso de quando se desliga a fonte de alimentação do circuito de polarização.



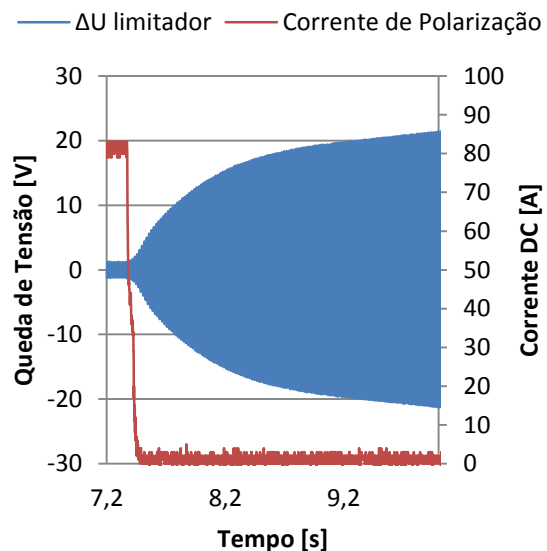
a) Ligar a alimentação do circuito de polarização, sem a bobina auxiliar



b) Ligar a alimentação do circuito de polarização, com a bobina auxiliar



c) Desligar a alimentação do circuito de polarização, sem a bobina auxiliar



d) Desligar a alimentação do circuito de polarização, com a bobina auxiliar

Figura 6.8: Queda de tensão aos terminais do limitador e corrente de polarização quando se liga e desliga a fonte de alimentação do circuito de polarização.

Já a queda de tensão no limitador demora mais tempo a estabilizar com a bobina auxiliar inserida no circuito. A queda de tensão aos terminais do limitador diz-nos o estado de saturação das colunas pois caso o LCS esteja saturado, a queda de tensão é reduzida, caso contrario, a queda de tensão é elevada. Ao ligar a fonte de alimentação do circuito de polarização, e mesmo após a corrente DC estabilizar, o fluxo magnético DC que percorre o núcleo vai variar de zero até um certo valor, valor este que é definido pela corrente de polarização utilizada. Assim, vai existir uma variação de fluxo

magnético sentida pela bobina auxiliar, que também está acoplada magneticamente com a bobina DC, e que o vai tentar anular com um fluxo de sentido contrário, fazendo com que se demore muito mais tempo a se atingir a saturação magnética nas colunas do núcleo. Ao desligar a fonte de alimentação do circuito de polarização, também com a bobina auxiliar inserida, a queda de tensão aos terminais do limitador demora muito mais tempo a estabilizar no seu valor máximo, podendo-se concluir que o LCS demora muito mais tempo a desmagnetizar do que a magnetizar.

6.2.3 LCS em Situação de Falha

Em situação de falha, o LCS necessita limitar o mais possível a corrente de CC resultante. Assim, quando ocorre uma falha, o LCS deverá agir o mais rapidamente possível, aumentando a sua impedância de modo a limitar a corrente para valores que não coloquem em risco elementos que constituem a rede eléctrica onde este está inserido.

Foram analisadas dois tipos de falhas, uma só falha na rede e duas falhas consecutivas. Foram também analisados a influência que uma falha tem sobre o transformador de alimentação da rede, sobre a corrente de polarização DC, a queda de tensão aos terminais do limitador e a corrente na linha. Foram ainda analisadas as excursões no plano $i\psi$.

A corrente prospectiva na linha, quando ocorre uma falha na rede, tem como amplitude $I_p = \frac{\sqrt{2} \cdot 50}{0,5} = 141 \text{ A}$.

6.2.3.1 Aplicação de uma falha

Na Figura 6.9 pode observar-se a corrente da linha bem como a corrente prospectiva, I_p , quando a bobina auxiliar não está inserida no LCS e para uma falha em $t = 2,8 \text{ s}$, enquanto que na Figura 6.10 observa-se o andamento da corrente na linha e a respectiva corrente prospectiva quando a bobina auxiliar está inserida no LCS e para uma falha em $t = 3,2 \text{ s}$.

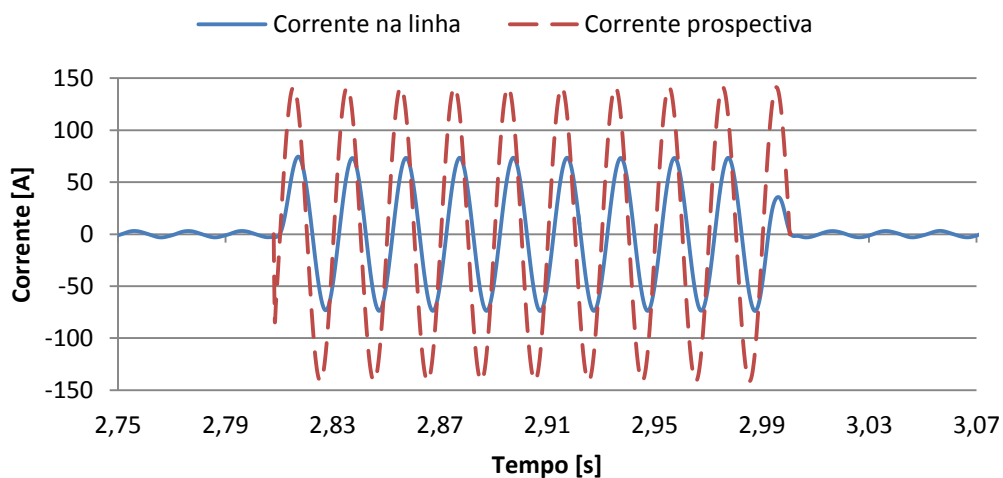


Figura 6.9: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p sem bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,8 \text{ s}$.

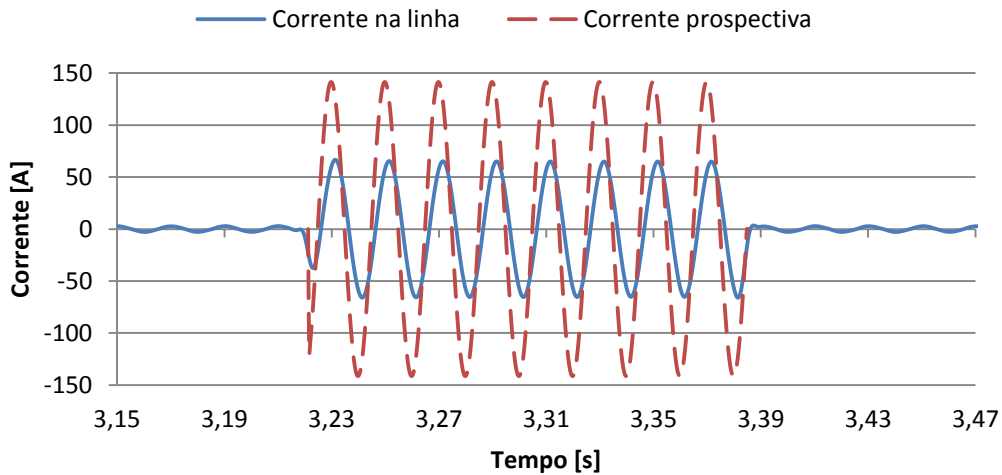


Figura 6.10: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p com bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 3,2$ s.

O poder de limitação do LCS não varia muito para com e sem a bobina auxiliar inserida no LCS. Sem a bobina auxiliar inserida a corrente foi limitada a 67,1 A, uma redução de 52,6 % em relação à corrente prospectiva. Já com a bobina auxiliar inserida no LCS, a corrente foi limitada a 68,3 A, que representa uma redução de 51,7 %.

Verifica-se que o limitador actua instantaneamente na limitação da corrente de CC e depois da falha volta muito rapidamente ao estado normal.

As Figura 6.11 e a Figura 6.12 mostram a tensão do transformador de alimentação e a queda de tensão aos terminais do LCS.

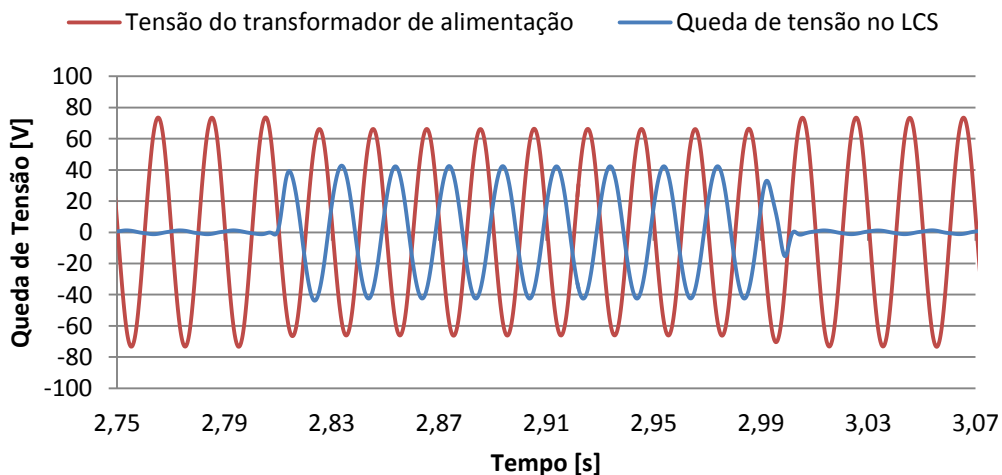


Figura 6.11: Evolução da tensão do transformador de alimentação da rede eléctrica u_{alim} e da queda de tensão aos terminais do LCS ΔU_{LCS} , sem a bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,8$ s.

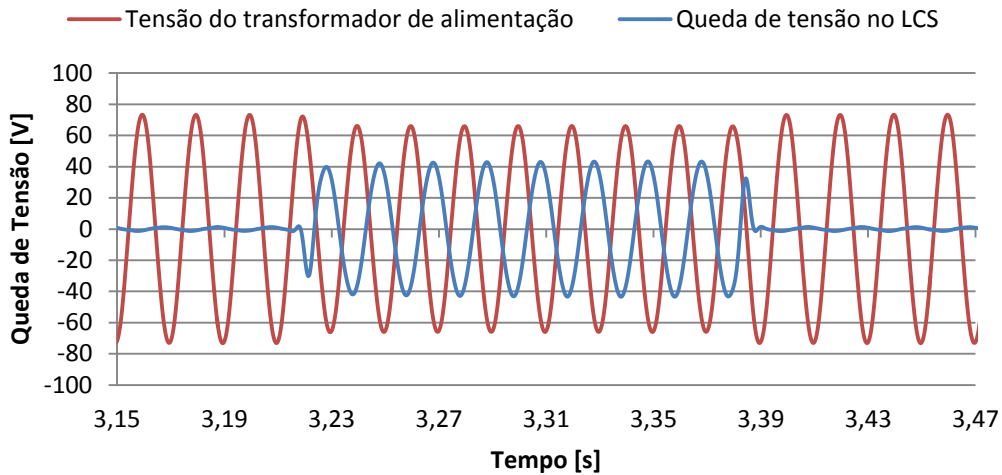
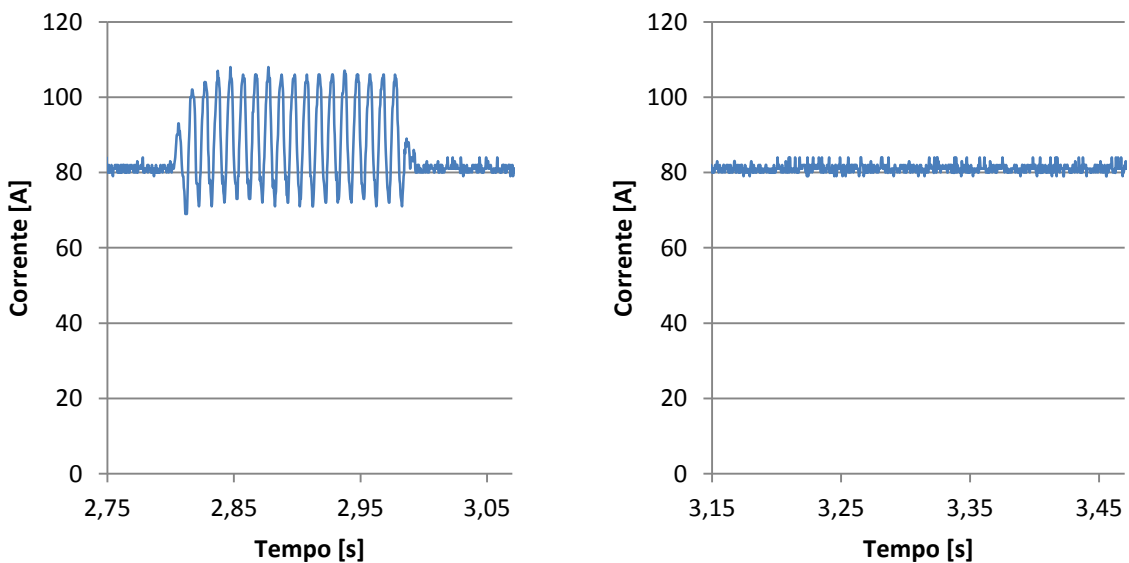


Figura 6.12: Evolução da tensão do transformador de alimentação da rede eléctrica u_{alim} e da queda de tensão aos terminais do LCS ΔU_{LCS} , com a bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 3,2$ s.

Pode-se verificar que antes da ocorrência do CC, a tensão de alimentação tem como valor máximo o que lhe foi atribuído, 70,7 Vef e a queda de tensão aos terminais do LCS é muito pequena, como visto anteriormente. Quando a falha ocorre, a tensão aos terminais do LCS aumenta até 44,4 V quando bobina auxiliar não se encontra inserida, e 44 V quando se tem a bobina auxiliar inserida. A diferença é desprezável, mas expectável como já visto anteriormente para os gráficos das correntes. Por sua vez, a tensão de alimentação desce 4,5 V aquando do CC.

A Figura 6.13 mostra a corrente de polarização DC que circula no circuito de polarização.



a) Sem a bobina auxiliar inserida no LCS

b) Com a bobina auxiliar inserida no LCS

Figura 6.13: Corrente no circuito de polarização DC.

Sem a bobina auxiliar inserida, Figura 6.13 a), a corrente induzida na bobina DC atinge variações da ordem dos 20 A. Este tipo de variações pode ser prejudicial aos componentes que compõem o circuito de polarização, danificando-os. Outro aspecto importante é a corrente crítica da fita SC, de 90 A. Em certos períodos de tempo a corrente crítica foi ultrapassada, podendo-se assim danificar a bobina DC, pelo aparecimento de pontos quentes na fita SC, por esta sair do estado supercondutor. Na Figura 6.13 b), pode-se ver a corrente no circuito de polarização quando a bobina auxiliar está inserida no limitador. Nesta situação e com a falha a ocorrer aos $t = 3,2$ s não é perceptível grande variação na corrente DC.

A Figura 6.14 apresenta a excursão no plano $i\psi$ quando a bobina auxiliar não se encontra inserida no LCS e a Figura 6.15 quando a bobina auxiliar se encontra inserida no LCS.

Para se obter o fluxo ligado com cada bobina AC utilizaram-se enrolamentos em aberto, onde a tensão lida nos seus terminais é uma imagem do fluxo magnético abraçado pelo enrolamento. Por este método só se consegue ler um fluxo magnético que varie no tempo. Por essa razão, em ambas as imagens as curvas referentes a cada bobina AC encontram-se centradas em zero, quando na realidade encontram-se deslocadas verticalmente para um dado valor de fluxo DC. Contudo, não foi necessário calcular o fluxo DC onde as curvas estão centradas pois ao somar as duas curvas para se obter a excursão $i\psi$ do ponto de funcionamento do dispositivo anula-se sempre a componente DC do fluxo.

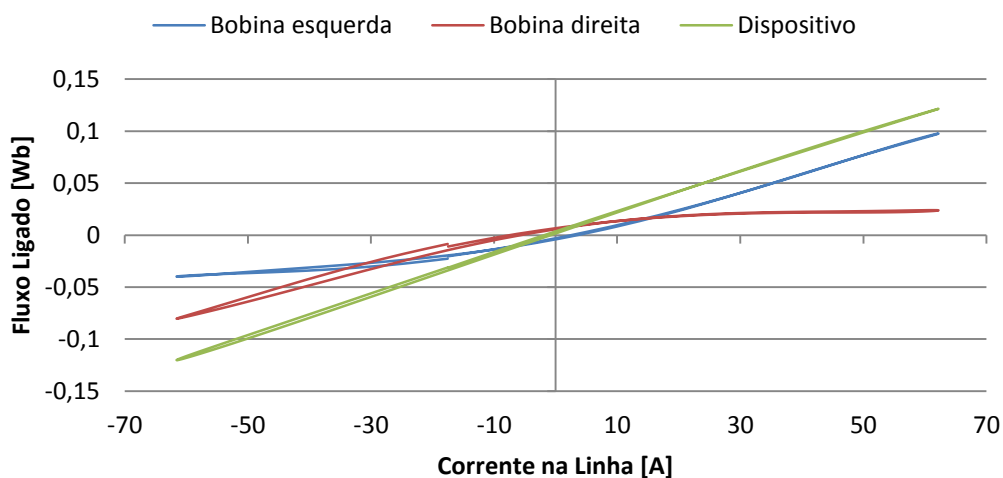


Figura 6.14: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano $i\psi$, para uma falha em $t = 2,8$ s e sem a bobina auxiliar inserida no LCS.

Ambas as excursões das Figura 6.14 e Figura 6.15, são semelhantes sendo que a única diferença evidente é que ambas as curvas associadas a cada bobina, no gráfico para com a bobina auxiliar inserida, quando a corrente da linha começa a aproximar-se de zero, as bobinas em aberto para leitura do fluxo ainda sentem uma variação do fluxo magnético, que se deve à ainda existência de corrente na bobina auxiliar, como visto nas simulações. A excursão do ponto de funcionamento do dispositivo é semelhante, quer esteja ou não inserida no LCS a bobina auxiliar.

É importante referir que, como mostram as excursões associadas a cada bobina AC, os núcleos onde se encontram as bobinas AC não se encontram totalmente saturados, pois como se pode ver, quando a corrente de linha passa por zero, o núcleo já começa a sair da saturação, o que tem implicações na queda de tensão durante o funcionamento normal, pois limita mais acentuadamente a corrente da linha.

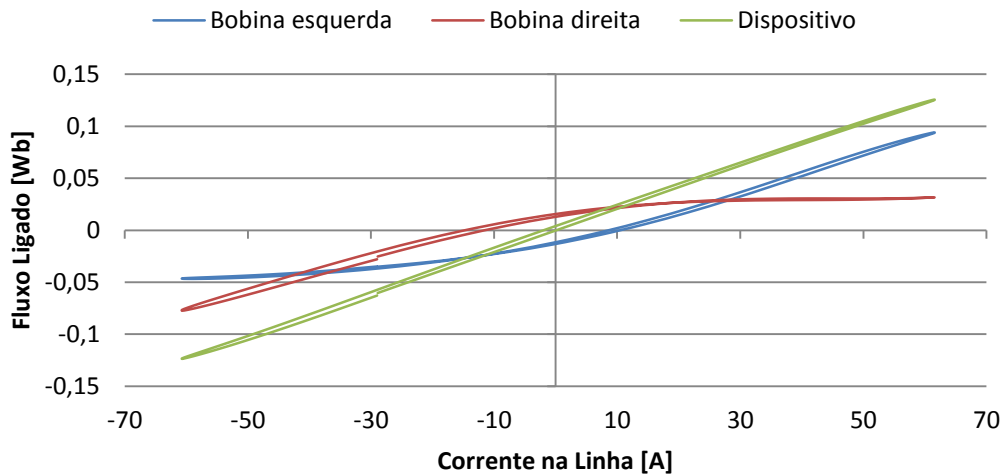


Figura 6.15: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano $i\psi$, para uma falha em $t = 3,2 s$ e com a bobina auxiliar inserida no LCS.

Na Figura 6.16 pode-se observar parte da excursão realizada pelo ponto de funcionamento do dispositivo em funcionamento normal e em situação de falha. A linha a tracejado representa a variação média do fluxo ligado com as bobinas AC do dispositivo quando este se encontra a funcionar no estado normal e a linha a cheio representa também a variação média do fluxo ligado mas numa situação de falha. Quanto mais inclinada for a recta maior a impedância do dispositivo.

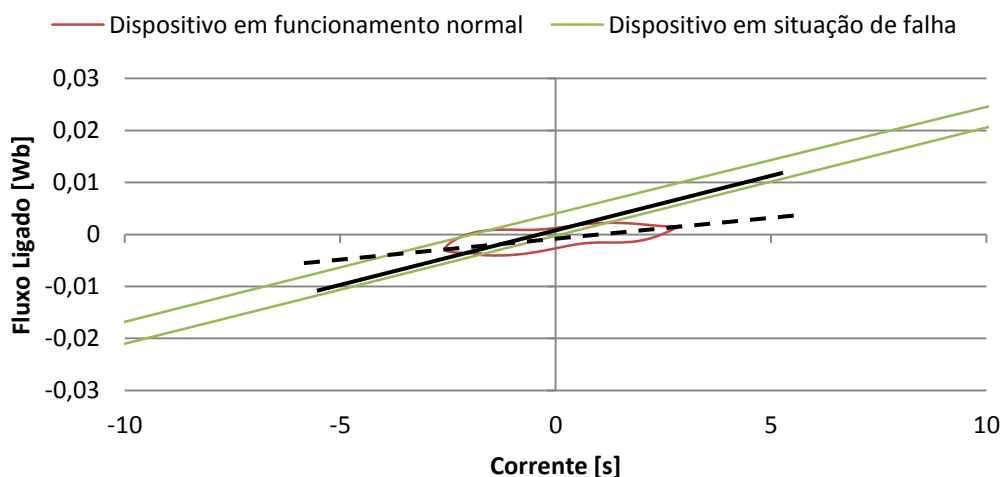


Figura 6.16: Excursão do ponto de funcionamento do dispositivo no plano $i\psi$ do dispositivo em funcionamento normal e em situação de falha, para uma falha em $t = 3,2 s$ e com a bobina auxiliar inserida no LCS, onde as rectas a preto representam a variação média do fluxo ligado com as bobinas AC.

A inclinação das duas rectas deveria ser igual nesta zona pois as colunas exteriores deveriam estar com a mesma indução magnética quer em situação de falha quer em funcionamento normal, quando a corrente da linha varia no intervalo associado ao funcionamento normal.

6.2.3.2 Aplicação de duas falhas consecutivas

Os gráficos da Figura 6.17 e da Figura 6.18 mostram o andamento da corrente na linha, para duas falhas consecutivas, para com a bobina não inserida e inserida no LCS, respectivamente.

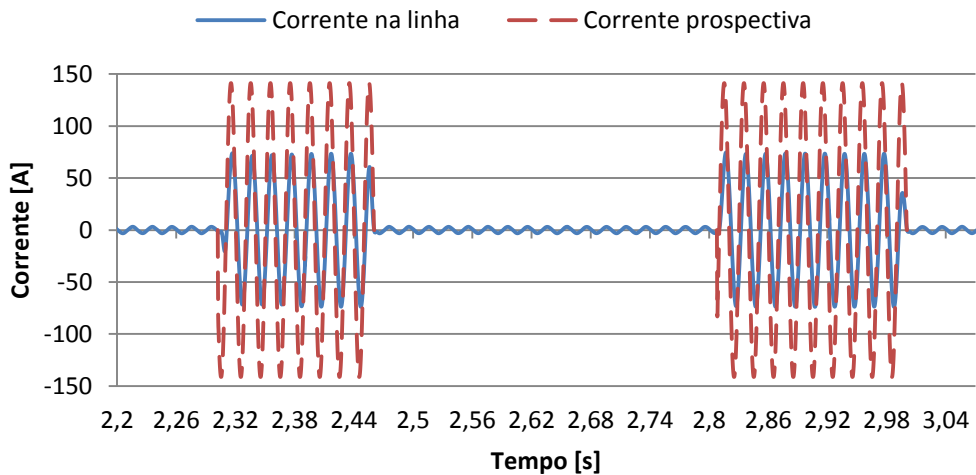


Figura 6.17: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p sem bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,3$ s e outra falha em $t = 2,8$ s.

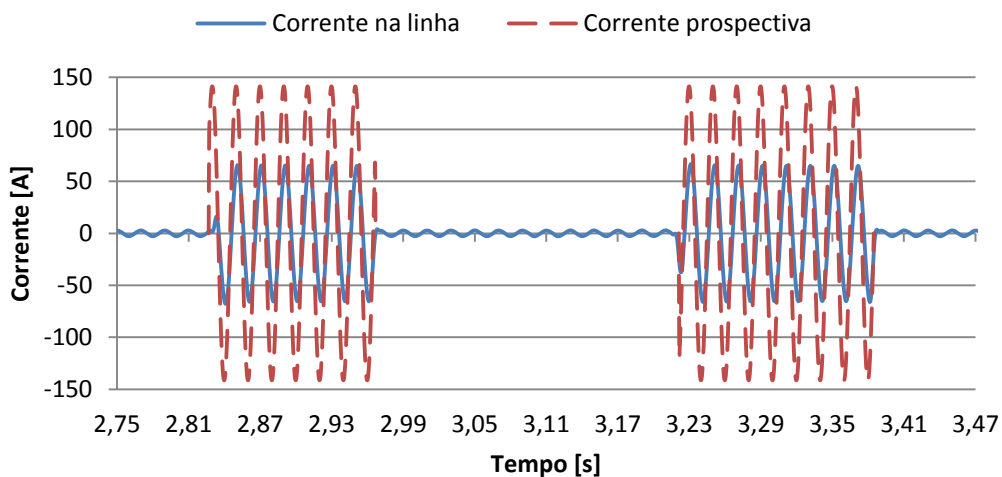


Figura 6.18: Evolução da corrente na linha i_{linha} e da corrente prospectiva I_p com bobina auxiliar inserida no LCS, para uma falha em $t = 2,8$ s e outra falha em $t = 3,2$ s.

Não foi possível efectuar duas falhas consecutivas num intervalo de tempo mais reduzido devido às falhas serem realizadas por um interruptor mecânico, contudo como fora visto nas simulações e mesmo pelos gráficos apresentados o poder de limitação mantém-se o mesmo. Para falhas consecutivas muito curtas no tempo, o que pode acontecer é o LCS ainda não ter tido tempo de

recuperar e as suas colunas não estarem saturadas o que não é um problema na limitação da próxima falha pois esta só é limitada quando o LCS está fora da saturação.

6.3 Conclusão e Comparação dos Ensaios Experimentais Com as Simulações

Neste capítulo descreveu-se como se procedeu ao ensaio do LCS e discutiram-se os resultados obtidos. De seguida foram comparados os resultados dos ensaios experimentais com as simulações efectuadas.

Em relação à magnetização das colunas do núcleo, os resultados obtidos estão coerentes com as simulações efectuadas, ou seja, a indução magnética na coluna central é sempre superior à indução magnética nas colunas exteriores. Como fora referido, isto deve-se a diversos factores como o fluxo de dispersão magnético, à área da secção da coluna central não ser pelo menos o dobro da área da secção das colunas exteriores. Contudo nos ensaios esta diferença mostrou-se mais acentuada, sendo por isso necessário uma fmm muito maior para levar ambas as colunas exteriores para a saturação o que não foi possível devido ao limite de corrente suportado pela bobina DC e ao número de espiras que esta apresenta. Isto teve influência na queda de tensão aos terminais do LCS quando este está a funcionar no estado normal pois limita a corrente de linha o que não deveria ocorrer tão acentuadamente pois quer-se o LCS o mais invisível possível pela rede.

Quanto ao poder de limitação, este é superior a 50%, sendo este o valor mínimo aceite industrialmente.

Já pelas excursões do ponto de funcionamento do dispositivo percebe-se que o LCS não se encontra com as colunas exteriores profundamente saturadas, o que tem implicações na queda de tensão que o limitador apresenta aos seus terminais, no funcionamento normal, como fora descrito nos parágrafos anteriores.

Em situações de falhas consecutivas não foi possível simular uma falha para períodos muito curtos devido ao facto de o interruptor que impõe a falha na rede ser accionado manualmente, contudo percebe-se que após a falha, o LCS recupera quase instantaneamente. Mesmo sem esta recuperação instantânea, do estado de saturação das colunas exteriores, não haveria problema na limitação de uma próxima falha uma vez que as correntes de CC são limitadas com o LCS fora da saturação.

Entre as simulações efectuadas e os resultados dos ensaios laboratoriais do LCS existem algumas diferenças que convêm serem comparadas.

No que respeita à queda de tensão do LCS, existe uma diferença entre as simulações e os ensaios, quando este se encontra a funcionar no estado normal. A Tabela 6.1 mostra a comparação da queda de tensão aos terminais do limitador e da corrente de linha quando o LCS está a funcionar no estado normal. Os valores contradizem-se pois a queda de tensão no ensaio é mais baixa que na simulação enquanto a corrente de linha no ensaio é também mais baixa que na simulação. Contudo há que ter

em conta as outras impedâncias na rede, como a resistência dos cabos, dos fios de cobre das bobinas AC, dos conectores e do resistor de carga, que embora contabilizados nas simulações podem ser um pouco diferente, e impedância interna do transformador de isolamento e do próprio transformador de alimentação que também podem influenciar os resultados.

Tabela 6.1: Valores máximos para a queda de tensão aos terminais do limitador e corrente na linha com o LCS em funcionamento normal.

	$\Delta U_{lim} [V]$	$I_{linha} [A]$
Simulação	2,67 3,8% em relação à tensão de alimentação	3,34 3,2% em relação à corrente prospectiva normal
Ensaio	1,30 1,8% em relação à tensão de alimentação	2,81 18,6% em relação à corrente prospectiva normal

Em situação de falha compararam-se as três simulações efectuadas, com fonte e corrente no circuito de polarização, com fonte de tensão no circuito de polarização, com e sem bobina auxiliar introduzida, com os dois ensaios efectuados, com e sem a bobina auxiliar introduzida. A Tabela 6.2 mostra estas comparações.

Tabela 6.2: Valores máximos para a corrente na linha, a tensão da fonte e a variação existente na corrente de polarização.

	$U_{alim} [V]$	$I_{linha} [A]$	$I_{DC} [A]$
Simulação – Fonte de polarização com fonte de corrente	$\sqrt{2} \times 50$ constante	42,4 A, uma redução de 70,0 %	Sem variação
Simulação – Fonte de polarização com fonte de tensão e sem bobina auxiliar	$\sqrt{2} \times 50$ constante	46,0 A, uma redução de 67,5 %	Variação acentuada de mais de 20 A
Simulação – Fonte de polarização com fonte de tensão e com bobina auxiliar	$\sqrt{2} \times 50$ constante	49,8 A, uma redução de 64,8 %	Variação pouco acentuada de 1,5 A
Ensaio sem bobina auxiliar inserida no LCS	$\sqrt{2} \times 50$ baixando em falha 12,1 %	67,1 A, uma redução de 52,6 %	Variação acentuada de mais de 20 A
Ensaio com bobina auxiliar inserida no LCS	$\sqrt{2} \times 50$ baixando em falha 12,8 %	68,3 A, que representa uma redução de 51,7 %	Sem variação registada

A tensão de alimentação manteve-se constante nas simulações efectuadas, o que era espectável uma vez foi uma simulação. Já nos ensaios efectuados, a tensão baixa acima de 12% aquando uma falha.

A corrente na linha em simulação tem uma redução de 70% no caso em que se garante uma corrente de polarização constante. Com a utilização de um circuito de polarização sem uma fonte de corrente que garantisse uma corrente de polarização constante, o poder de limitação baixa para 67,5% no caso sem a bobina auxiliar inserida e para 64,8% no caso com a bobina auxiliar inserida. A mesma situação se passa nos ensaios, sem a bobina auxiliar inserida a corrente foi limitada em 52,6% e com a bobina auxiliar inserida, a corrente foi limitada em 51,7%. O poder de limitação nos ensaios baixou mais de 15% em comparação com as simulações efectuadas. Isto pode ter tido várias influências, como o facto do limitador nas simulações ser modelado em 2D, as bobinas serem modeladas como se de placas paralelas se tratassem e não como enrolamentos, e a própria rede onde o limitador foi inserido pode apresentar diferenças mas sobretudo ao facto de não se ter tido fmm DC suficiente.

Já a corrente no circuito de polarização, como seria de esperar, com a introdução da bobina auxiliar a variação da corrente neste circuito é muito reduzida, sendo que nos ensaios nem se conseguiu detectar as variações da corrente no circuito de polarização, com a bobina auxiliar inserida no LCS. A variação entra a simulação e o ensaio, no caso da bobina auxiliar inserida no LCS, é semelhante.

As excursões do ponto de funcionamento do dispositivo também apresentam uma grande diferença, primeiro por as excursões obtidas pelos ensaios laboratoriais concluírem que os núcleos onde estão inseridas as bobinas AC não se encontram totalmente saturados sendo estas excursões mais semelhantes com as que foram realizadas nas simulações com o circuito de polarização com fonte de corrente do que com o circuito de polarização com fonte de tensão. De referir ainda que foi usada uma fonte de corrente para polarizar o núcleo mas mesmo assim durante uma falha não consegue manter a corrente constante.

Contudo a prestação do LCS é aceitável pois limita a corrente de CC em mais de 50%, apresenta uma recuperação quase instantânea, a queda de tensão aos terminais do LCS em estado normal de funcionamento é inferior a 5% e a corrente de polarização é muito estável no momento da falha, no caso em que a bobina auxiliar está introduzida no LCS.

7 Conclusão e Trabalhos Futuros

Nesta dissertação foi simulado e ensaiado laboratorialmente um protótipo de um LCS de núcleos saturados. De seguida são tiradas algumas conclusões sobre o trabalho desenvolvido e trabalho futuro.

Quanto às simulações realizadas para verificar o comportamento do LCS de núcleos saturados, há que ter em conta as limitações do programa de elementos finitos, Flux2D, uma vez que as simulações efectuadas foram num ambiente 2D. Contudo, as simulações apresentaram um comportamento aceitável para o LCS. Verifica-se também que é aconselhável que a coluna central apresente uma área de secção muito superior à soma das secções das colunas exteriores, por forma a garantir que as colunas exteriores fiquem bem saturadas. Outro aspecto a ter em conta é o acoplamento magnético existente entre as bobinas AC e a bobina DC, pois as correntes induzidas na bobina DC, que em falha são elevadas, podem danificar elementos no circuito de polarização e até a própria bobina DC. Foi utilizado uma bobina auxiliar de cobre curto-circuitada de modo a diminuir o fluxo AC na coluna central, para tentar reduzir as correntes induzidas na bobina SC. Verificou-se que este método é eficaz, uma vez que as correntes induzidas foram muito atenuadas.

Quanto aos ensaios laboratoriais, verificou-se que as colunas exteriores não se encontravam saturadas uma vez que seria necessário uma bobina DC ou com mais corrente, o que não foi possível pois a corrente já estava quase no limite da corrente crítica da fita supercondutora, ou mais espiras, o que não foi possível pois não havia mais fita supercondutora para realizar mais enrolamentos, ou diminuir a área de secção das colunas exteriores para que estas atinjam mais rapidamente a saturação. Isto teve influencia quando o limitador estava a funcionar no estado normal, uma vez que como os núcleos das bobinas exteriores não se encontram totalmente saturadas, as bobinas sentiram alguma variação do fluxo magnético a elas ligados, o que fez aumentar a indutância destas bobinas e conseqüentemente o aumento da queda de tensão aos terminais do LCS em funcionamento normal, fazendo com que o LCS não seja o mais transparente à rede possível. A queda de tensão foi de 1,8% em funcionamento normal e a limitação da corrente de CC foi de aproximadamente 52%, o que é um valor bastante aceitável. Outros problemas referidos nas simulações como o problema das correntes induzidas no circuito de polarização e a capacidade de se saturar as colunas externas são também verificados nos ensaios laboratoriais.

Em relação ainda às simulações, estas apresentam algumas discrepâncias com os resultados experimentais, o que pode ser devido ao problema das simulações serem realizadas num ambiente 2D.

Como trabalho futuro, e dado o já explicado anteriormente, será necessário ou corrigir as áreas de secção das colunas laterais ou será necessário aumentar o número de espiras da bobina supercondutora para se conseguir levar as colunas exteriores para a saturação. Será necessário desenvolver modelos de linha à semelhança dos que foram construídos para a tipologia indutiva (Pina, 2010) de modo a ser mais fácil o dimensionamento deste tipo de LCS e verificar o seu comportamento nas mais diversas redes onde serão inseridos, sendo que estes modelos deverão ser

posteriormente validados e afinados através de ensaios laboratoriais. Poderá ainda ser construído e ensaiado um LCS de núcleos saturados trifásico, escalando a configuração utilizada para trifásico ou desenvolvendo novas tipologias (ver Figura 7.1), pois estes são os que têm interesse em aplicações de energia, e posteriormente testados e ensaiados. Terá que ser dado uma especial atenção ao circuito de polarização, encontrar alternativas ou melhorar métodos existentes por forma a garantir uma perfeita magnetização do núcleo ferromagnético e reduzindo o efeito do acoplamento magnético entre as bobinas AC e a bobina supercondutora.

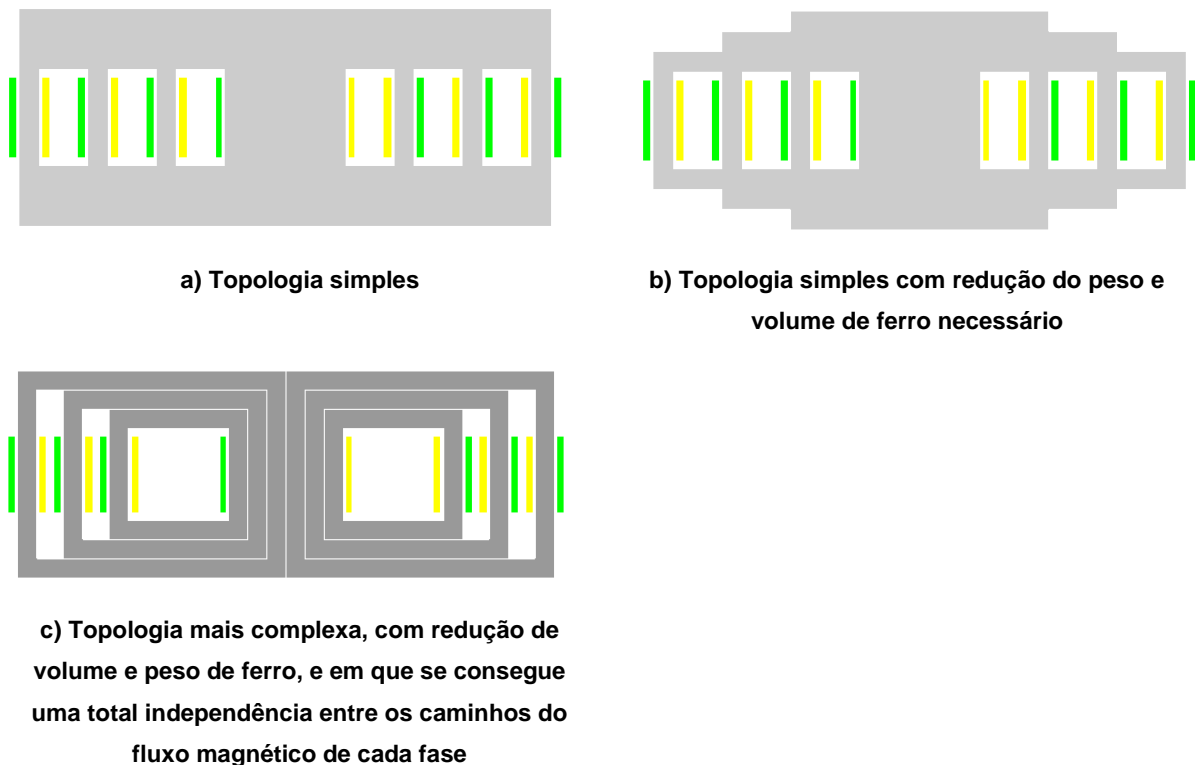


Figura 7.1: LCS de núcleos saturados trifásico, com geometria planar de construção menos complexa que as topologias habituais. A bobina supercondutora DC encontra-se ao centro e as bobinas AC nas colunas exteriores simétricas.

8 Publicações

A realização deste trabalho contribuiu para o seguinte artigo científico:

- Arsénio, P., Silva, T., Vilhena, N., Pina, J. M., Pronto, A., “Towards predicting the performance of inductive current limiters by the analysis of their characteristic hysteresis loop”, presented at the Applied Superconductivity Conference, Portland, USA, October 2012.

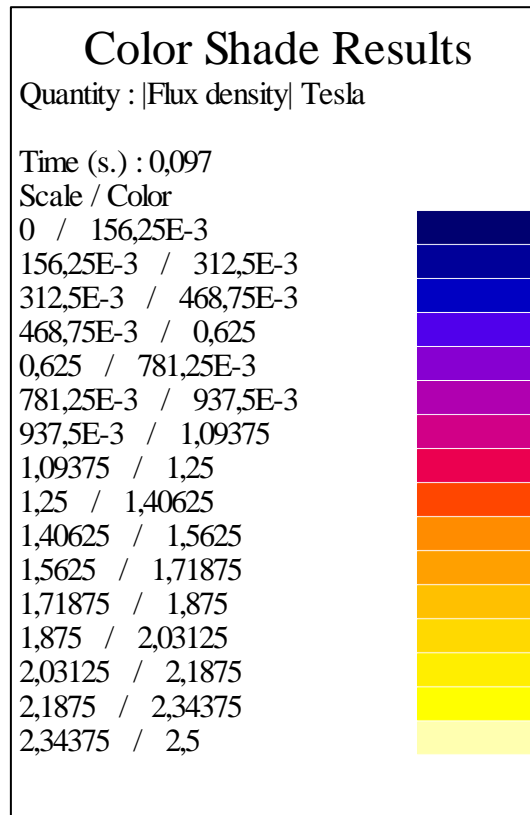
Referências Bibliográficas

- Cvoric, D., De Haan, S. W. H., & Ferreira, J. a. (2008). Improved Configuration of the Inductive Core-Saturation Fault Current Limiter with the Magnetic Decoupling. *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1–7). IEEE. doi:10.1109/08IAS.2008.356
- Cvoric, D., De Haan, S. W. H., & Ferreira, J. A. (2011). New saturable-core fault current limiter topology with reduced core size. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 6(2), 120–126. doi:10.1002/tee.20633
- Duggan, P. M. (2006). Integration issues for fault current limiters and other new technologies- a utility perspective. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting* (p. 3 pp.). IEEE. doi:10.1109/PES.2006.1709126
- Gong, W. Z., Zhang, J. Y., Cao, Z. J., Hong, H., Tian, B., Wang, Y., Wang, J. Z., et al. (2008). HTS dc bias coil for 35kV/90MVA saturated iron-core fault current limiter. *Physica C: Superconductivity*, 468(15-20), 2050–2053. doi:10.1016/j.physc.2008.05.124
- Hong, H., Cao, Z., Zhang, J., Hu, X., Wang, J., Niu, X., Tian, B., et al. (2009). DC Magnetization System for a 35 kV/90 MVA Superconducting Saturated Iron-Core Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 1851–1854. doi:10.1109/TASC.2009.2019292
- Moriconi, F., De La Rosa, F., Darmann, F., Nelson, A., & Masur, L. (2011). Development and Deployment of Saturated-Core Fault Current Limiters in Distribution and Transmission Substations. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3), 1288–1293. doi:10.1109/TASC.2011.2104932
- Moscrop, J., & Darmann, F. (2009). Design and development of a 3-Phase saturated core High Temperature Superconducting Fault Current Limiter. *Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009. EPECS '09. International Conference on*, 1–6. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5415730
- Noe, M., & Schacherer, C. (2007). Status and outlook on superconducting fault current limiter development in Europe. *Status and outlook on superconducting fault current limiter development in Europe*, 07, 529–534. Retrieved from <http://www.esi.nagoya-u.ac.jp/h/isets07/Contents/Session04/1182Noe.pdf>
- Noe, M., & Steurer, M. (2007). High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. *Superconductor Science and Technology*, 20(3), R15–R29. doi:10.1088/0953-2048/20/3/R01
- Oberbeck, G., Stanton, W., & Stewart, A. (1979). Saturable Reactor Limiter For Current. *US Patent 4,152,637*. Retrieved from <http://www.google.com/patents?hl=en&lr=&vid=USPAT4152637&id=mGcuAAAAEBAJ&oi=fnd&q=Saturable+reactor+limiter+for+current&printsec=abstract>
- Pan, Y., & Jiang, J. (2008). Experimental study on the magnetic-controlled switcher type fault current limiter. *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies* (pp. 1987–1991). IEEE. doi:10.1109/DRPT.2008.4523733
- Patterson, J., Gomez, P., Gravely, M., & Jones, M. (2011). *Development of Fault Current Controller Technology* (pp. 1–130). Irvine. Retrieved from <http://uc-ciee.org/downloads/FaultCurrentController.pdf>

- Pina, J. M. (2010). *Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Universidade Nova de Lisboa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10362/5059>
- Raju, B. P., Parton, K. C., & Bartram, T. C. (1982). A Current Limiting Device Using Superconducting D.C. Bias Applications and Prospects. *IEEE Power Engineering Review, PER-2*(9), 34–35. doi:10.1109/MPER.1982.5519468
- Rozenshtein, V., Friedman, A., Wolfus, Y., Kopansky, F., Perel, E., Yeshurun, Y., Bar-Haim, Z., et al. (2007). Saturated Cores FCL—A New Approach. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 17*(2), 1756–1759. doi:10.1109/TASC.2007.898153
- Wang, H., Niu, X., Gong, W., & Xin, Y. (2011). Saturated iron core superconducting fault current limiter. *2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*, 340–343. doi:10.1109/ICEPE-ST.2011.6123003
- Xin, Y., Gong, W. Z., Hong, H., Gao, Y. Q., Niu, X. Y., Zhang, J. Y., Sun, Y. W., et al. (2012). Development of a 220 kV/300 MVA superconductive fault current limiter. *Superconductor Science and Technology, 25*(10), 105011. doi:10.1088/0953-2048/25/10/105011
- Xin, Y., Zhang, J. Y., & Gong, W. Z. (2010). Voltage Surge Protection Circuit for Superconducting Bias Coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 20*(3), 1118–1121. doi:10.1109/TASC.2010.2045363

Anexos

Anexo 1: Escala de Cor Para a Indução Magnética



Apêndices

Desenho Técnico

D

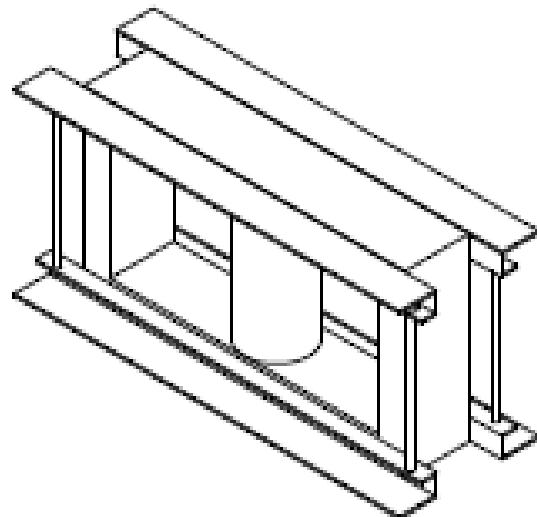
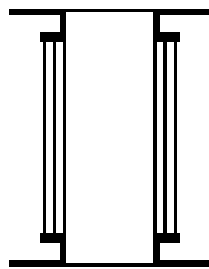
C

B

A

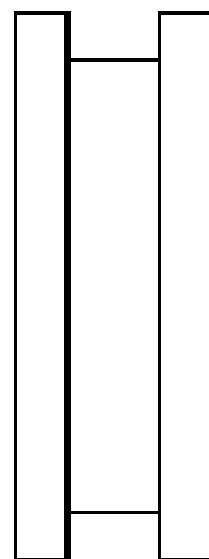
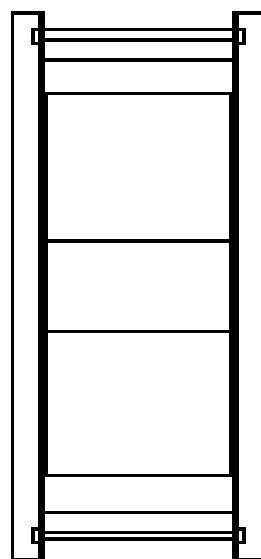
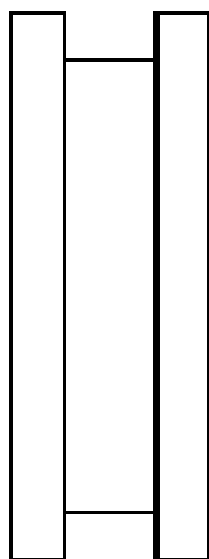
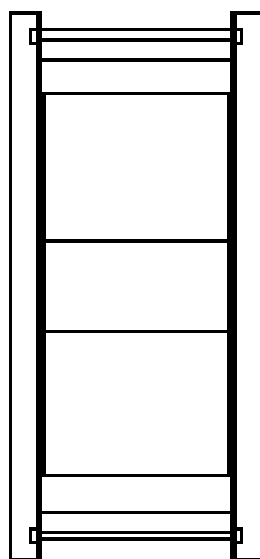
4

4



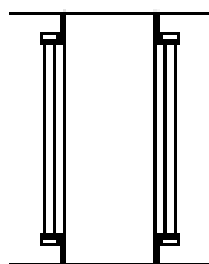
3

3



2

2



Todos os direitos reservados.

NUCLEO FERROMAGNETICO

DESENHADO POR
Nuno Vilhena

DATA
18/09/2012

APENDICE 1

1

A4

REV

ESCALA 1:4

mm

PAGINA 94

D

A

D

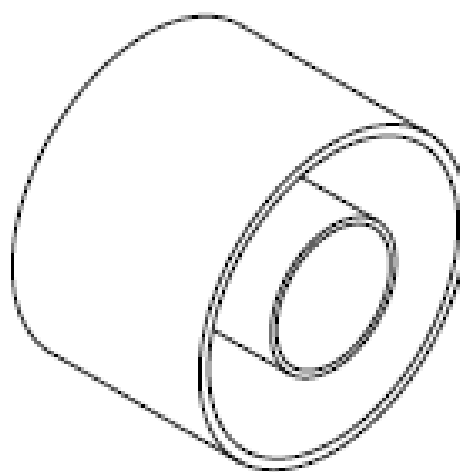
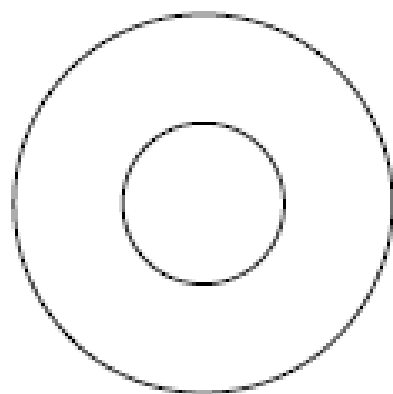
C

B

A

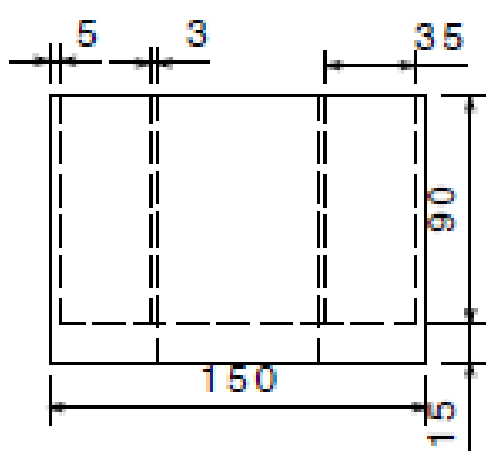
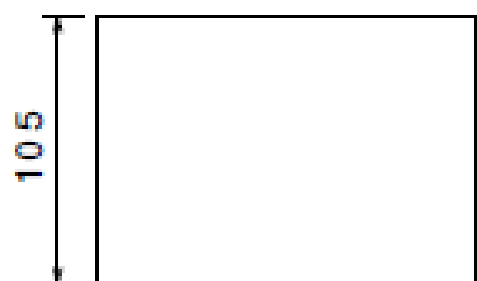
4

4



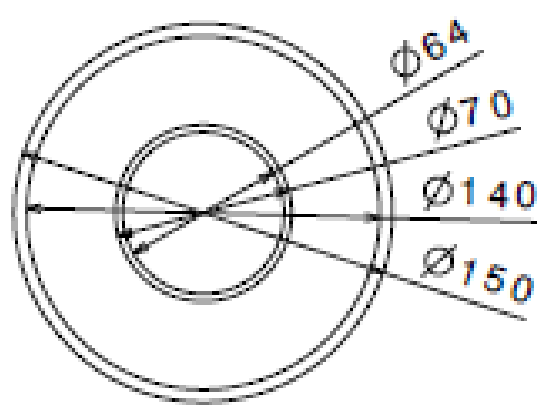
3

3



2

2



Todos os direitos reservados.

CRIOSTATO

DESENHADO POR
Nuno Vilhena

DATA
18/09/2012

APENDICE 2

1

A4

REV

ESCALA 1:3

mm

PAGINA 95

D

A

D

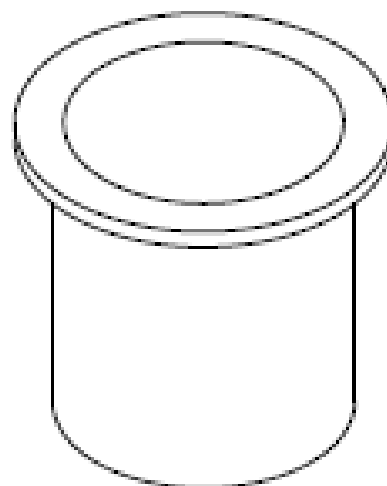
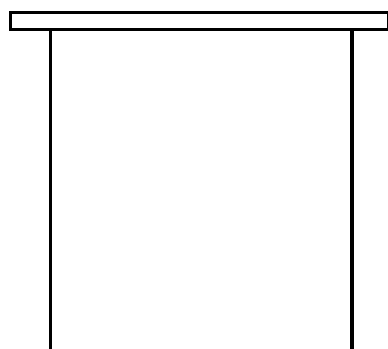
C

B

A

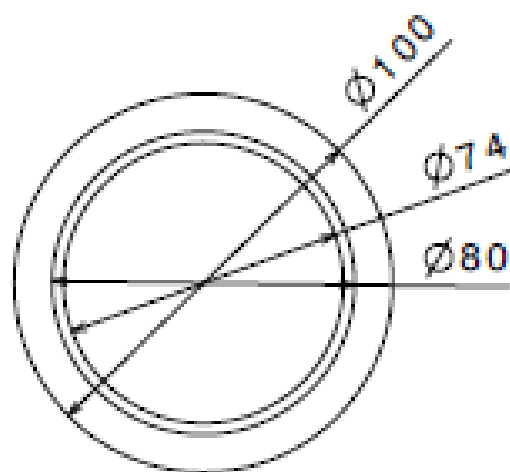
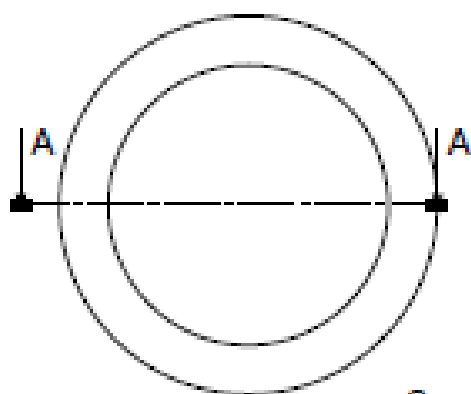
4

4



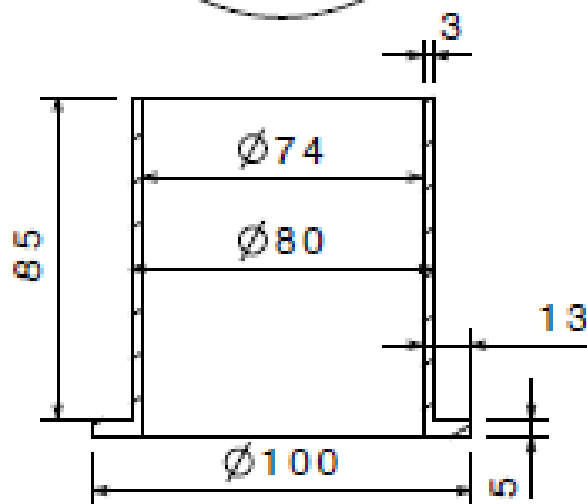
3

3



2

2



Todos os direitos reservados.

SUPORTE PARA A BOBINA DC

DESENHADO POR
Nuno Vilhena

DATE
18/09/2012

APENDICE 3

1

A4

REV

ESCALA 1:2

mm

PAGINA 96

D

A

D

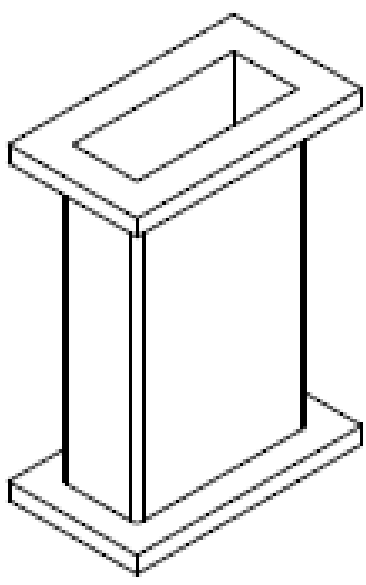
C

B

A

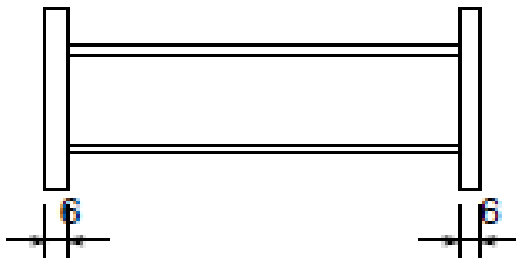
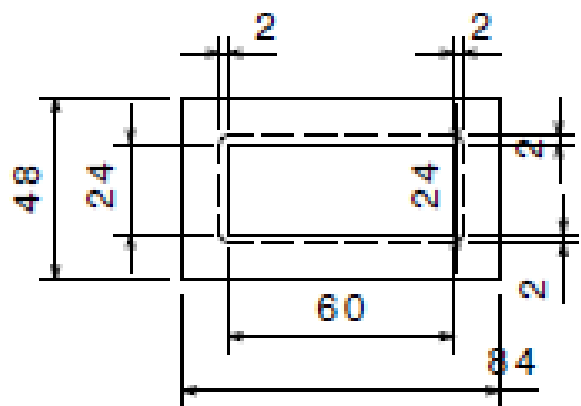
4

4



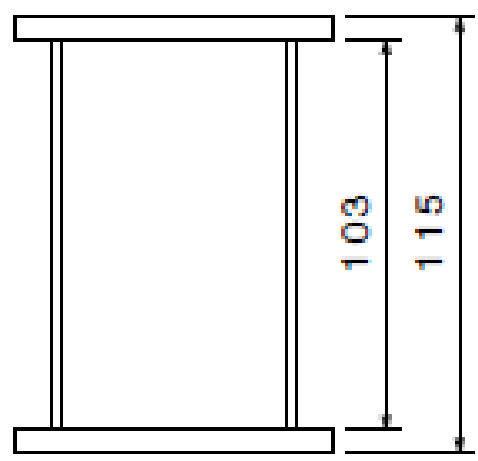
3

3



2

2



Todos os direitos reservados.

SUPORTE BOBINAS AC

DESENHADO POR
Nuno Vilhena

DATA
18/09/2012

APENDICE 4

1

A4

REV

ESCALA 1:2

mm

PAGINA 97

D

A