



Filipe António Mimoso Lopes de Oliveira Ferreira

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Desenvolvimento de um Modelo Computacional
para Simulação de Limitadores de Corrente
Supercondutores Indutivos**

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

Orientador: Prof. Dr. João Miguel Murta Pina, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Dr. Tiago Oliveira Machado de Figueiredo Cardoso

Vogais: Prof. Dr. João Francisco Alves Martins

Prof. Dr. João Miguel Murta Pina

Desenvolvimento de um Modelo Computacional para Simulação de Limitadores de Corrente Supercondutores Indutivos.

Copyright © Filipe António Mimoso Lopes de Oliveira Ferreira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

Ao professor Doutor João Murta Pina pela sua importante contribuição no desenvolvimento desta dissertação como também pelos conhecimentos transmitidos e por toda a orientação facultada.

A toda a minha família e à minha namorada, que sempre me apoiaram neste caminho árduo para um futuro próspero, por toda a compreensão, amor, carinho e paciência.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado nesta demanda e que sempre demonstraram o seu apoio e amizade.

Resumo

As redes do sistema de energia elétrica formam uma infraestrutura determinante para a qualidade da energia fornecida. À medida que os níveis de falha de corrente aumentam, surge um risco crescente de que tais falhas excedam a capacidade de proteção dos dispositivos energéticos, expondo as redes a danos muito dispendiosos.

A tecnologia dos materiais supercondutores de alta temperatura possibilitou a criação de uma nova gama de limitadores de corrente, cujas características são consideravelmente vantajosas face aos dispositivos convencionais. Apesar da necessidade de um sistema criogénico, estes dispositivos operam de forma passiva, limitando eficazmente os picos de corrente e sem a interrupção do fornecimento de energia.

Com este trabalho pretende-se desenvolver um modelo computacional, em Simulink, adequado à simulação de limitadores de corrente supercondutores do tipo indutivo (LCSi) de blindagem magnética, que possam ser utilizados na simulação de diferentes tipos de redes (com distintas cargas e fontes).

Palavras-Chave: Supercondutividade, Limitador de corrente supercondutor indutivo (LCSi), Blindagem Magnética, Simulink, Indutâncias Variáveis, Correntes de Curto-Circuito (CC)

Abstract

The electric energy network forms a key infrastructure for the quality of power supplied. As the levels of fault current increase, there is a growing risk that such failure exceed the protective capability of energy devices, exposing networks to very expensive damage.

High temperature superconducting technology enabled the creation of a new range of fault current limiters, whose characteristics are considerably gainful over conventional devices. Despite the need for a cryogenic system, these devices operate passively, effectively limiting fault currents and without interrupting power supply.

With this work, is intended to develop a computer model, based in Simulink, able to simulate inductive shielded superconducting fault current limiter (iSFCL), which can be used to simulate different types of networks (with different loads and sources).

Keywords: Superconductivity, Inductive Superconductor Fault Current Limiter (iSFCL), Magnetic Shield, Simulink, Variable Inductances, Fault Currents (FC).

Índice de Matérias

1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização da Dissertação.....	3
1.4 Contribuições Originais.....	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Supercondutividade.....	6
2.2.1 Introdução Histórica	6
2.2.2 Efeitos Macroscópicos.....	7
2.2.3 Aplicações da Supercondutividade.....	8
2.3 Sistema de Energia Elétrica.....	14
2.3.1 Introdução.....	14
2.3.2 Níveis de Tensão	15
2.3.3 Topologias de Rede	15
2.3.4 Falhas na Rede	17
2.4 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito	19
2.4.1 Métodos Convencionais de Limitação de Corrente	21
2.4.2 Limitadores de Corrente Supercondutores.....	22
2.4.3 Limitadores de Corrente Supercondutor do Tipo Resistivo	23
2.4.4 Limitadores de Corrente Supercondutor do Tipo Indutivo	23
2.4.5 Comparação entre Limitadores de Corrente.....	27
2.5 Modelização de Limitadores de Corrente Indutivos.....	29
2.5.1 Modelo Baseado no Esquema de Steinmetz Convencional.....	29
2.5.2 Modelo Baseado no Ciclo de Histerese Máximo.....	30
2.6 A Aplicação Matlab/Simulink	32
2.6.1 Introdução.....	32
2.6.2 Biblioteca SimPowerSystems	32
2.6.3 Ferramentas de Simulação de Indutâncias Não Lineares	33
2.6.4 Conclusões.....	36

3 Implementação do Modelo Computacional	37
3.1 Introdução	37
3.2 Análise do Comportamento do Ciclo de Histerese Máximo.....	38
3.3 Modelo Computacional do LCSi	39
3.3.1 Bloco de Limitação da Corrente.....	42
3.3.2 Bloco da Fonte de Corrente Controlada.....	43
3.3.3 Bloco Lógico de Comutação.....	45
3.3.4 Layout Completo do LCSi.....	48
3.4 Dificuldades e Limitações	49
4 Simulações e Análise de Resultados	51
4.1 Introdução	51
4.2 Aplicação do LCSi em Circuito Monofásico.....	52
4.3 Fiabilidade do Modelo Computacional	55
4.4 Aplicação do LCSi em Circuito Trifásico	61
4.4.1 Curto-Circuito Fase – Fase	62
4.4.2 Curto-Circuito Fase – Terra.....	64
4.4.3 Curto-Circuito Fase – Fase –Terra	65
4.4.4 Curto-Circuito Trifásico sem Ligação à Terra	66
4.4.5 Curto-Circuito Trifásico – Terra	68
4.5 Síntese e Conclusões.....	70
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	71
Bibliografia	73
Anexos	77

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Heike Kamerlingh Onnes, Prémio Nobel da Física 1913. Retirado de http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/annes-bio.html [14/07/2014].	7
Figura 2.2 - Diagrama T-J-H que caracteriza os limites de operação de um material superconductor. Adaptado de (Pina, 2010).	7
Figura 2.3 – Propriedade macroscópica dos materiais supercondutores. Na imagem observa-se um magneto a levitar sobre um material superconductor (arrefecido através de azoto líquido) devido ao efeito Meissner. Retirado de http://www.britannica.com/EBchecked/media/152927/The-Meissner-effect-occurring-when-a-superconductor-cooled-by-liquid [17/08/14].	9
Figura 2.4 – Comportamento de um superconductor sob efeito de um fluxo magnético, em temperatura normal e sob arrefecimento. É um diamagneto perfeito em estado superconductor. Retirado de (Tinkham, 1996).	9
Figura 2.5 - Sistema de cabos SAT de 138 kV instalado em Nova York, EUA. Retirado de http://www.conectus.org/technology.html [02/09/14].	10
Figura 2.6 - Cabos Supercondutores. À direita protótipos de cabos monofásicos da empresa Nexans. À esquerda, um cabo superconductor trifásico. Retirado de http://www.conectus.org/technology.html [02/09/14].	10
Figura 2.7 - Aplicações da supercondutividade no ramo energético.	13
Figura 2.8 Exemplo de uma rede trifásica de Transporte e distribuição, representada através do respectivo diagrama unifilar. Adaptado de (Paiva, 2011).	14
Figura 2.9 - Topologias de rede existentes. a) Rede Radial; b) Rede Malhada; c) Rede Malhada com exploração Radial. Adaptado de (Paiva, 2011)	16
Figura 2.10 - Representação dos diversos tipos de curto-circuitos. Adaptado de (Vinod Gupta & Trivedi, 2010).	17
Figura 2.11- Classificação dos LCSs segundo as suas características e propriedades. Adaptado de (Pina, 2010).	22
Figura 2.12 - Estrutura, composição e topologia de um LCS indutivo. Retirado de (Pina, 2010).	24
Figura 2.13 - Condições de funcionamento de um LCS indutivo de blindagem magnética. Retirado de (Kosak, Janowski, Kozak, Wojtasiewicz, & Glowacki, 2006) e (Bäumel & Kaltenborn, 2011)	25
Figura 2.14 - Protótipos, em escala laboratorial de LCS indutivo de blindagem magnética.	26
Figura 2.15 - Comparação entre as correntes limitadas através de diferentes dispositivos limitadores. Adaptado de (Gor, Povh, Lerch, 2004).	28
Figura 2.16 - Comportamento errado do modelo matemático sugerido por (Majoroš, Janšák, Sello, & Zannella, 1997). Após saturação do fluxo ligado, a característica tende assintoticamente para valores constantes (linhas tracejadas). Retirado de (Pina, 2010).	31
Figura 2.17 - Modelo matemático baseado em (Pina, 2010) e de acordo com (2.2). Após saturação do fluxo ligado, a característica tende para um crescimento linear com a corrente, tal como se verifica na realidade.	31
Figura 2.18 - Modelo de indutâncias variáveis. À direita, o interior do bloco encapsulado pode ser analisado com mais detalhe. Adaptado de (MathWorks Documentation Center, 2014).	34
Figura 2.19 - Bloco de indutância variável disponível na biblioteca Simscape do Matlab. Evidencia-se a necessidade de haver blocos responsáveis pela conversão do tipo de sinal de cada biblioteca.	34
Figura 2.20 - Princípio de funcionamento do modelos de indutâncias variáveis. Adaptado de (SimPowerSystems User's Guide, 2003).	35
Figura 2.21 - Modelo de indutâncias saturáveis.	36
Figura 3.1 - Gráficos extraídos do ficheiro implementado para a análise do ciclo de histerese máximo do limitador	38
Figura 3.2 - Modelo de indutâncias saturáveis.	39
Figura 3.3 - Interligação entre o Simulink e Excel.	40
Figura 3.4 - Funcionamento geral do modelo computacional desenvolvido.	40
Figura 3.5 - Interface final do bloco LCSi. É possível verificar as alterações do ciclo de histerese máximo de acordo com diferentes parâmetros introduzidos.	41
Figura 3.6 - Janela de configuração de parâmetros do bloco LCSi.	41
Figura 3.7 - Arquitetura interior do LCSi com respetiva divisão de blocos.	42
Figura 3.8 - Arquitetura interior do bloco de limitação da corrente	43
Figura 3.9 - Arquitetura interior do bloco da fonte de corrente controlada e respetivas situações de funcionamento	44

Figura 3.10 – Bloco LCSi em condição normal de funcionamento. Há um CC à fonte de corrente, situação análoga ao desaparecimento do respetivo bloco.	45
Figura 3.11 - Arquitetura interior do bloco lógico de comutação.	45
Figura 3.12 - Condições lógicas do bloco lógico de comutação.	47
Figura 3.13 - Arquitetura final e completa do bloco LCSi.	48
Figura 3.14 - Exemplo de caso suscetível a erros de <i>loop</i> algébrico.	49
Figura 4.1 - Circuito monofásico de ensaio do LCSi.	52
Figura 4.2 - Modelo computacional do LCSi inserido em circuito monofásico.	53
Figura 4.3 – Evolução temporal da corrente e do fluxo ligado.	53
Figura 4.4 - Evolução do ponto de operação do LCSi no plano $i\psi$.	54
Figura 4.5 - Evolução temporal da corrente prospetiva e limitada do circuito monofásico.	54
Figura 4.6 - Resultados da simulação, com o Flux2D, para uma impedância de rede resistiva e uma falha em $t = 20$ ms. Retirado de (Pina, 2010).	55
Figura 4.7 - Resultados da simulação, com bloco LCSi, em Simulink, para uma impedância de rede resistiva e uma falha em $t = 20$ ms.	55
Figura 4.8 - Evolução temporal da corrente e fluxo ligado do dispositivo LCSi para uma impedância de rede resistiva e uma falha em $t = 20$ ms.	56
Figura 4.9 - Resultados da simulação, com o Flux2D, para uma impedância de rede resistiva e duas falhas de 19 ms, uma aplicada em $t = 20$ ms, seguida de outra falha em $t = 74$ ms. Retirado de (Pina, 2010).	57
Figura 4.10 - Resultados da simulação, com bloco LCSi, em Simulink, para uma impedância de rede resistiva e duas falhas de 19 ms, uma aplicada em $t = 20$ ms, seguida de outra falha em $t = 74$ ms.	57
Figura 4.11 - Evolução temporal da corrente e fluxo ligado do dispositivo LCSi, para uma impedância de rede resistiva e duas falhas de 19 ms, uma aplicada em $t = 20$ ms, seguida de outra falha em $t = 74$ ms.	58
Figura 4.12 - Resultados da simulação, com o Flux2D, para uma impedância de rede representada por um RLC, com falha no instante $t = 61$ ms. Retirado de (Pina, 2010).	59
Figura 4.13 - Resultados da simulação, com bloco LCSi, em Simulink, para uma impedância de rede representada por um RLC e falhas no instante $t = 61$ ms.	59
Figura 4.14 - Evolução temporal da corrente e fluxo ligado do dispositivo LCSi, para uma impedância de rede representada por um RLC e falha no instante $t=61$ ms.	60
Figura 4.15 – Circuito trifásico de ensaio do LCSi.	61
Figura 4.16 - Modelo computacional do LCSi trifásico inserido em circuito trifásico.	62
Figura 4.17 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo fase-fase.	63
Figura 4.18 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospetivas sob o efeito de um CC do tipo fase-fase.	63
Figura 4.19 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo fase-terra.	64
Figura 4.20 - Evolução temporal da correntes limitada e prospetiva sob o efeito de um CC do tipo fase-terra.	64
Figura 4.21 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospetivas sob o efeito de um CC do tipo fase-fase-terra.	65
Figura 4.22 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo fase-fase-terra.	66
Figura 4.23 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo trifásico, sem ligação à terra.	67
Figura 4.24 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospetivas sob o efeito de um CC do tipo trifásico, sem ligação à terra.	67
Figura 4.25 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospetivas sob o efeito de um CC do tipo trifásico, com ligação à terra.	68
Figura 4.26 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo trifásico, com ligação à terra.	69

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Comparação entre diversos limitadores de corrente de falha. Adaptado de (Bäumli & Kaltenborn, 2011).	27
Tabela 3.1 - Parâmetros construtivos do ciclo máximo de Histerese do limitador	38
Tabela 7.1 - Tabela desenvolvida em Excel para construção do ciclo de Histerese máximo.	79
Tabela 7.2 - Tabela de verdade do bloco "Combinatorial Logic"	81

Simbologia

Símbolo	Descrição	Unidades
A_f	Função auxiliar	-
a	Parâmetro construtivo de um LCSi	-
B	Densidade de fluxo magnético (ou campo de indução magnética)	T
B_f	Função auxiliar	-
b	Parâmetro construtivo de um LCSi	-
C	Capacidade de um condensador	F
c	Parâmetro construtivo de um LCSi	-
d	Parâmetro construtivo de um LCSi	-
f (i_{linha})	Função auxiliar	-
H	Campo magnético	$A \cdot m^{-1}$
H_0	Campo magnético aplicado	$A \cdot m^{-1}$
H_C	Campo magnético crítico	$A \cdot m^{-1}$
I', i'	Corrente limitada após a passagem no bloco de limitação	A
I_{CC}	Corrente de curto-circuito da rede	A
I_{crit}	Corrente crítica de ativação de um SAT	A
I_{SAT}	Corrente máxima suportada pelo SAT	A
i_A	Corrente oriunda da fase A em circuito trifásico	A
i_B	Corrente oriunda da fase B em circuito trifásico	A
i_C	Corrente oriunda da fase C em circuito trifásico	A
i_{linha}	Corrente da linha de um circuito monofásico	A
J	Densidade de corrente elétrica	$A \cdot m^{-2}$
J_C	Densidade de corrente elétrica crítica	$A \cdot m^{-2}$
L	Indutância de uma bobina	H
L_{comb}	Indutância combinada que simula a indutância do gerador e da linha simultaneamente	H
L	Sinal lógico do bloco lógico de comutação	-
M	Vetor magnetização	$A \cdot m^{-1}$
N	Número de espiras do enrolamento	-
R	Resistência elétrica	Ω
R_{comb}	Resistência combinada que simula a resistência do gerador e da linha simultaneamente	Ω
R_{carga}	Resistência de carga	Ω
T	Temperatura	K
T_C	Temperatura crítica	K

t	Instante	s
t_{CC}	Instante de ativação do curto-circuito	s
t_k	Instante presente	-
t_{k-1}	Instante passado	-
U_{rede}	Tensão aos terminais da fonte de alimentação	V
U_A	Tensão aos terminais da fonte de alimentação na fase A do circuito trifásico	V
U_B	Tensão aos terminais da fonte de alimentação na fase B do circuito trifásico	V
U_C	Tensão aos terminais da fonte de alimentação na fase C do circuito trifásico	V
U_{Cef}	Tensão composta eficaz de uma fonte de alimentação trifásica	Vef
U_{pico}	Amplitude máxima de uma tensão sinusoidal	V
u	Tensão variável nos terminais de um dispositivo	V
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$)	H . m ⁻¹
ρ	Resistividade elétrica	$\Omega \cdot m$
σ	Condutividade elétrica	S . m ⁻¹
ψ	Fluxo ligado	Wb
$\psi_0(i_{linha})$	Curva que descreve a característica magnética de um núcleo de ferro	Wb
ψ_{LCS}	Fluxo ligado com o primário de um limitador de corrente supercondutor	Wb
λ_a	Fluxo ligado associado ao ramo ascendente	Wb
λ_d	Fluxo ligado associado ao ramo descendente	Wb
δ	Erro de tolerância do bloco lógico de comutação	-

Notações

2G	Fita supercondutora de segunda geração
ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
AT	Alta Tensão (entre 45 kV e 110 kV)
Bi-2212	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$
Bi-2223	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$
BT	Baixa Tensão (abaixo de 1 kV)
CC	Curto-Circuito
DC	<i>Direct Current</i>
FCL	Fault Current Limiter
Flux2D	Programa de simulação através de elementos finitos
iSFCL	<i>Inductive Superconducting Fault Current Limiter</i>
LCSi	Limitador de Corrente Indutivo de Blindagem Magnética e com Topologia em Núcleo Fechado
LCS	Limitador de Corrente de Falha Supercondutor
MAT	Muito Alta Tensão (acima de 110 kV)
MT	Média Tensão (entre 1 kV e 45 kV)
SAT	Supercondutor de Alta Temperatura
SBT	Supercondutor de Baixa Temperatura
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SFCL	<i>Superconducting Fault Current Limiter</i>
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
YBCO	Supercondutores de composição química $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, sendo δ o conteúdo de oxigénio.

Capítulo



Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

A principal função de um sistema elétrico de energia é o fornecimento de energia aos consumidores com o menor custo possível, sem violar os valores contratuais da tensão e frequência e sem que os componentes do sistema ultrapassem as suas capacidades físicas. Assim, o conhecimento do comportamento de um sistema elétrico de energia em condições anormais de funcionamento é de grande importância em qualquer das fases de estudo do sistema: planeamento, projeto ou exploração.

Como exemplo de uma condição anormal, pode considerar-se um defeito no isolamento de um componente do sistema. Este defeito pode constituir um trajeto de baixa (ou mesmo nula) impedância através do qual se estabelece uma corrente de valor elevado, denominada de curto-circuito (CC). Como consequência, resulta uma corrente elétrica que pode atingir valores muito elevados, dependendo do tipo de curto-circuito. A esta corrente dá-se o nome de corrente de curto-circuito ou corrente de falha (Santos, 2009).

O constante desenvolvimento da geração de energia elétrica e da interligação das redes energéticas pode conduzir a uma maior propensão para haver correntes de falha (Schimdt, 2006).

Com o subsequente desenvolvimento das redes de energia elétrica, as correntes de falha atingiram também um novo nível, o qual poderia ultrapassar os valores nominais de operação dos disjuntores. De qualquer forma, é necessário que o equipamento da rede consiga suportar a corrente de falha até que os disjuntores sejam ativados. Para contornar este tipo de situação, e saber lidar com os efeitos produzidos pelas falhas, têm sido desenvolvidos e introduzidos novos dispositivos nas redes nos últimos anos (Cai et al., 2010). A construção de novas subestações, construção de barramentos, ou outras mais atrativas financeiramente, como fusíveis, bobinas de núcleo de ar e transformadores de alta impedância têm sido algumas das alternativas adotadas, que no entanto, apresentam alguns problemas associados, nomeadamente com a redução da estabilidade dos sistemas, aumento das perdas de energia, e consequente diminuição da flexibilidade operacional e menor confiabilidade.

Neste contexto, surgem então os limitadores de corrente de falha (FCL, do inglês “Fault Current Limiter”), que não são mais do que um equipamento de potência que visa a supressão da corrente de falha, gerando uma impedância que limite as correntes de curto-circuito (Darie e Darie, 2007).

Os limitadores de corrente de falha supercondutores (LCS ou SFCLs, do inglês “Superconductor Fault Current Limiter”) surgiram como uma alternativa de limitação de correntes de curto-circuito para níveis mais baixos, melhorando a fiabilidade e a estabilidade do sistema de energia, reduzindo assim a corrente de falha. Os LCSs têm impedância zero sob condições normais e grande impedância em condições de falha (Aly e Mohamed, 2012).

Existem vários tipos de limitadores de corrente supercondutores, entre eles limitadores do tipo resistivo, híbrido e indutivo. Cada tipo de LCS tem os seus prós e contras e pode utilizar materiais supercondutores de alta temperatura (SAT) ou supercondutores de baixa temperatura (SBT).

O limitador supercondutor do tipo resistivo consiste num supercondutor colocado em série com o circuito que se pretende proteger. A ligação em série permite que haja limitação a partir do momento em que a densidade de corrente presente no material supercondutor apresente valores capazes de destruir o seu estado supercondutor, tornando-o resistivo, possibilitando assim a limitação da corrente (Arsénio, 2012).

O limitador do tipo indutivo baseia-se na presença de um núcleo ferromagnético, composto por um enrolamento primário de cobre que se encontra ligado magneticamente com um enrolamento secundário em CC, de material supercondutor. De um modo geral é um dispositivo passivo, exige apenas manutenção e arrefecimento criogénico e provoca uma queda de tensão desprezável em condições normais de operação (Samah e Abdullah, 2010).

Vista a importância destes dispositivos, realça-se o facto da necessidade de haver métodos de simulação que verifiquem o comportamento dos mesmos sob o efeito de falhas, em diversos tipos de redes, com distintas cargas e fontes. Atualmente, já existem programas específicos, como o Flux2D, que analisam tais comportamentos. No entanto, apresentam alguns aspetos desfavoráveis, como é o caso do elevado tempo de execução das respetivas simulações. Neste âmbito, surge a necessidade de se desenvolverem novos modelos computacionais que visem a análise e simulação destes dispositivos de uma outra perspetiva, nomeadamente uma maior versatilidade e rapidez na execução dos ensaios computacionais.

1.2 Objetivos

De modo geral, pretendeu-se construir um modelo computacional, em Simulink, adequado à simulação de limitadores de corrente supercondutores do tipo indutivo, de blindagem magnética, que possa ser utilizado na simulação de redes com distintas cargas e fontes.

Os objetivos específicos para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- Desenvolvimento de um modelo computacional;
- Simulação do modelo computacional, de modo a verificar o comportamento do mesmo;
- Análise e descrição dos ensaios computacionais efetuados;
- Avaliação do desempenho do modelo desenvolvido.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação encontra-se subdividida em **5 capítulos** seguidamente apresentados:

No Capítulo 1 é feita uma breve introdução ao tema proposto, assim como são abordadas as motivações e os objetivos para o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 2 efetuou-se uma revisão bibliográfica relativa ao tema abordando-se assuntos relacionados com a supercondutividade, a importância das redes energéticas e respetivas falhas que podem ocorrer nas mesmas. Abordou-se os principais tipos de Limitadores de corrente, assim como a modelização de um limitador específico (LCS). Por último apresentou-se a aplicação Matlab/Simulink, indispensável para a realização desta dissertação.

O **capítulo 3** diz respeito à apresentação da plataforma de simulação onde é demonstrada a implementação do modelo computacional do LCS indutivo.

No **capítulo 4** encontram-se os resultados das simulações do LCS indutivo inserido num circuito monofásico, assim como a verificação da fiabilidade do modelo desenvolvido. Posteriormente, apresenta-se a inserção do modelo a um circuito trifásico sob o efeito de distintos tipos de falhas.

No **capítulo 5** encontram-se descritas as conclusões e os trabalhos futuros onde de forma breve é apresentado o trabalho realizado e algumas considerações que poderão ser relevantes para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

1.4 Contribuições Originais

A contribuição original desta dissertação consiste principalmente no desenvolvimento e avaliação de um modelo computacional de limitadores de corrente indutivos, de blindagem magnética. O modelo tem por base o ciclo de histerese máximo, ou seja, a relação entre a característica magnética do núcleo de ferro e a respetiva corrente do enrolamento primário. A sua implementação permitiu avaliar o comportamento do dispositivo em redes com distintas cargas e fontes.

Em geral este trabalho difere de outros sistemas de simulação existentes devido ao facto de permitir o fácil ajuste de parâmetros sem o manuseio de equações matemáticas ou códigos iterativos, e também possibilitando o teste de diferentes núcleos de ferro, materiais supercondutores, espiras do primário, ou mesmo redes de diferentes características.

Capítulo 

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos mais importantes para a elaboração e desenvolvimento deste trabalho. Numa perspetiva mais específica, o capítulo encontra-se dividido em cinco secções:

- Supercondutividade;
- Sistema de Energia Elétrica;
- Limitadores de Corrente de Curto-Circuito;
- Modelização de Limitadores de Corrente Supercondutores;
- A aplicação Matlab/Simulink.

2.2 Supercondutividade

2.2.1 Introdução Histórica

Em 1911, Heike Kamerlingh Onnes (Figura 2.1), professor na Universidade de Leiden (Holanda), observou pela primeira vez um inesperado fenômeno ao qual passaria a designar de supercondutividade. Em 1908, Onnes tinha conseguido a liquefação do Hélio, também pela primeira vez, baseado no princípio de Linde, onde o Hélio gasoso era submetido a sucessivos ciclos de arrefecimento, usando, entre outras substâncias ar líquido, obtendo assim temperaturas inferiores a 4 K (Costa e Pavão, 2012). O trabalho experimental de Onnes no Hélio permitiu o estudo alargado das propriedades dos materiais a muito baixas temperaturas, e foi no seu seguimento que a história da supercondutividade começou.

Durante as suas investigações, foram utilizados vários metais, que no entanto, apresentaram alguma resistividade residual, o que Onnes interpretou como sendo a presença de impurezas. Foi com esta variação de metais nas suas investigações que descobriu que o mercúrio, por ser mais fácil de obter com elevado grau de pureza, podia transportar corrente elétrica sem nenhuma resistência aparente. Onnes e os seus colaboradores chegaram à conclusão que este comportamento não estava confinado somente ao mercúrio, uma vez que diminuições súbitas da resistência também foram verificadas em amostras de estanho e chumbo.

A partir de então, o termo supercondutor tem sido utilizado para denotar todos os materiais que, abaixo de uma certa temperatura crítica, T_C , perdem a resistência à passagem de corrente elétrica, além de apresentar outras propriedades (Branício, 2001). Em 1913 recebeu o Prémio Nobel da Física pelo seu trabalho no estudo dos materiais a baixas temperaturas e pela liquefação do hélio.

Com a progressiva continuação do estudo deste novo estado da matéria, Onnes e os seus colaboradores descobriram, em 1914, que mesmo a temperaturas abaixo de T_C o material perdia o seu estado supercondutor, recuperando a sua resistência normal quando sujeito a um campo magnético. Esta transição ocorria num valor de campo magnético bem definido, à semelhança do que acontecia com a temperatura, levando assim a definir um valor de campo crítico H_C . O mesmo acontecia a partir de um valor de densidade de corrente J , estabelecendo-se também um valor crítico J_C (Silva 2013).

Desta forma, constata-se a existência de três propriedades físicas que condicionam a supercondutividade: a temperatura, o campo magnético (ou a densidade de fluxo) e a densidade de corrente 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 (Pina, 2010). Esse diagrama pode ser observado na Figura 2.2.

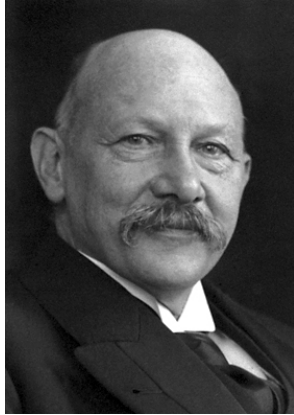


Figura 2.1 - Heike Kamerlingh Onnes, Prémio Nobel da Física 1913. Retirado de http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes-bio.html [14/07/2014].

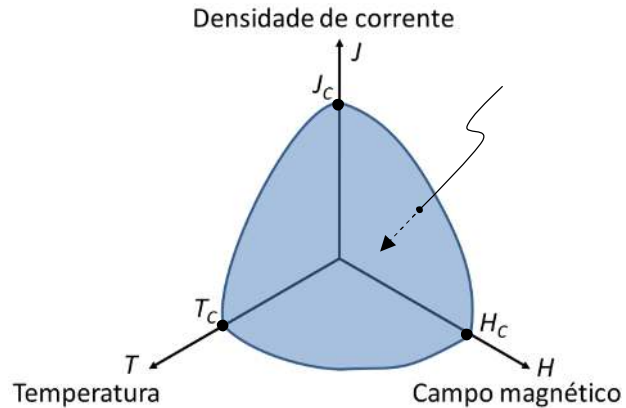


Figura 2.2 - Diagrama T-J-H que caracteriza os limites de operação de um material supercondutor. Adaptado de (Pina, 2010).

2.2.2 Efeitos Macroscópicos

Durante a investigação da supercondutividade, observaram-se propriedades macroscópicas independentes do material em si. Nesta secção será feita uma breve abordagem a estes fenómenos, nomeadamente à resistividade nula e ao efeito de Meissner, visto que a grande maioria das aplicações tira partido de pelo menos uma destas propriedades.

- **Resistividade Nula**

A primeira característica que esteve na base da descoberta da supercondutividade foi a resistividade nula ($\rho = 0$) ou condutividade perfeita ($\sigma = \infty$), abaixo de uma determinada temperatura, previamente denominada T_c .

Um material supercondutor, no caso ideal, apresenta resistividade nula, significando isto que não existe dissipação de potência e, por conseguinte, não existem perdas. Contudo esta propriedade apenas se verifica quando se trata de uma corrente exclusivamente com componente DC (do inglês *Direct Current*). No caso em que a corrente tem componente AC (*Alternating Current*), o material apresenta, ainda que reduzida, alguma resistividade (Stavrev, 2002).

Do ponto de vista da aplicação industrial, a resistividade nula é a característica mais relevante deste tipo de materiais. Um exemplo da aplicação deste fenómeno é a sua utilização nos cabos supercondutores, que na ausência de resistividade suportam altas densidades de corrente (Pina, 2010).

- **Efeito Meissner**

Em 1933 Meissner e Ochsenfeld observaram que, ao arrefecer alguns materiais até uma temperatura crítica, T_C , sob a presença de um campo magnético aplicado, H_0 , apresentavam a propriedade de expulsar totalmente as linhas de campo do seu interior, produzindo uma blindagem ao fluxo magnético. A esta propriedade foi denominada de Efeito Meissner (Silva, 2010). Este efeito pode igualmente ser denominado de diamagnetismo perfeito pois o material, no estado supercondutor, comporta-se como um diamagneto perfeito, isto é, é tão forte que faz com que os magnetos levitem efetivamente sob influência de um material supercondutor, comprovando assim o dito comportamento diamagnético perfeito (Catalão, 2013).

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

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

Num diamagneto perfeito tem-se que $M = -H$, pelo que $B = 0$. Assim, verifica-se que não existe densidade de fluxo magnético no interior de um material que apresente um comportamento diamagnético perfeito (Figura 2.4).

2.2.3 Aplicações da Supercondutividade

Devido às suas peculiares propriedades, os materiais supercondutores, têm vindo a ser adotados em várias aplicações tecnológicas nas mais variadas áreas tais como o ramo energético, transportes, medicina e investigação científica.

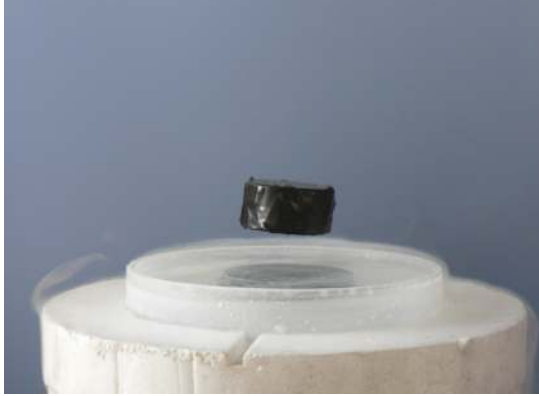


Figura 2.3 – Propriedade macroscópica dos materiais supercondutores. Na imagem observa-se um magneto a levitar sobre um material supercondutor (arrefecido através de azoto líquido) devido ao efeito Meissner. Retirado de <http://www.britannica.com/EBchecked/media/152927/The-Meissner-effect-occurring-when-a-superconductor-cooled-by-liquid> [17/08/14].

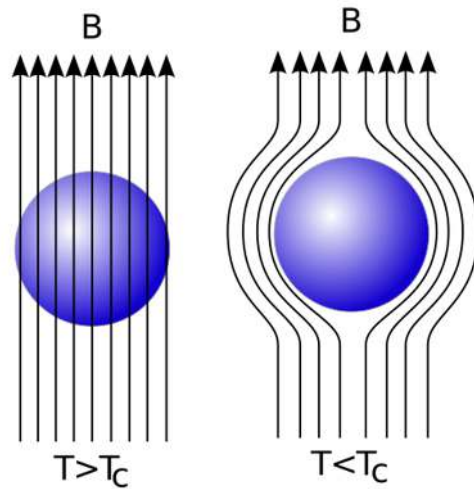


Figura 2.4 – Comportamento de um supercondutor sob efeito de um fluxo magnético, em temperatura normal e sob arrefecimento. É um diamagneto perfeito em estado supercondutor. Retirado de (Tinkham, 1996).

Estas aplicações estão relacionadas basicamente com algumas das diversas vantagens que os supercondutores possuem sobre os condutores normais, entre elas (CCAS, 2009):

- Resistência nula para DC e desprezável para AC;
- Elevada densidade de corrente;
- Criação de mecanismos com rendimentos superiores, devido à condução de eletricidade sem perda de energia;
- Não dissipam calor, implicando a redução expressiva de massa e volume dos dispositivos elétricos;

A grande maioria dessas aplicações baseiam-se na resistividade nula, que em alguns dispositivos elétricos é sinónimo de eficiência máxima, como é o caso dos geradores de eletricidade, dos transformadores e dos cabos de transmissão, que não têm perda de energia por efeito Joule. Por outro lado, os aparelhos de ressonância magnética, assim como os comboios flutuantes (Maglev, do inglês “Magnetic Levitation”), são exemplos de casos que utilizam a capacidade dos materiais supercondutores em gerar elevados campos magnéticos, que podem ser obtidos eficazmente através de magnetos supercondutores.

A seguir, serão abordadas algumas das principais aplicações da supercondutividade focadas no ramo energético (CCAS, 2009).

- **Cabos de Energia**

Atualmente, as linhas energéticas e os cabos convencionais estão a ser utilizados mais próximos da sua capacidade máxima e limites térmicos. A utilização de cabos elétricos supercondutores oferecem uma nova e importante ferramenta para impulsionar a capacidade da rede e aumentar a sua confiabilidade.

Os designs avançados dos cabos SAT permitem fluxos de energia controláveis e a completa supressão de perdas do campo eletromagnético. Os cabos de potência SAT transmitem consideravelmente mais energia do que os cabos de cobre convencionais, de secção equivalente. Permitem deste modo, uma utilização mais eficaz da rede, atualmente limitada, assim como também uma redução de custos, e em alguns casos, também proporcionam uma limitação de correntes de falha.

Tem havido significativos progressos no que diz respeito à comercialização de cabos SAT. Nos EUA, o primeiro sistema transmissão de energia através desta tecnologia tem a capacidade de transmitir até 574 MW de eletricidade, o suficiente para aprovisionar 300 000 casas.

Alemanha, Coreia, Japão e China são alguns dos países que também têm demonstrado vários projetos com cabos SAT.



Figura 2.5 - Sistema de cabos SAT de 138 kV instalado em Nova York, EUA. Retirado de <http://www.conectus.org/technology.html> [02/09/14].



Figura 2.6 - Cabos Supercondutores. À direita protótipos de cabos monofásicos da empresa Nexans. À esquerda, um cabo supercondutor trifásico. Retirado de <http://www.conectus.org/technology.html> [02/09/14].

- **Limitadores de Corrente**

À medida que novos geradores são adicionados à rede, muitas redes locais enfrentam um crescente risco de sobretensões que geram falhas ou CC. Estes picos de energia são ocasionais e induzidos por condições climáticas adversas, tais como a queda de galhos de árvores, acidentes de trânsito, a interferência de animais e outros eventos aleatórios. À medida que os níveis de falha de corrente aumentam, surge um risco crescente de que tais falhas excedam a capacidade de proteção dos dispositivos energéticos (disjuntores, interruptores, transformadores de distribuição, entre outros), expondo as redes a danos muito mais dispendiosos.

A tecnologia dos SAT trouxe uma nova solução: a criação de limitadores de corrente e a capacidade de limitação de picos de corrente que, em ambos os casos, operam de forma passiva e automaticamente como válvulas de segurança de energia para garantir a confiabilidade do sistema quando os circuitos são interrompidos. Estes dispositivos têm a capacidade de detectar tais sobrecorrentes e reduzi-las a níveis seguros, alterando o seu estado de operação sem a necessidade de intervenção humana. Este é um dos temas principais desta dissertação, motivo pelo qual será abordado, com mais detalhe, adiante.

- **Armazenamento de Energia**

O armazenamento de energia em electromagnetos supercondutores (SMES, do inglês Superconducting Magnetic Energy Storage) é uma tecnologia baseada na capacidade dos supercondutores de transportar elevadas correntes DC sem perdas resistivas na presença de campos magnéticos significativos. Assim, a energia é armazenada no campo magnético do magneto ou da bobina supercondutora, percorridos por uma corrente DC que circula de forma persistente (Silva 2013). Os SMES são atualmente utilizados para suprimir curtas falhas de energia, garantir a estabilidade e qualidade da rede e fazer o acondicionamento de potência.

Os SMES são equipamentos de alto rendimento quando comparados com outros dispositivos de armazenamento de energia e são projetados com potência de saída adequada ao tipo de aplicação.

- **Transformadores**

O transporte seguro e eficaz da energia a partir dos geradores até aos consumidores, é um constante desafio. Em cada fase de transformação da tensão, a energia é perdida de inúmeras formas, como por exemplo, o calor. Além disso, enquanto existe um constante aumento da procura, o espaço para transformadores e subestações, especialmente em áreas urbanas densas, é extremamente limitado. Transformadores convencionais a óleo também representam um risco aumentado de ocorrência de incêndios e riscos ambientais.

Neste âmbito, surgem os transformadores SAT de alta eficiência e com desprezáveis perdas de energia associada. São visivelmente mais compactos devido ao facto de não perderem energia na forma de calor e são arrefecidos com azoto líquido, um elemento abundante na natureza, de forma segura e não prejudicial para o ambiente. Como benefício adicional, estes dispositivos oferecem a capacidade de operar em sobrecarga, até ao dobro do seu valor nominal, sem causar qualquer perda de vida útil e atendendo aos níveis de carga de pico sempre que necessário.

- **Máquinas Rotativas (Geradores e Motores)**

A utilização de geradores supercondutores tem particular interesse na indústria das energias renováveis, nomeadamente no ramo da energia eólica. A tecnologia SAT proporciona aos geradores um menor peso e volume do equipamento, sem reduzir a eficiência e fiabilidade do mesmo. Estima-se que uma unidade eólica SAT de 10 MW pese cerca de um terço de um gerador convencional de potência equivalente. Esta redução de peso, também permitiria um aumento do tamanho das pás, resultando numa maior potência de saída. Com o consequente aumento de energia inserido na rede elétrica, seria possível reduzir os custos associados às energias renováveis (CCAS, 2009).

A utilização de materiais SAT em motores, por sua vez, também traz vantagens significativas. Assim como os geradores, o peso dos motores supercondutores também é reduzido à mesma proporção, permanecendo com dimensões inferiores à metade dos convencionais. Apesar do sistema criogénico, os custos associados ao funcionamento e manutenção são relativamente baixos e os preços de ambos, motores SAT e convencionais, são equivalentes. A aplicação destes dispositivos é maioritariamente para a utilização de propulsão marítima devido ao alto rendimento aliado às reduzidas dimensões.



- a) Componente SAT de um limitador de corrente supercondutor, do tipo resistivo. Retirado de <http://www.conectus.org/technology.html> [02/09/14].
- b) Transformador supercondutor desenvolvido para aplicações ferroviárias. Apesar das reduzidas dimensões, o custo associado ao projeto impediu a sua utilização em escala comercial. Retirado de <http://www.conectus.org/technology.html> [02/09/14].



- c) Comparação entre máquinas rotativas convencionais e supercondutoras. Retirado de <http://amlsuperconductivity.com/applications/doe-approved-wind-turbine-solution/> e http://apps.shareholder.com/sec/viewerContent.aspx?companyId=AMSC&docid=4482230#D10K_HTM_TOC [02/09/14].

Figura 2.7 - Aplicações da supercondutividade no ramo energético.

2.3 Sistema de Energia Elétrica

2.3.1 Introdução

A estrutura de um Sistema de Energia Elétrica (SEE) pode ser dividida em produção, transporte e distribuição. A energia produzida pelas centrais elétricas é entregue à rede de transporte, em muito alta tensão (MAT). Através de transformadores, a energia flui para as redes de distribuição em alta (AT), média (MT) e baixa tensão (BT), que a distribuem pelos consumidores. As instalações de baixa potência de natureza descentralizada ou local, como por exemplo, mini-hídrica, eólica, solar fotovoltaica ou cogeração, ligam-se às redes de distribuição. A gestão global do sistema de energia elétrica é assegurada por sofisticados sistemas de supervisão, controlo e proteção em tempo real, apoiados em potentes computadores e telecomunicações avançadas.

A energia elétrica é produzida, transportada e distribuída em sistemas elétricos trifásicos (exceto nos troços finais em baixa tensão, que podem ser monofásicos ou trifásicos). Contudo, o SEE é habitualmente representado por um esquema ou diagrama unifilar, no qual se utiliza apenas um traço para representar os respetivos elementos (Paiva, 2011). Como se pode verificar observando a Figura 2.8, faz-se o uso de símbolos normalizados para representar geradores, transformadores, barramentos, linhas e cargas.

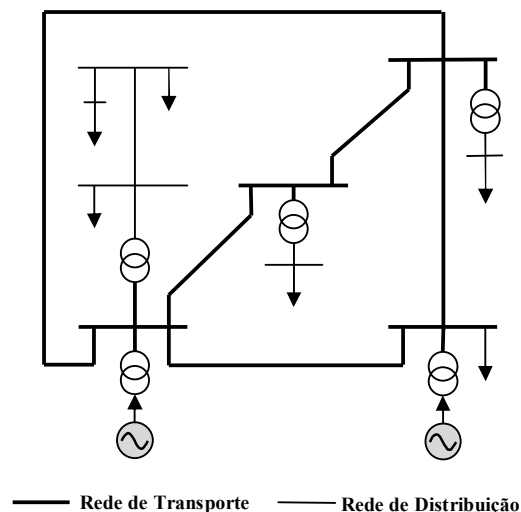


Figura 2.8 Exemplo de uma rede trifásica de Transporte e distribuição, representada através do respectivo diagrama unifilar. Adaptado de (Paiva, 2011).

2.3.2 Níveis de Tensão

A tensão nominal de uma rede elétrica pode assumir diferentes dimensões. Segundo o decreto de lei nº 297/194 de 26 de Dezembro a tensão nominal diz respeito à tensão pela qual a rede de distribuição é designada e em relação à qual são referidas as suas características (Decreto de Lei nº 297/194). Desta forma, podem distinguir-se quatro classes de tensão: a baixa, média, alta e muito alta tensão (Paiva, 2011):

- **Baixa Tensão (BT)**, abaixo de 1000 V: Como valores típicos, indicam-se 400/230 V (trifásica, fase-fase e fase-neutro, respetivamente) na Europa e 240/120 V (monofásica) nos EUA.
- **Média Tensão (MT)**, entre 1 e 45 kV: Nas redes de distribuição urbana ou rural usam-se, em Portugal, 10, 15 e 30 kV (em outros países europeus é também comum a tensão de 20 kV); em redes industriais usa-se ainda a tensão de 6 kV.
- **Alta Tensão (AT)**, entre 45 e 110 kV: Neste nível, utiliza-se, em Portugal, a tensão de 60 kV, por vezes chamada de repartição ou grande distribuição.
- **Muito Alta Tensão (MAT)**, acima de 110 kV: Este nível de tensão é usado nas redes de transporte, sendo usados em Portugal 150, 220 e 400 kV (os dois últimos níveis são correntes em toda a Europa). Nos Estados Unidos usam-se 230, 345, 500 765 kV.

2.3.3 Topologias de Rede

A topologia de uma rede de distribuição elétrica difere de país para país e é definida por um conjunto de parâmetros, que são estabelecidos com base em estudos técnicos e económicos. Estes estudos advêm da constante suscetibilidade a avarias a que os elementos das redes estão naturalmente expostos, o que pode acarretar a interrupções no fornecimento de energia. Esta interrupção pode consequentemente implicar um aumento dos custos de investimento. Para coibir os elevados custos devem ser adotadas medidas que visem um melhoramento das redes elétricas face às adversidades que podem surgir diariamente, que segundo (Puret, 1992), a solução adotada deverá cumprir os seguintes objetivos:

- Garantir a **segurança** de pessoas e bens;
- Garantir níveis de **qualidade de serviço** predefinidos;
- Atingir os níveis de **rentabilidade económica** desejados;

Complementarmente deverá ainda satisfazer os seguintes requisitos:

- **Adequar-se** à densidade de clientes/consumo (MVA/km²);
- **Adequar-se** às características geográficas e às restrições impostas pela construção humana ou envolvente natural;
- **Adequar-se** às condições climáticas.

Deste modo, as estruturas topológicas usuais são (Paiva, 2011):

- **Rede Radial** – Uma rede desta topologia é constituída, a partir de um ponto de alimentação, por linhas que se vão ramificando sem jamais se encontrarem num ponto comum. É um tipo de estrutura com baixos custos associados, mas também de pouca fiabilidade, sendo tipicamente usada na distribuição em zonas rurais.
- **Rede Malhada** – As linhas desta topologia são ligadas de forma a constituírem malhas fechadas, permitindo a todos os consumidores uma alimentação de energia através de várias fontes. Os geradores estão ligados de forma que o trânsito de energia até aos consumidores se possa fazer por vários percursos. Todas as linhas devem estar dimensionadas para transmitir a potência necessária em caso de avaria de outra linha. Estas redes asseguram uma maior fiabilidade, no entanto, com um custo mais elevado. Esta topologia usa-se obrigatoriamente para as redes de transporte.
- **Rede Malhada (em anel) com Exploração Radial** – Esta topologia resulta da junção entre os dois tipos referidos anteriormente. Nas redes de distribuição em áreas urbanas com elevada densidade de carga, pode usar-se uma estrutura malhada (em anel) com exploração radial. Utilizam-se interruptores, normalmente abertos, que podem ser fechados em caso de indisponibilidade de um troço de linha, de forma a assegurar a continuidade do serviço.

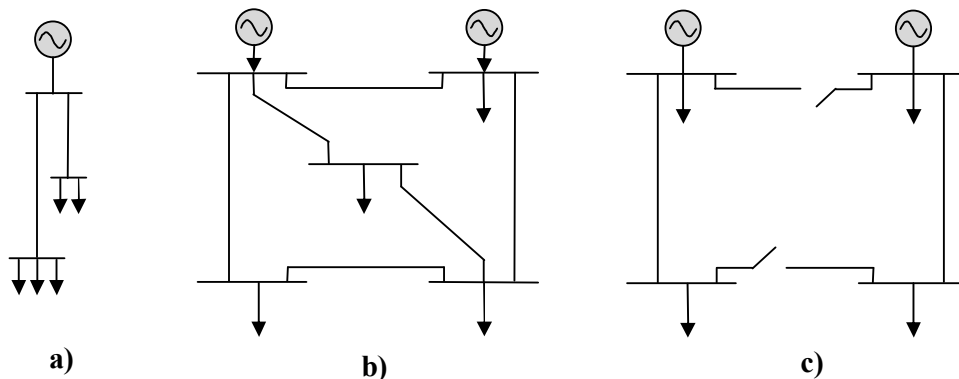


Figura 2.9 - Topologias de rede existentes. a)Rede Radial; b)Rede Malhada; c)Rede Malhada com exploração Radial. Adaptado de (Paiva, 2011) .

2.3.4 Falhas na Rede

Existem diversos fatores que podem desencadear falhas nas redes e conseqüentemente gerar interrupções no fornecimento de energia. Uma brusca diminuição da impedância da rede é o suficiente para gerar uma corrente de curto-circuito (CC). Trata-se de uma situação anormal que requer ação imediata, face aos danos que dela podem resultar.

Do ponto de vista dos consumidores, as conseqüências de uma falha dependem essencialmente do seu tipo. De acordo com (Puret, 1992) uma falha pode ser:

- De duração momentânea ou permanente;
- Monofásica ou trifásica, dependendo da sua causa e topologia.

Uma falha momentânea constitui uma breve interrupção, na ordem dos 100 ms, normalmente associada ao tempo de reativação automática dos sistemas de proteção da linha. Por outro lado, uma falha permanente pode durar minutos ou até mesmo várias horas, requerendo intervenção humana. Relativamente aos tipos de falhas de um sistema trifásico, é possível verificar na Figura 2.10 as possibilidades de CC entre as fases e a terra. O nível alcançado pelas correntes de falha depende basicamente do tipo de CC ocorrido e do tipo de ligação interna do gerador trifásico. Segundo (Metz-Noblat, Dumas & Poulain, 2005) considera-se geralmente que o CC do tipo trifásico puro, sem ligação à terra, provoca as correntes mais elevadas de falha.

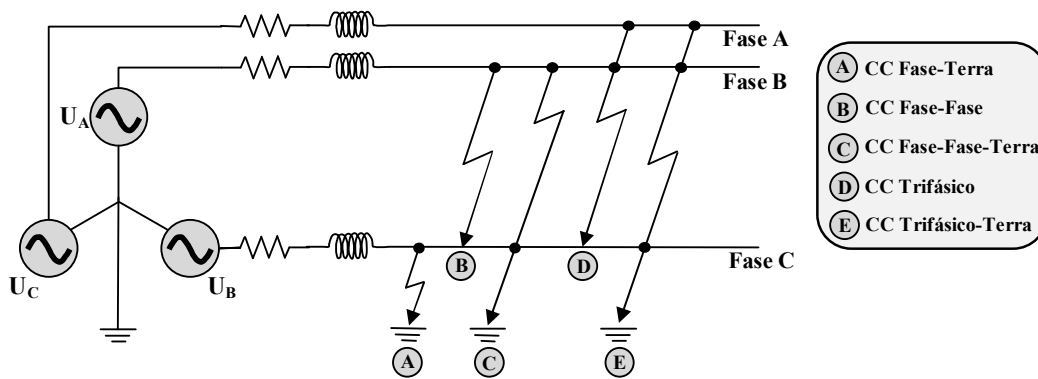


Figura 2.10 - Representação dos diversos tipos de curto-circuitos. Adaptado de (Vinod Gupta & Trivedi, 2010).

Os tipos de falha dependem também essencialmente dos tipos de rede (aéreas ou subterrâneas). As redes aéreas são consideravelmente mais suscetíveis a falhas do que as subterrâneas. Devido a este facto, constata-se que em redes aéreas, as falhas são principalmente momentâneas (80% a 90%) e monofásicas (75%). Normalmente são causadas por tempestades, a uma linha caída no chão ou um curto-circuito através de um isolador. Em redes subterrâneas, as falhas ocorrem principalmente de forma permanente (100%) e entre fases (90%), pois são muitas vezes o resultado de danos causados nos cabos (Puret, 1992).

Entre as principais causas que podem levar à ocorrência de uma falha incluem-se:

- Condições climáticas (tempestades, descargas atmosféricas, neve, vento);
- Colisão de corpos estranhos nas linhas (árvores, aves, entre outros)
- Incêndios;
- Atos de Vandalismo;

Face a estes problemas, o evoluir das tecnologias permitiu contornar esta situação, tendo sido desenvolvidos dispositivos capazes de atenuar os efeitos das falhas. Entre tais dispositivos, encontram-se os limitadores de corrente de CC, os quais serão abordados posteriormente.

2.4 Limitadores de Corrente de Curto-Circuito

A qualidade da energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores industriais sempre foi objeto de interesse. Porém, até há algum tempo atrás, a qualidade tinha a ver, sobretudo, com a continuidade dos serviços, ou seja, a principal preocupação era que não houvesse interrupções de energia, e a que as tensões e frequência fossem mantidas dentro de determinados limites considerados aceitáveis (Afonso e Martins, 2004).

Devido ao aumento da produção de geração distribuída, os sistemas de proteção da rede elétrica têm-se tornado cada vez mais complexos pois tem-se verificado um aumento das correntes de CC. Estas correntes podem desencadear amplitudes muito elevadas podendo assim danificar disjuntores, entre outros equipamentos da instalação. Deste modo, o uso de limitadores de corrente permite garantir a segurança das redes de nova geração (Vilhena, 2012). Devem possuir determinados requisitos, entre eles (Schmitt et al., 2003), (Pina, 2010):

- Uma impedância desprezável em condições normais de funcionamento;
- Uma impedância considerável para a limitação das correntes de CC;
- Uma rápida ação 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 proteção 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.

Os limitadores de corrente que utilizam condutores normais são denominados limitadores de corrente convencionais, sendo os principais divididos em duas categorias: as bobinas de núcleo de ar e os dispositivos pirotécnicos. Outro tipo de limitadores de corrente elétrica são os que usam materiais supercondutores e são denominados de limitadores de corrente supercondutores (LCS). Esses limitadores apresentam diversas vantagens face aos dispositivos convencionais, porém demandam a refrigeração criogénica (Junior, 2011).

Entre as **vantagens** dos LCSs enumeram-se as seguintes (Sousa, Polasek, Dias, & Junior, 2012):

- **Rápido tempo de atuação:** atuam com eficiência em menos de meio ciclo de corrente;
- **Grande capacidade de limitação:** limitadores supercondutores do tipo resistivo podem limitar a corrente de falha até 10 vezes, dependendo da configuração do circuito;
- **Não precisam ser substituídos:** quando submetido a uma corrente de falha o material supercondutor que compõe o limitador altera automaticamente o seu estado de funcionamento. Após a falha é apenas necessário um determinado tempo para que o material supercondutor retorne ao seu estado de resistividade nula, podendo assim, operar novamente;
- **Atuam sem auxílio de sensores:** alguns limitadores convencionais necessitam de sensores ou interruptores para que a falha possa ser detetada, e então ser acionada a limitação. Nos LCSs a limitação ocorre devido à propriedade intrínseca do material em alterar o valor de sua resistividade quando submetido a altas correntes;
- **São leves e menores** (especialmente no caso do tipo resistivo) quando comparados com os demais limitadores;
- **São "invisíveis" em condições normais:** Sob condições normais de operação de um sistema elétrico, estes dispositivos apresentam resistência desprezável e podem ser projetados para apresentarem indutância reduzida, evitando assim, quedas de tensão e dissipação de energia;
- **Falha segura:** mesmo se o limitador falhar, ele irá limitar a corrente. Um defeito no sistema criogénico ou qualquer outro problema durante um CC fará com que o material transite para o estado normal e apresente resistividade diferente de zero, limitando a corrente de curto-circuito.

No entanto, a principal desvantagem deste tipo de limitador é a necessidade de um constante sistema de arrefecimento criogénico. As características dos dispositivos de limitação supercondutores são importantes para avaliar a sua utilidade num sistema de energia. A utilização de materiais supercondutores em aplicações tecnológicas tem-se desenvolvido amplamente após a descoberta de materiais SAT. De acordo com a literatura consultada, o primeiro grande teste realizado com um limitador supercondutor ocorreu em 1996 quando a empresa Asea Brown Boveri (ABB) testou um limitador do tipo indutivo numa rede suíça de 10 kV, com potência de 1,2 MVA.

Tal como já mencionado anteriormente, existem atualmente diversos limitadores de corrente em utilização nas redes elétricas, com desempenho comprovado mas com algumas limitações identificadas (Arsénio, 2012). Posteriormente serão retratados os vários tipos de limitadores de corrente existentes.

2.4.1 Métodos Convencionais de Limitação de Corrente

Uma falha grave pode originar correntes várias vezes superiores aos valores nominais, podendo ocasionar a destruição dos equipamentos elétricos da rede de energia ou até equipamentos do consumidor. Além disso, o tempo de manutenção no qual a linha está fora de serviço pode significar enormes prejuízos nas indústrias locais. Desta forma, existe um esforço e necessidade constantes em manter a qualidade do serviço de distribuição de energia, a sua robustez e fiabilidade, motivados essencialmente pelos clientes da indústria e comércio (Silva, 2013).

Entre as soluções convencionais de limitação de corrente fazem parte (Kovalsky, Yuan, Tekletsadik, Keri, Bock, & Breuer, 2005):

- **Utilização de fusíveis de AT**, colocados em série com a linha, embora tenha o inconveniente de interromper a corrente de linha, sendo necessário substituí-los o mais rapidamente possível;
- **Limitadores de corrente pirotécnicos (limitadores I_s)**. É constituído por um fusível, em paralelo a um fio condutor de baixas perdas. A deteção do CC é realizada por um sensor capaz de interromper a passagem da corrente pelo condutor preferencial, forçando a mesma a passar pelo fusível, que provoca o fim do CC quando este se funde.
- **Utilização de transformadores de elevada impedância e bobinas de núcleo de ar** que permitem a limitação da corrente através da impedância, no entanto apresentam quedas de tensão e perdas em situação normal;
- **Ativação de vários disjuntores da rede**: quando ocorrem falhas, são atingidos mais do que um disjuntor, sendo necessária a reativação de cada um deles.
- **Divisão ou construção de novos barramentos**, reduzindo desta forma as fontes que podem contribuir para uma falha, e também, reduzindo as fontes que fornecem correntes de carga em situações normais;
- **A construção de novas subestações**, que apesar de ser a solução mais dispendiosa resolve a maior parte dos problemas;

Todas estas soluções, embora eficientes na limitação da corrente de CC, ou apresentam quedas de tensão em operações normais, ou necessitam de reparação após a atuação. São, portanto, equipamentos cuja operação afeta diretamente a qualidade do fornecimento de energia elétrica (Freitas, Henrique, Fardín, Orlando, & Simonetti, 2009). De forma a solucionar esta problemática, começaram-se a introduzir LCS, os quais demonstram serem mais vantajosos no processo de limitação da corrente.

2.4.2 Limitadores de Corrente Supercondutores

Os limitadores de corrente supercondutores oferecem uma forma de contornar as restrições dos sistemas convencionais, apresentando uma impedância ao sistema elétrico que varia de acordo com as condições de funcionamento. Este tipo de limitadores de corrente foram primeiramente estudados há mais de vinte anos (Darie & Darie, 2007). Entre os critérios de classificação destes dispositivos é possível citar a presença/ausência de núcleos ferromagnéticos, a forma como são aplicados às linhas de energia (em série ou por acoplamento magnético) e o facto de aproveitarem ou não a transição entre o estado supercondutor e o estado normal, designado por amortecimento (quench)(Figura 2.11). Além disso, os LCSs podem ser monofásicos ou trifásicos, havendo a possibilidade, no último caso, de serem constituídos por três módulos monofásicos ou terem um desenho trifásico puro (Pina, 2010).

De acordo com a literatura consultada, existem três modelos principais de limitadores supercondutores, incluindo os limitadores do tipo resistivo, indutivo e do tipo retificador. Não é objetivo deste trabalho aprofundar detalhadamente cada tipo de LCS, motivo pelo qual apenas serão abordados os principais e será dada ênfase ao modelo indutivo, que foi ferramenta base para o desenvolvimento desta dissertação.

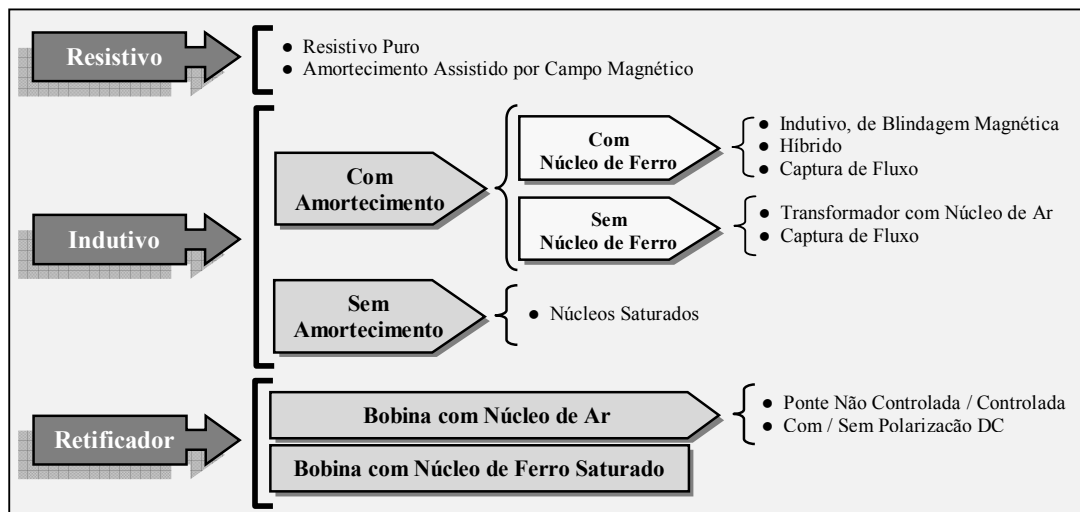


Figura 2.11- Classificação dos LCSs segundo as suas características e propriedades. Adaptado de (Pina, 2010).

2.4.3 Limitadores de Corrente Supercondutor do Tipo Resistivo

A principal característica que define o limiar de atuação do limitador supercondutor resistivo é a corrente crítica que o mesmo suporta, sendo a mesma obtida a partir da densidade de corrente crítica do supercondutor e da área da sua secção. Quando essa corrente crítica é atingida, o material perde a sua característica supercondutora, desenvolvendo uma resistência considerável, limitando assim a corrente de CC. O estado supercondutor é restabelecido após a eliminação da falha, quando o sistema criogénico regressa à temperatura normal de operação de 77 K (Zaneta Jr, Pereira, Campos, & Santos, 2007).

O LCS resistivo possui alta capacidade de limitação, baixa impedância e possuem tamanho reduzido quando comparados com outros tipos de limitadores (Sena, 2011). No entanto, este tipo de limitador é ligado em série com a linha, o que pode implicar numa interrupção de fornecimento normal de energia em caso de falha do respetivo sistema criogénico. Na Figura 2.7a encontra-se um exemplo de limitador de corrente do tipo resistivo.

2.4.4 Limitadores de Corrente Supercondutor do Tipo Indutivo

Devido à diversificada gama de LCSs indutivos, verificada na Figura 2.11, neste subcapítulo e nos posteriores, apenas será retratado o LCS indutivo de blindagem magnética.

Um LCS do tipo indutivo, também conhecido como núcleo blindado (Shielded-Core) ou de blindagem magnética (Magnetic Shielding), recebe estas denominações pelo facto de, ao contrário dos LCSs resistivos, estarem ligados magneticamente à linha de energia. Comportam-se como um transformador de corrente, em que o primário está em série com a linha, e o secundário é formado por uma bobina supercondutora em curto-circuito.

As topologias existentes deste LCS são em núcleo fechado ou núcleo aberto (Figura 2.12). A topologia em núcleo aberto apresenta uma estrutura mais simples, leve e tem a vantagem de se poder manusear o elemento SAT mais facilmente, uma vez que é possível inserir ou retirar o mesmo, sempre que necessário. Por outro lado, em caso de falha, a impedância introduzida pelo LCS com núcleo fechado é algumas vezes superior à do núcleo aberto equivalente, embora o desempenho deste último possa ser melhorado por otimização do comprimento do núcleo de ferro (Pina, 2010).

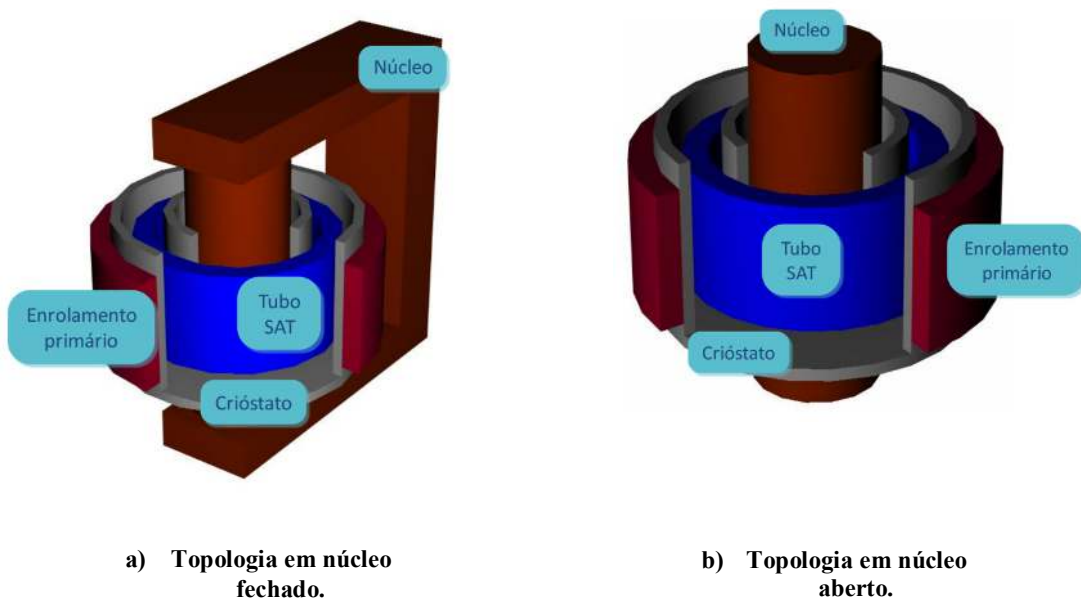
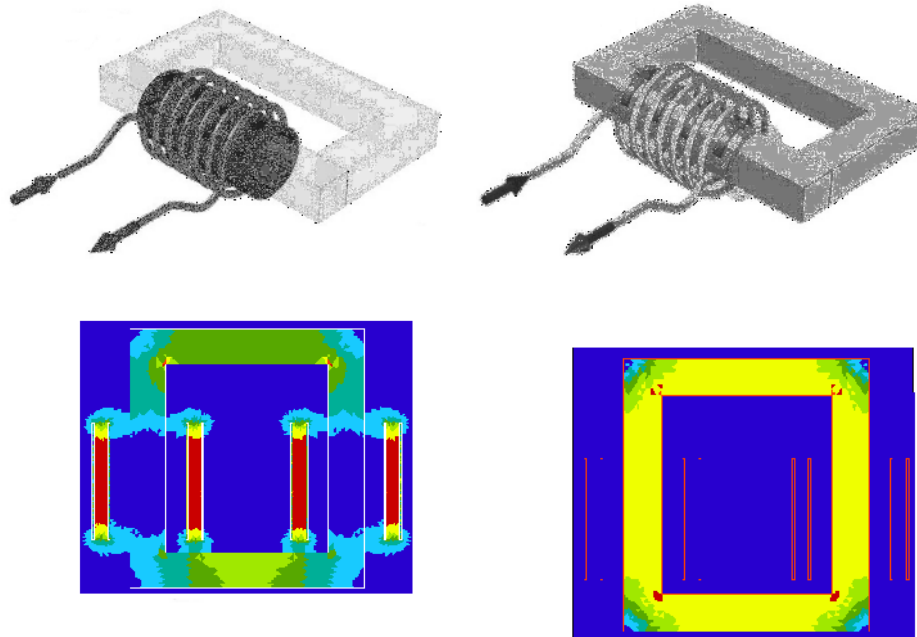


Figura 2.12 - Estrutura, composição e topologia de um LCS indutivo. Retirado de (Pina, 2010).

O enrolamento primário, constituído por um condutor convencional (cobre ou alumínio), está diretamente ligado ao circuito de proteção. O aumento do número de espiras traduz num aumento da capacidade de limitação, no entanto também provoca um aumento de perdas óhmicas permanentes. Estas perdas podem ser reduzidas ao utilizar uma maior secção transversal do fio, no entanto, aumenta também a reatância de dispersão associada ao condutor (Kozac et al, 2006).

A secção transversal do núcleo de ferro é determinada pelo diâmetro interior do tubo SAT e, idealmente, deve ser a maior possível. Em condições normais de funcionamento o núcleo de ferro não é magnetizado. Já o enrolamento secundário consiste num material supercondutor em curto-circuito, geralmente em tubos maciços de Bi-2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$) ou Bi-2212 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$) ou em espiras de fitas supercondutoras. Existem diversos tipos de materiais supercondutores que podem ser utilizados na construção deste tipo de limitador (Kosak, Janowski, Kozak, Wojtasiewicz, & Glowacki, 2006). Neste trabalho, o tubo de Bi-2223 foi o material supercondutor utilizado nos posteriores parâmetros de simulação do LCS indutivo. As características peculiares do secundário, nomeadamente a sua composição, número de espiras, comprimento e diâmetro têm forte influência no modo de funcionamento do limitador. O aumento destas características, em especial, o número de espiras, traduz numa maior taxa de limitação das correntes de falha (Janowski, Wojtasiewicz, Kondratowicz-Kucewicz, Kozak, Kozak, Majka, 2009).



- a) Em operação normal, o tubo SAT blinda o núcleo de ferro. É possível verificar que a densidade de fluxo no interior do enrolamento secundário é nula.
- b) Em condição de CC, o tubo SAT perde a sua capacidade supercondutora, permitindo ao fluxo magnético atravessá-lo e posteriormente magnetizar o núcleo de ferro.

Figura 2.13 - Condições de funcionamento de um LCS indutivo de blindagem magnética. Retirado de (Kozac et al, 2006) e (Bäuml & Kaltenborn, 2011).

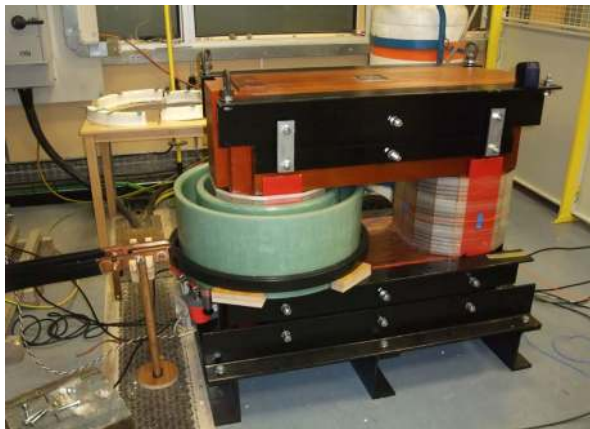
Em condições normais de funcionamento, a bobina supercondutora, devido às suas propriedades naturalmente diamagnéticas, blinda o núcleo ferromagnético da densidade de fluxo gerada pela corrente da linha. Neste caso, não há magnetização do núcleo de ferro obtendo-se assim para o dispositivo uma impedância desprezável e tornando-o “invisível” para a rede (Figura 2.13a).

Ao ocorrer uma falha (CC) na linha, a corrente do enrolamento primário aumenta e o supercondutor perde a capacidade de blindar o fluxo magnético. Conseqüentemente, este penetra no núcleo de ferro, sendo amplificado centenas de vezes, o que aumenta a impedância do dispositivo (Figura 2.13b). Desta forma, a corrente de falha é limitada em vez de ser interrompida, pelo que se mantém o fornecimento de energia aos consumidores que não são afetados pelo defeito na linha. Após a eliminação das correntes de falha, o LCS volta automaticamente ao estado normal ao contrário de um disjuntor, o qual tem de ser rearmado e que, em situação de falha, interrompe o fornecimento aos circuitos a jusantes.

Entre os casos recentes relacionados com o LCS indutivo de blindagem magnética, destaca-se um consórcio entre as empresas Schneider Electric, Alstom Grid e Bruker High Temperature Superconductors (BHTS).

Segundo (Bauml & Kaltenborn, 2011), foi construído e ensaiado à escala laboratorial, um LCS monofásico com topologia em núcleo fechado, de 13 MVA (6,4 kV e 2000 A), baseado em fita SAT 2G YBCO (do inglês, Ytterium- Barium-Copper-Oxide). Foi realizada uma sequência superior a 100 curto-circuitos, incluindo ensaios de resistência com limitação contínua superior a 1 s, validando com sucesso a arquitetura concebida (Figura 2.14a).

No mesmo âmbito, também foi concebido um protótipo LCS monofásico com topologia em núcleo aberto (Figura 2.14b). O modelo foi igualmente validado após a realização da mesma quantidade de ensaios do caso anterior, sem haver indícios de degradação do desempenho (Moriconi et al., 2012). Devido aos resultados promissores verificados, a empresa Stadewerke Augsburg aliou-se ao consórcio anteriormente citado, com o intuito de inserir um limitador trifásico num ponto crítico de uma rede energética real. O projeto ficou intitulado como “iSFCL Project Augsburg”, e consistiu na construção e instalação de um LCS indutivo trifásico, de 10 kV/15 MVA na rede elétrica de Augsburg, Alemanha, que teve início no segundo semestre de 2013. Prevê-se que o desempenho deste projeto seja capaz de suprimir até 80% da corrente prospectiva de falha.



a) Concepção de um LCS indutivo em topologia de núcleo fechado realizado pelos colaboradores da empresa Schneider Retirado de (Bäuml & Kaltenborn, 2011).



b) Concepção de um LCS indutivo em topologia de núcleo aberto realizado pelos colaboradores da empresa Bruker. Retirado de (Moriconi et al., 2012).

Figura 2.14 - Protótipos, em escala laboratorial de LCS indutivo de blindagem magnética.

2.4.5 Comparação entre Limitadores de Corrente

Neste subcapítulo será apresentado um estudo comparativo entre os tipos de limitadores de corrente abordados até ao momento. Como demonstrado anteriormente, apesar de possuírem o mesmo objetivo, isto é, limitar a corrente em caso de CC, apresentam não só vantagens como acarretam também algumas desvantagens. A seguir serão enumerados os dispositivos apresentados na secção 2.4.1 de modo a compará-los na Tabela 2.1.

- A) Fusíveis de AT;
- B) Limitadores Pirotécnicos (limitadores I_S);
- C) Bobinas de Núcleo de Ar e Transformadores de Alta Impedância;
- D) Limitadores Supercondutores do tipo Resistivo;
- E) Limitadores Supercondutores do tipo Indutivo;

Entre os limitadores convencionais abordados, o que apresenta melhor comportamento são as bobinas de núcleo de ar. Apesar de não possuir baixa impedância em operação normal, observa-se na Figura 2.15 ser o único, entre os convencionais, a limitar a corrente de CC sem interromper o fluxo de energia da linha.

Tabela 2.1 - Comparação entre diversos limitadores de corrente de falha. Adaptado de (Bäumel & Kaltenborn, 2011).



Critério	A	B	C	D	E
Limitação	✓	✓	✓	✓	✓
Baixa impedância em regime normal	□	✓	□	✓	✓
Alta impedância em regime de falha	✓	✓	✓	✓	✓
Ativação automática	□	□	✓	✓	✓
Continuação operacional em caso de falha interna	□	□	□	□	✓
Capacidade de operar múltiplas vezes	□	□	✓	✓	✓
Custo	✓	□	✓	□	□

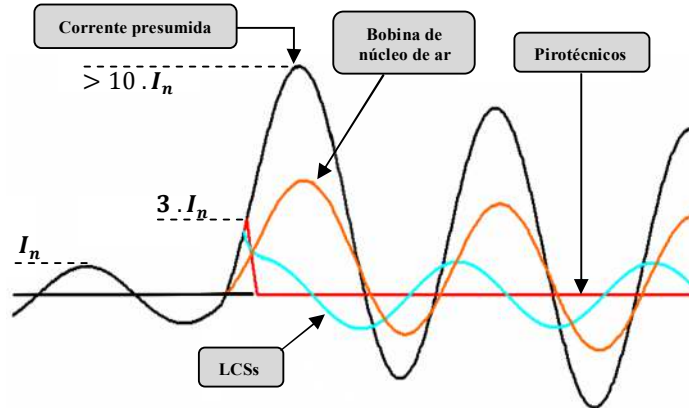


Figura 2.15 - Comparação entre as correntes limitadas através de diferentes dispositivos limitadores. Adaptado de (Gor, Povh, Lerch, 2004).

A corrente presumida de falha pode ultrapassar dez vezes o valor da corrente em operação normal. Referente aos LCSs, observa-se que não têm perdas associadas, em condição normal de funcionamento, nem necessitam de sensores para a ativação dos dispositivos. Observa-se também que o LCS indutivo resolve uma das características negativas do tipo resistivo. Em caso de falha do sistema criogénico, o dispositivo resistivo causa um defeito total da linha em que está inserido, enquanto o indutivo pode continuar em funcionamento, uma vez que o enrolamento primário não será afetado (Bauml & Kaltenborn, 2011).

Ainda assim, o custo relacionado ao arrefecimento criogénico do material SAT e o facto do LCS indutivo apresentar maior peso e volume devido aos núcleos de ferro, são as principais desvantagens associada a este tipo de limitador.

2.5 Modelização de Limitadores de Corrente Indutivos

A fiabilidade e eficiência dos limitadores de corrente do tipo indutivo foram comprovadas anteriormente. O acoplamento magnético do supercondutor ao sistema, não sendo necessária a conexão física entre condutores é uma das vantagens deste sistema. Em contrapartida, a constante necessidade de refrigeração criogénica, o peso e o volume associados a estes dispositivos, devido aos núcleos de ferro, são condições que inviabilizam a sua construção.

Um fator fundamental para a conceção do limitador envolve ter metodologias que reproduzam numericamente o seu comportamento, de modo a ser possível efetuar as respetivas simulações. Na realidade, a forma mais realista de executar tais simulações é através de softwares de modelização de elementos finitos, como por exemplo, o Flux2D. De facto, são modelos extremamente precisos e fiáveis, no entanto, devido às grandes dimensões e complexidade da rede onde o limitador é aplicado, torna-se inexecutável retratar as simulações à escala real devido à longa duração do processo.

Faz parte do objetivo dos próximos subcapítulos abordar alternativas de modelização do LCS indutivo, de forma a contornar a situação anteriormente descrita.

2.5.1 Modelo Baseado no Esquema de Steinmetz Convencional

Como já referido neste trabalho, um LCS indutivo constitui-se basicamente por um transformador com enrolamento secundário em CC. Por este motivo e de acordo com a literatura consultada pode constatar-se que a principal modelização destes dispositivos é baseada em esquemas de Steinmetz. Exemplo desta abordagem pode ser consultado em (Meerovich & Sokolovsky, 2007). Paralelamente ao esquema de Steinmetz, podem ser igualmente utilizadas na modelização dos LCS outras abordagens assim como a caracterização do limitador por uma impedância variável no tempo (Yamaguchi & Kataoka, 2008).

Apesar de estes modelos serem a base da modelização dos LCS indutivos, apresentam algumas limitações fulcrais tais como a não consideração da saturação dos núcleos de ferro e a histerese do dispositivo, importantes na determinação da resposta dinâmica do limitador, tendo por esse motivo pouca aplicabilidade prática (Pina, 2010).

2.5.2 Modelo Baseado no Ciclo de Histerese Máximo

Sabe-se que o comportamento dinâmico dos LCSs indutivos é limitado pelo respetivo ciclo de histerese máximo. De forma a contornar as limitações baseadas no esquema de Steinmetz, é sugerido por (Pina, 2010) uma abordagem de modelização alternativa, em que se tem em conta a característica magnética do dispositivo LCS indutivo.

A característica magnética do núcleo de ferro e respetivo primário, sem o supercondutor presente, isto é, a relação entre a corrente do primário, i_{linha} , e o fluxo ligado, ψ , é proposta inicialmente por (Majoroš, Janšák, Sello, & Zannella, 1997). No entanto, verificou-se que este modelo, ao ser representado no plano $i\psi$, não caracterizava o comportamento pretendido (Figura 2.16). Uma vez que fluxo tendia para um valor fixo após a sua saturação, por mais que se aumentasse a corrente, o fluxo nunca ultrapassaria esse valor, o que não corresponde à realidade.

Nesta perspetiva, e baseado na modificação proposta por (Pina, 2010) demonstra-se a característica do comportamento dinâmico do LCS indutivo a partir de uma expressão que relaciona o fluxo ligado do LCS (ψ_0) com a corrente do primário (i_{linha}) (Equação 2.2).

$$\psi_0(i_{linha}) = aNi_{linha} + \frac{bNi_{linha}}{c + dN|i_{linha}|} \quad (2.2)$$

O presente modelo introduz um crescimento linear da característica após o início da saturação do fluxo ligado (ψ). A variável N traduz o número de espiras do enrolamento primário e os parâmetros a , b , c e d são determinados por ajuste, tendo por base dados experimentais ou simulados. O ciclo de histerese máximo é então construído através das equações relativas aos ramos ascendente e descendente demonstrados a seguir:

$$\lambda_a(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} - f(i_{linha})) \quad (2.3)$$

$$\lambda_d(i_{linha}) = \psi_0(i_{linha} + f(i_{linha})) \quad (2.4)$$

Onde f é representada por uma função auxiliar dada por:

$$f(i_{linha}) = A_f \cdot \cos(B_f \cdot i_{linha}) = \frac{I_{SAT}/N}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{I_{SAT}/N}{I_{CC}}\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{i_{linha}}{I_{CC}}\right) \quad (2.5)$$

Sendo A_f e B_f , equações auxiliares demonstradas por (2.6) e (2.7).

$$A_f = \frac{I_{SAT}^T / N}{\cos^S \left(\frac{\pi I_{SAT}^T / N}{I_{CC}} \right)} \quad B_f = \frac{\pi \cdot i_{lin}}{2 \cdot I_{CC}} \quad (2.6)(2.7)$$

O parâmetro I_{SAT} corresponde à corrente máxima suportada pelo SAT (enrolamento secundário) e I_{CC} representa a corrente de curto-circuito da rede. Os ramos ascendentes e descendentes cruzam o eixo horizontal em $\pm \frac{I_{SAT}}{N}$, o que corresponde à máxima corrente que o secundário consegue blindar. Além disso, ambos os ramos interseam-se à característica magnética do LCS nos valores de corrente equivalentes a $\pm I_{CC}$. O ciclo de histerese máximo do LCS é demonstrado na Figura 2.17, assim como a respetiva característica de magnetização (ψ_0).

Figura 2.16 - Comportamento errado do modelo matemático sugerido por (Majoroš, Janšák, Sello, & Zannella, 1997). Após saturação do fluxo ligado, a característica tende assintoticamente para valores constantes (linhas tracejadas). Retirado de (Pina, 2010).

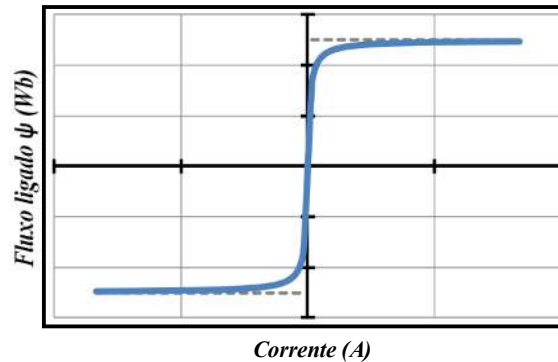
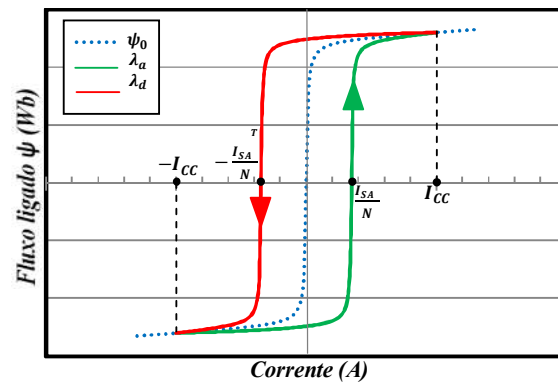


Figura 2.17 - Modelo matemático baseado em (Pina, 2010) e de acordo com (2.2). Após saturação do fluxo ligado, a característica tende para um crescimento linear com a corrente, tal como se verifica na realidade.



2.6 A Aplicação Matlab/Simulink

2.6.1 Introdução

Nos últimos anos, o Matlab tornou-se um dos softwares de cálculo numérico mais utilizados no ramo da engenharia. O Simulink, aplicação interligada ao Matlab, fornece uma interface gráfica simples e eficaz para a criação de modelos e simulação de sistemas dinâmicos, bem como novas estratégias de controlo, especialmente para sistemas não lineares (Lamchich & Lachguer, 2012).

O Simulink possui uma vasta biblioteca de funções e blocos pré-definidos, o que permite aplicá-lo nos mais diversos ramos da engenharia. O utilizador pode também personalizar, modificar e criar os seus próprios blocos. Após definir o modelo, é possível simulá-lo, alterar parâmetros e interagir com o mesmo em tempo-real. Todas as ferramentas do Matlab podem ser utilizadas no Simulink, sendo por este facto que ambos estão integrados. É possível simular, analisar e rever os modelos em qualquer ambiente, o que dá a este sistema uma grande versatilidade.

Em suma, esta aplicação permite ao usuário criar um modelo de qualquer tipo de dispositivo ou aparelho que não exista fisicamente e testá-lo antes que possa ser realmente construído.

2.6.2 Biblioteca SimPowerSystems

A biblioteca SimPowerSystems faz parte do Simulink e é uma moderna ferramenta de desenvolvimento que permite ao utilizador criar facilmente qualquer modelo direcionado ao Sistema de Energia Eléctrico (SEE). Os SEE são combinações de circuitos eléctricos e dispositivos eletromecânicos, como motores, geradores, cargas e linhas de transmissão.

O aumento das energias renováveis no SEE faz com que a complexidade do sistema cresça exponencialmente. Como consequência, os métodos analíticos e ferramentas de software utilizadas no planeamento e conceção destes sistemas tem de estar em constante evolução para resolver esta complexidade com eficácia e eficiência. O que agrava esta situação é o facto do sistema muitas vezes ser completamente não-linear e a única forma de estudá-lo e analisá-lo é através de simulações.

SimPowerSystems utiliza o ambiente Simulink, permitindo ao utilizador construir facilmente um modelo utilizando procedimentos simples de “clique e arrasto”. Não só é possível desenhar a topologia do circuito rapidamente, como também realizar a análise do circuito e incluir interações com mecânica, térmica, controle, entre outros ramos da engenharia.

A biblioteca contém os típicos equipamentos do ramo de energia, como transformadores, linhas de alta tensão, máquinas e eletrônica de potência (Sybille et al., 2003).

2.6.3 Ferramentas de Simulação de Indutâncias Não Lineares

O funcionamento de um LCS, previamente citado, caracteriza-se por um comportamento invisível à rede (indutância desprezável) em condições de operação normais. Por outro lado, ao ser submetido a correntes superiores, o dispositivo deve comportar-se como uma indutância de elevado valor, limitando a corrente de falha da rede à qual o dispositivo é inserido. De modo a alcançar os objetivos deste trabalho, investigaram-se ferramentas que simulassem e reproduzissem tal comportamento, chegando à conclusão que os LCSs poderiam ser equiparados a dispositivos de indutâncias não lineares no tempo.

Atualmente, a ferramenta Simulink/Matlab já abrange métodos de simulação de dispositivos com indutâncias não lineares. Neste subcapítulo serão apresentados alguns modelos, baseados nestes programas, que eventualmente, permitam reproduzir o funcionamento de um dispositivo LCS. Numa primeira fase, serão apresentados dois modelos semelhantes que utilizam diferentes bibliotecas e, posteriormente, será abordado o caso de maior relevância.

- **Modelo de Indutâncias Variáveis**

A primeira abordagem baseia-se num dispositivo de indutâncias variáveis adaptado de (MathWorks Documentation Center, 2014). Esta ferramenta deve ser ligada em série ao circuito e fornece uma corrente limitada a partir de uma indutância variável. Sabendo-se que a tensão originada entre os terminais de um dispositivo indutivo é dada por:

$$\mathbf{u} = L \cdot \frac{di}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (2.8)$$

Ao integrar ambos os lados da equação, tem-se:

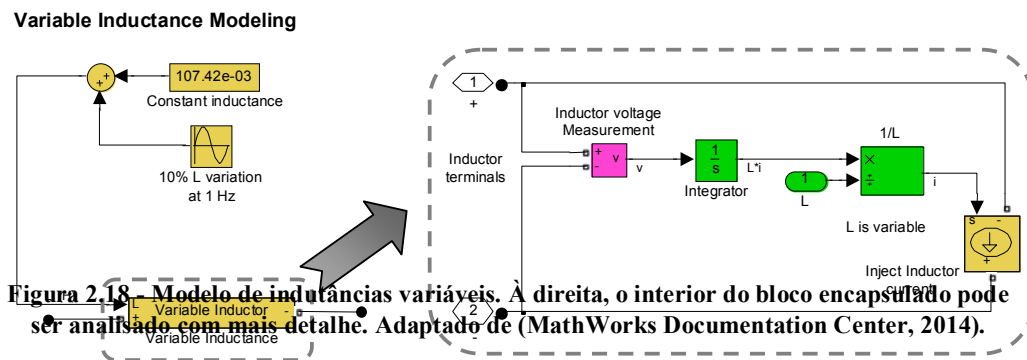
$$L \cdot i = \psi \quad \text{e} \quad \psi = \int \mathbf{u} dt \quad (2.9)(2.10)$$

Ao separar a variável da corrente (i), conclui-se que

$$i = \frac{\psi}{L} = \frac{1}{L} \cdot \int \mathbf{u} dt \quad (2.11)$$

Uma vez que se conhece o valor do fluxo ligado (proveniente da tensão do dispositivo) e a indutância variável pretendida, é possível simular a corrente que passa pelo

dispositivo através de uma fonte de corrente controlada (Figura 2.19). O modelo contém um bloco de medição da tensão, cujo sinal passa através de um integrador e posteriormente é dividido pelo valor da indutância. De seguida, o sinal é responsável por controlar os níveis de corrente da fonte controlada e posteriormente enviado para a saída do dispositivo. Salienta-se o facto de ser necessário ter bem definido o valor da indutância variável à entrada do dispositivo, o que significa ser este dispositivo utilizável apenas em situações previsíveis. Neste exemplo, utilizou-se uma indutância sinusoidal centrada em 107 mH e com variação de 10% da mesma.

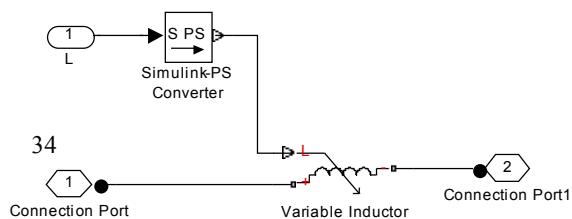


- **Bloco de Indutância variável**

O Simulink também oferece um bloco específico chamado de Indutor Variável (Variable Inductor), no entanto, este componente faz parte de outra biblioteca do Matlab, chamada Simscape. Enquanto o Simulink processa os sinais através de valores simples, sem unidades, a biblioteca Simscape trata os sinais de forma física, sendo possível distinguir a grandeza e unidade do sinal em questão.

A ligação direta deste bloco a sistemas desenvolvidos através do SimPowerSystem não é permitida pelo Simulink porque o mesmo considera o bloco como um membro de outro domínio. De qualquer forma, não é inteiramente impossível incorporar ambas as bibliotecas. De facto, existem blocos específicos que permitem a conversão entre sinais, do tipo “físico” para “real” e vice-versa (PS-simulink converter), no entanto esta situação pode vir a aumentar o grau de complexidade do sistema desnecessariamente. Além do mais, o modo de funcionamento deste bloco é muito semelhante ao modelo de indutâncias variáveis, o que não torna a sua utilização significativamente vantajosa.

Figura 2.19 - Bloco de indutância variável disponível na biblioteca Simscape do Matlab. Evidencia-se a necessidade de haver blocos responsáveis pela conversão do tipo de sinal de cada biblioteca.



- **Modelo de Indutâncias Saturáveis**

Esta abordagem é semelhante ao modelo de indutâncias variáveis, no entanto, tem a capacidade de limitar uma corrente que passa pelo dispositivo através da sua característica não linear, no plano $i\psi$. A seguir será ilustrado um exemplo adaptado de (Sybille et al., 2003) o qual demonstra um caso aplicável deste modelo.

Supondo que se deseje conceber um dispositivo indutivo com o seguinte comportamento: para valores de corrente inferiores a 1 A, ter uma indutância fixa de valor 2 henrys. Ao ultrapassar o valor de corrente estipulado, o dispositivo satura e a sua indutância é reduzida para 0,5 henrys. (Figura 2.20a).

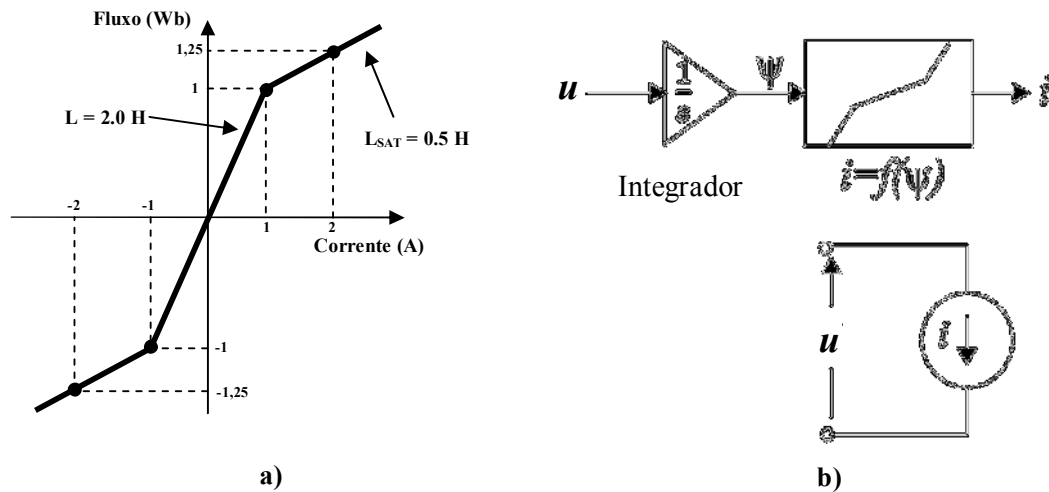


Figura 2.20 - Princípio de funcionamento do modelos de indutâncias variáveis. Adaptado de (Sybille et al., 2003).

Uma vez que se conhece a característica do dispositivo e baseando-se novamente nas equações do modelo de indutâncias variáveis, a corrente (i) que percorre o dispositivo é dada através de uma função não linear do fluxo ligado (ψ) que, por sua vez, é uma função da tensão (u) originada entre os seus terminais (Figura 2.21b). O modelo pode então ser implementado como uma fonte de corrente controlada indiretamente pela tensão aplicada nos terminais do dispositivo. O esquema computacional do modelo de Indutâncias saturáveis pode ser observado na Figura 2.22. A única diferença entre este modelo e o anterior é o facto de utilizar um bloco “Lookup Table” cuja finalidade é interpolar uma função a partir de um segmento da mesma. Esta funcionalidade dá ao modelo uma maior versatilidade, permitindo aplicá-lo praticamente em qualquer caso que se conheça a sua característica no plano $i\psi$ (histerese).

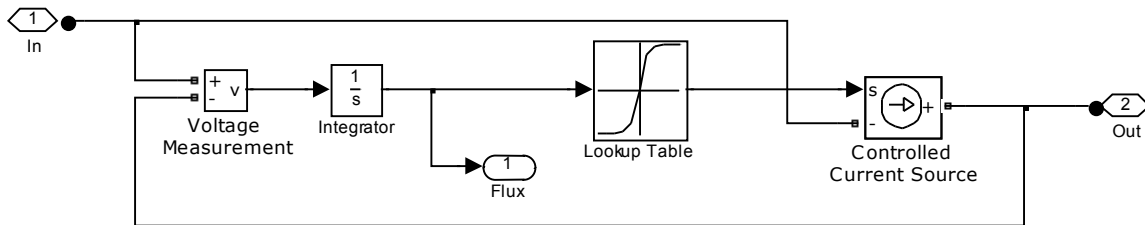


Figura 2.21 - Modelo de indutâncias saturáveis.

2.6.4 Conclusões

Após uma breve explicação da aplicação Matlab /Simulink e as suas ferramentas de simulação segue a argumentação e escolha do método mais eficaz. O modelo e o bloco de indutâncias variáveis exigem que se tenha uma indutância definida no tempo, o que seria inviável para a simulação de LCSs devido à imprevisibilidade dos instantes associados a um CC. Por outro lado, uma vez que há conhecimento do ciclo de histerese máximo do dispositivo, verifica-se que o modelo das indutâncias saturáveis é a alternativa com maior probabilidade de sucesso no âmbito de simulações de LCSs. De facto, foi o modelo baseado para a conceção do modelo computacional abordado no próximo capítulo.

Capítulo 

Implementação do Modelo Computacional

3.1 Introdução

Este capítulo é dedicado aos procedimentos experimentais efetuados durante o desenvolvimento deste projeto. O objetivo, tal como mencionado anteriormente, foi implementar um modelo computacional para simulação de um LCS indutivo para ser utilizado em redes com distintas cargas e fontes. Dada a vasta gama de limitadores supercondutores, destaca-se o facto de neste capítulo ser apenas abordado o LCS indutivo, de blindagem magnética e com topologia em núcleo fechado (LCSi). O ambiente de desenvolvimento foi o Matlab associado ao Simulink e ao Excel.

Primeiramente será apresentada uma ferramenta útil para a análise do comportamento do ciclo de histerese máximo de um LCSi. Seguidamente, será dada ênfase ao desenvolvimento e explicação detalhada do modelo computacional, o qual será dividido em três partes. Destaca-se o facto da primeira versão do bloco LCSi ter uma topologia monofásica, seguindo-se, posteriormente, um bloco trifásico constituído por três módulos monofásicos.

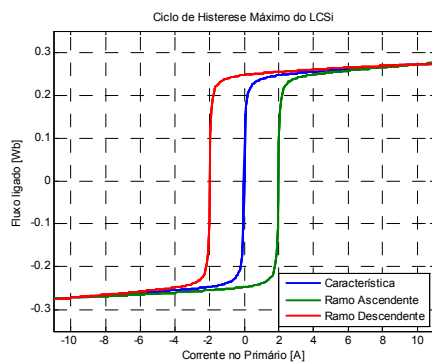
3.2 Análise do Comportamento do Ciclo de Histerese Máximo

Como abordado anteriormente, o comportamento dinâmico dos LCS indutivos é limitado pelo respetivo ciclo de histerese máximo. Antes de se proceder à conceção do modelo computacional deste dispositivo houve a necessidade de analisar as equações de modelização do respetivo ciclo de histerese máximo e compreender o seu comportamento. Para tal, foi desenvolvido um ficheiro em Matlab (consultar Anexo 1) baseado nas equações da secção 2.5.2 e com os parâmetros baseados em (Pina, 2010) e apresentados a seguir:

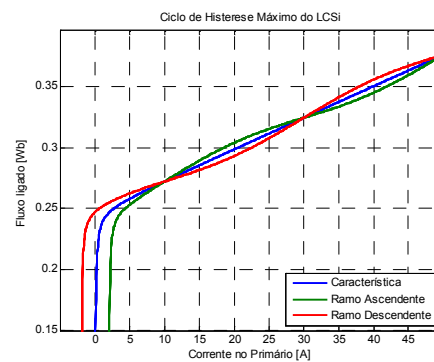
Tabela 3.1 - Parâmetros construtivos do ciclo máximo de Histerese do limitador.

a	b	c	d	I_{CC} [A]	I_{Sat} [A]	N
7,34E-06	6,23	457,83	25,16	10	694	350

O ficheiro calcula as equações auxiliares (2.5, 2.6 e 2,7) e posteriormente faz a utilização das mesmas para determinar a característica e os ramos ascendente e descendente do ciclo de histerese. O ficheiro também simula uma fonte de corrente sinusoidal de amplitude variável, de 50 Hz e com 5000 amostras por período de onda. Como resultado, são apresentados gráficos da corrente sinusoidal aplicada, do fluxo ligado associado e do ciclo de histerese. Na Figura 3.1 encontra-se representado o ciclo de histerese associado aos parâmetros da Tabela 3.1. Assim como previsto, a característica e os ramos cruzam-se quando o valor da corrente é igual ao valor da corrente de curto-circuito da rede, I_{CC} . Após este valor, verifica-se uma oscilação dos ramos ascendente e descendente como se pode observar na Figura 3.1b. Este comportamento será um aspeto importante a ser analisado posteriormente, durante o desenvolvimento do modelo computacional.



a) Comportamento do ciclo de histerese.



b) Comportamento do ciclo de histerese após o parâmetro I_{CC} .

Figura 3.1 - Gráficos extraídos do ficheiro implementado para a análise do ciclo de histerese máximo do limitador.

3.3 Modelo Computacional do LCSi

A ideia inicial para a concepção do modelo do LCSi foi fundamentada na Secção 2.6.3. Entre as abordagens propostas, o modelo de indutâncias saturáveis (ver Figura 3.2) foi a melhor opção, uma vez que, permite utilizar as características de histerese do dispositivo para influenciar o comportamento da corrente no circuito. A utilização dos blocos “Lookup Tables” também foi um aspeto bastante útil pois permite simular a característica de histerese para qualquer valor de entrada em questão. Esta ferramenta tem a capacidade de aproximar uma função através de interpolações lineares, desde que sejam previamente definidos alguns pontos ou um segmento da mesma.

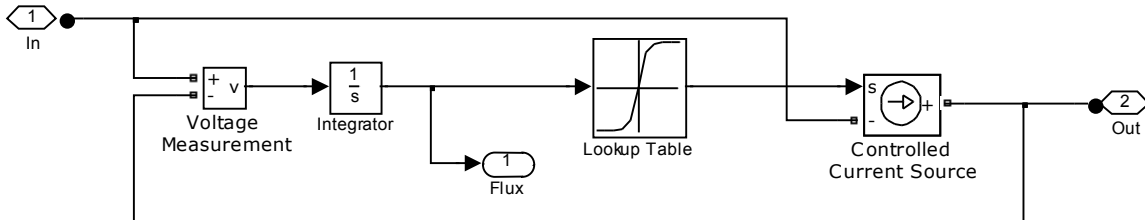


Figura 3.2 - Modelo de indutâncias saturáveis.

A inserção dos valores nas “Lookup Tables” pode ser realizada diretamente nas propriedades das mesmas, no entanto, para que o modelo permanecesse o mais versátil possível, optou-se por definir uma tabela em Excel com a característica de cada ramo do ciclo de histerese (consultar Anexo 2). Assim, é possível alterar parâmetros do ciclo e realizar facilmente diversas simulações com características distintas. Apesar de não ser estritamente necessário, foi dada preferência a uma grande quantidade de pontos da função para que posteriormente a fiabilidade de interpolação das “Lookup Tables” fossem garantidas.

De forma a manter a versatilidade do modelo, a ligação entre os dados da tabela em Excel e o programa Simulink é feita através de comandos de inicialização do bloco encapsulado LCSi (consultar Anexo 3). Estes comandos são efetuados antes de iniciar cada simulação e são responsáveis pelo envio dos parâmetros construtivos do limitador (Tabela 3.1) para o ficheiro Excel, o qual, constrói o respetivo ciclo de histerese máximo. Posteriormente, os comandos de inicialização fazem a leitura dos valores das tabelas em Excel sendo transferidos automaticamente para variáveis do Matlab (Figura 3.3).

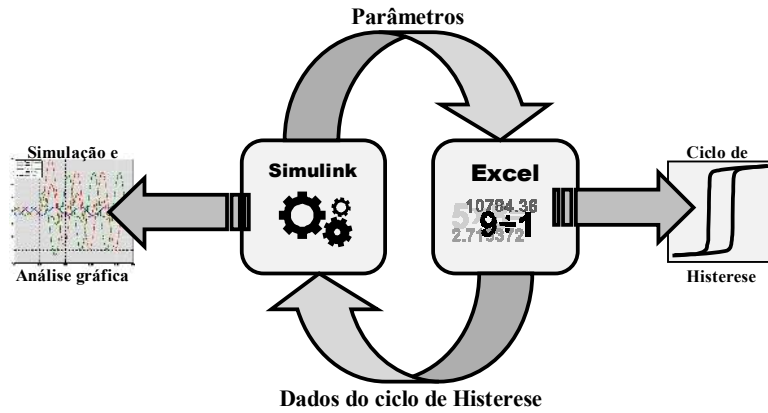


Figura 3.3 - Interligação entre o Simulink e Excel.

Conhecendo-se os ramos do ciclo de histerese do dispositivo, a corrente que passa pelo mesmo é uma função não-linear do fluxo ligado (ψ) que, por sua vez, é proveniente da integral da tensão que aparece através dos seus terminais. Tais relações são demonstradas nas equações (2.8, 2.9 e 2.10). O modelo computacional do LCSi pode então ser implementado como uma fonte de corrente controlada, onde a corrente é uma função não linear da tensão como demonstra a Figura 3.4. Como o ciclo de histerese do limitador é composto por 3 ramos, há a necessidade de inserir uma “Lookup Table” para cada um deles, sendo tal procedimento analisado mais adiante.

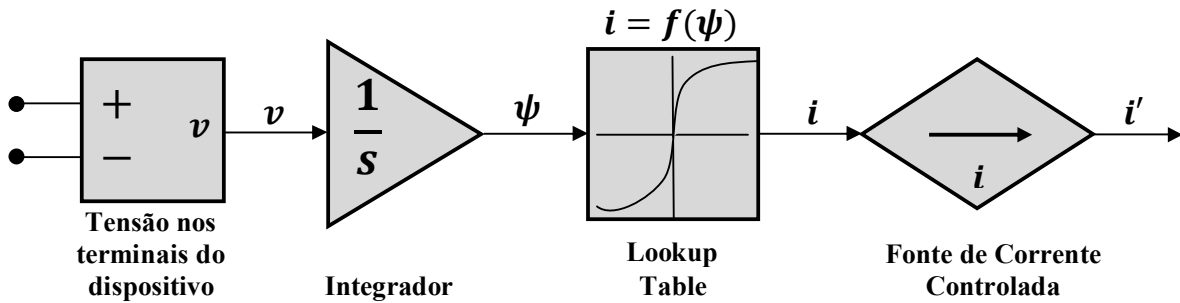


Figura 3.4 - Funcionamento geral do modelo computacional desenvolvido.

O bloco final do modelo computacional do LCSi encontra-se representado na Figura 3.5. Ao selecioná-lo surge uma janela de configuração com uma breve descrição e que permite alterar os parâmetros construtivos do mesmo (Figura 3.6). De acordo com o processo de interligação entre o Simulink e o Excel, mencionados anteriormente, a alteração dos parâmetros construtivos proporciona a atualização automática do ciclo de histerese máximo do LCSi. Além disso, permite visualizar facilmente as alterações dos parâmetros pois reproduz o ciclo máximo

na interface do bloco (Figura 3.5). Uma vez mais, é dada ênfase ao facto de já não ser necessário manipular o ficheiro Excel, bastando realizar as alterações na janela de configuração.

A corrente que passa pelo bloco foi projetada para fluir sempre da porta de entrada (terminal positivo) para a porta de saída (terminal negativo). Apesar da sua interface possuir as mesmas entradas e saídas do modelo de indutâncias saturáveis (Figura 3.2), foi necessário realizar diversas modificações no seu interior para que o mesmo atuasse conforme o pretendido.

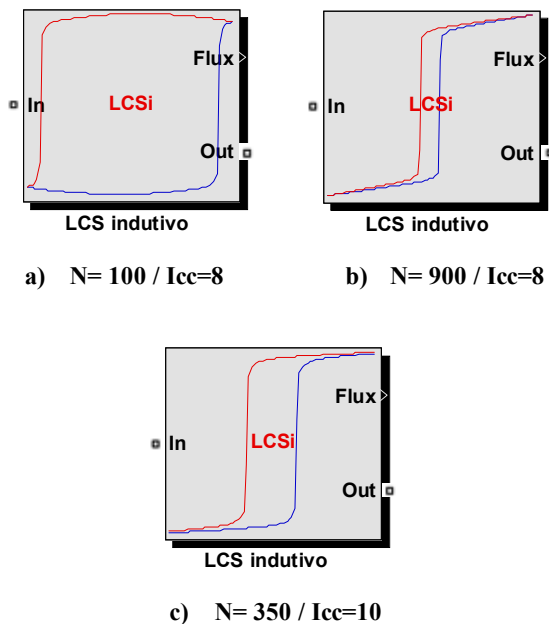


Figura 3.5 - Interface final do bloco LCSi. É possível verificar as alterações do ciclo de histerese máximo de acordo com diferentes parâmetros introduzidos.

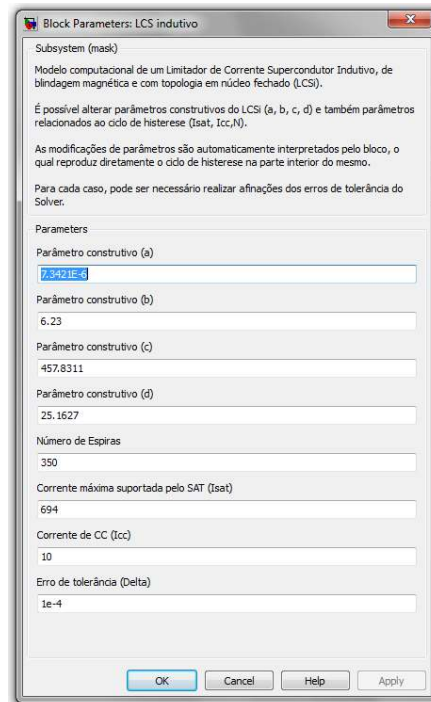


Figura 3.6 - Janela de configuração de parâmetros do bloco LCSi.

Com o intuito de simplificar a complexidade do circuito completo, os procedimentos foram separados em três sub-blocos:

- Bloco de Limitação da Corrente;
- Ativação do CC da Fonte de Corrente Controlada;
- Lógica de Comutação da Fonte de Corrente

A Figura 3.7 demonstra a divisão interior do bloco LCSi. Possui um dispositivo de medição de corrente, a qual é distribuída aos sub-blocos subsequentes, e também um dispositivo de medição da tensão como abordado anteriormente.

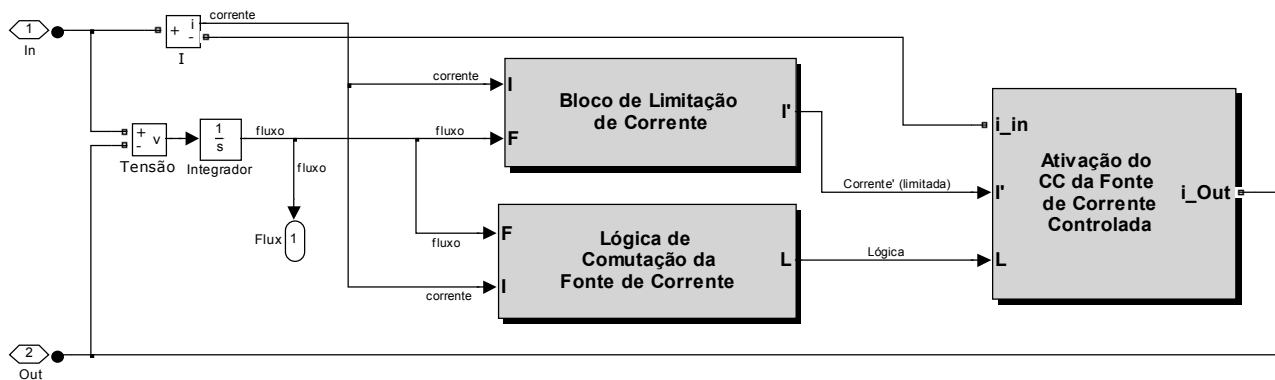


Figura 3.7 - Arquitetura interior do LCSi com respetiva divisão de blocos.

3.3.1 Bloco de Limitação da Corrente

O bloco de limitação da corrente tem como entradas o sinal da corrente que percorre o dispositivo e o fluxo ligado (ψ) proveniente da integração da tensão. É responsável pela seleção única e exclusiva de um dos ramos do ciclo de histerese para a respetiva limitação da corrente. Como referido, o ciclo de histerese é constituído por três ramos distintos (ascendente, descendente e a característica) e portanto exige que o bloco possua uma tabela característica para cada um. Caso a corrente seja crescente, deve escolher o ramo ascendente, caso contrário, escolhe o ramo descendente.

Para executar a seleção de sinais é também necessário observar se a corrente é crescente ou decrescente. Para tal, o bloco analisa a corrente no instante presente " t_k " e compara com a corrente num instante anterior " t_{k-1} " (sinal que passa pelo bloco "Memory1"). A subtração de ambas as correntes segue para o bloco "Sign" cuja função é analisar se a diferença entre elas tem um valor positivo ou negativo. Para valores positivos, o bloco aplica à sua saída o valor "1" o que significa que a corrente é crescente, caso contrário, o bloco aplica o valor "-1" significando que a corrente está a decrescer.

O passo seguinte envolve a escolha do sinal através de um interruptor (bloco "Switch"), o qual é constituído por 1 porta de controlo (ao centro) e 2 portas de dados (extremidades). O seu princípio de funcionamento é seleccionar os dados da primeira porta caso a de controlo satisfaça o critério imposto (neste caso, ser maior ou igual a 0). Caso contrário, deixa passar os dados da outra porta existente. A conceção deste bloco pode ser observada na Figura 3.8.

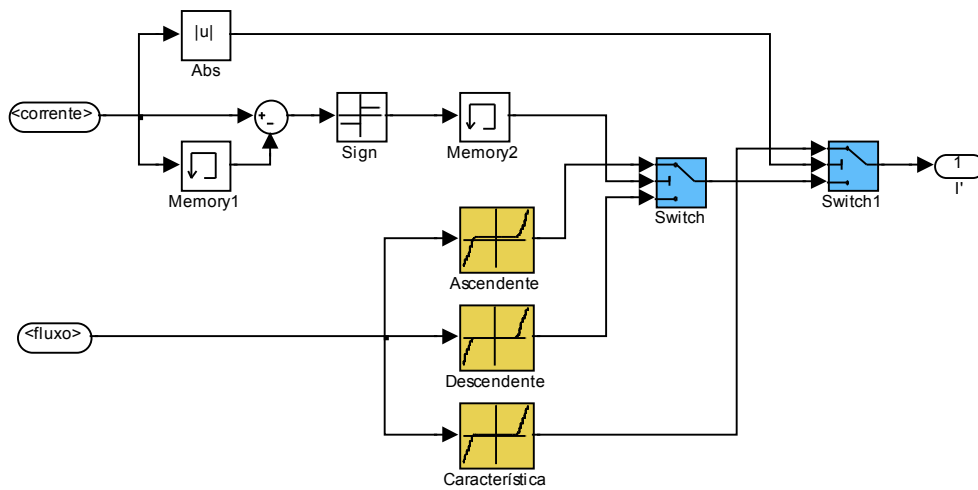


Figura 3.8 - Arquitetura interior do bloco de limitação da corrente

Outra situação relevante diz respeito ao comportamento do ciclo de histerese observado na seção 3.2, mais especificamente na Figura 3.1b. Uma vez que este comportamento só acontece quando os valores da corrente são superiores a I_{CC} , é possível contornar esta situação com um segundo interruptor. Neste caso, o novo interruptor recebe o módulo da corrente na porta de controlo. Caso este valor seja superior ou igual a I_{CC} , seleciona os dados da tabela característica (primeira porta), caso contrário, deixa passar os valores do interruptor anterior (terceira porta). Por fim, o bloco de limitação tem como saída o valor da corrente (I') procedente de uma das “Lookup Tables”.

O motivo pelo qual se utilizou um segundo bloco de memória foi para contornar erros de *loop* algébricos o qual será explicado posteriormente na seção 3.4.

3.3.2 Bloco da Fonte de Corrente Controlada

Assim como o próprio nome indica, este bloco é constituído por uma fonte de corrente controlada, cujo sinal de entrada é o valor da corrente (I') do bloco observado na seção anterior. A sua montagem, componentes e respetiva ligação podem ser constatados na Figura 3.9a. Nele será reproduzida uma das características mais importantes de um LCSi: ser invisível à rede em regime normal de funcionamento. Este comportamento é alcançado realizando um curto-circuito à fonte de corrente. Para tal, são necessários dois interruptores e um sinal lógico de comutação (L) para cada um deles (neste caso, opostos por um bloco lógico “Not”). Seguidamente será observado com mais detalhe cada um dos casos em específico.

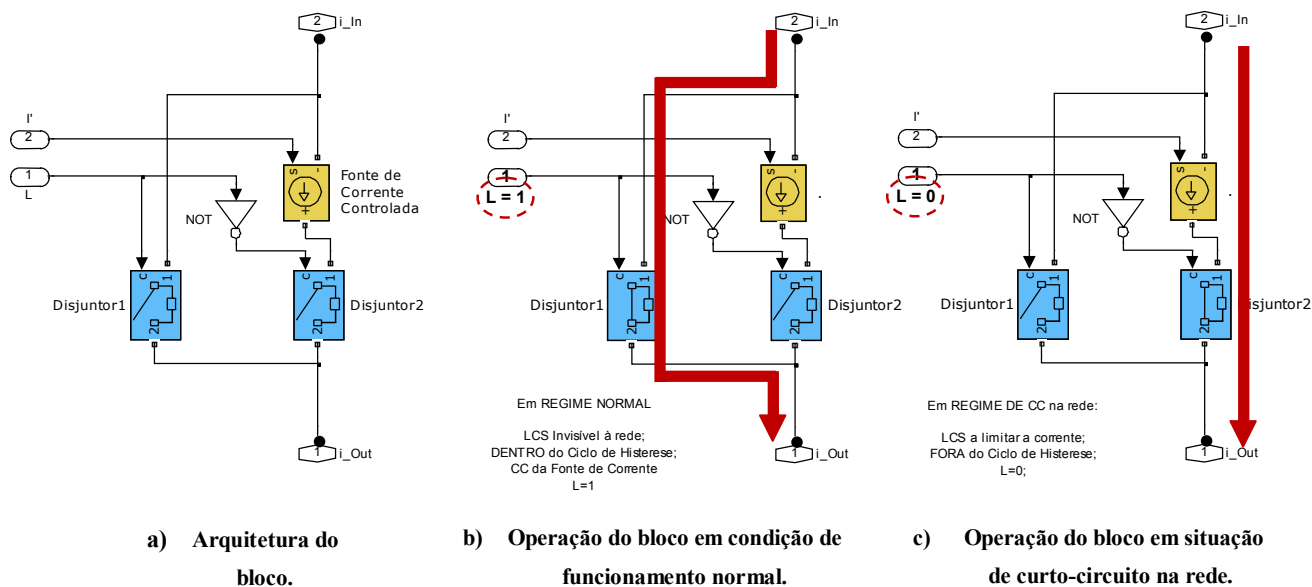


Figura 3.9 - Arquitetura interior do bloco da fonte de corrente controlada e respectivas situações de funcionamento.

Refira-se que, adiante será abordado muitas vezes o conceito de “ponto de operação do LCSi”. Não é mais do que um ponto (i, ψ) assente no plano $i\psi$, em constante movimento durante a execução de simulações e perante uma falha originada por um CC.

Em condições normais de funcionamento, a corrente que passa pelo LCSi é inferior a $\frac{I_{SA}^T}{N}$ e o ponto de operação encontra-se no interior do ciclo de histerese. Neste caso, o sinal lógico de comutação “L” deve ser equivalente a 1 para que o disjuntor número um seja fechado e conseqüentemente seja possível realizar um curto-circuito à fonte de corrente. Como demonstrado na Figura 3.10, esta situação pode ser vista como se o bloco em questão não existisse. Uma vez que é aplicado um curto-circuito nos terminais do LCSi, a medição de tensão será nula e conseqüentemente o fluxo ligado do dispositivo permanecerá constante e igual ao valor anterior à transição de estado. Este é o comportamento esperado do fluxo ligado de um LCS indutivo.

Em regime de CC na rede, espera-se que o sinal lógico de comutação L seja equivalente a 0, permitindo que o disjuntor dois seja fechado e que a corrente do LCSi seja controlada por I' (corrente limitada anteriormente pelo bloco de limitação). Neste caso, a corrente será superior a I_{sat}/N e o ponto de operação irá encontrar-se no exterior do ciclo de histerese.

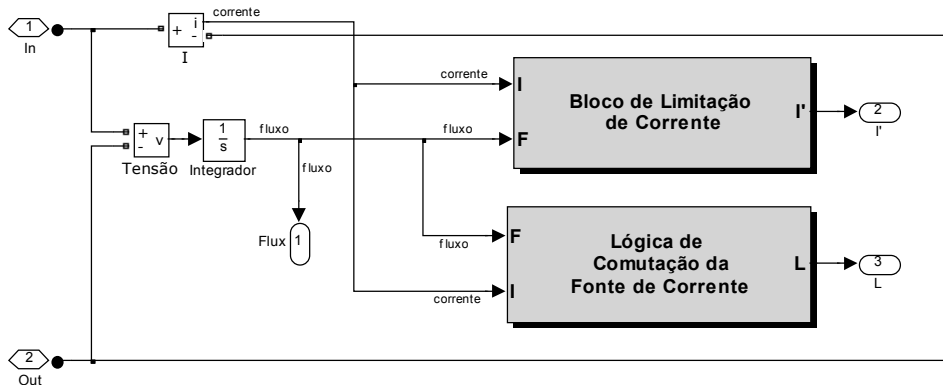


Figura 3.10 – Bloco LCSi em condição normal de funcionamento. Há um CC à fonte de corrente, situação análoga ao desaparecimento do respetivo bloco.

3.3.3 Bloco Lógico de Comutação

Neste subcapítulo será dada ênfase à lógica de comutação do sinal “L” abordado na seção anterior. Igualmente ao bloco de limitação, o bloco lógico de comutação, recebe como entrada o sinal da corrente e do fluxo ligado associado e tem como saída a grandeza lógica “L”, cujos valores são exclusivamente 0 ou 1 (Figura 3.11). O princípio de funcionamento deste sub-bloco é impor e examinar diversas condições lógicas referentes a cada regime de funcionamento do LCSi. Como visto previamente, em caso de condições normais deve-se enviar um sinal equivalente a 1 ao sub-bloco subsequente, ou seja, realiza-se um CC à fonte de corrente do LCSi.

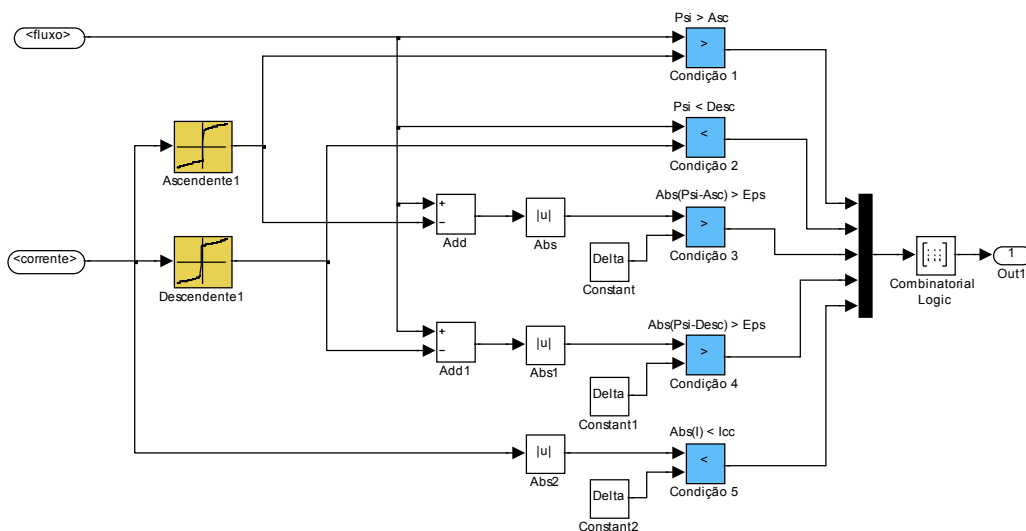


Figura 3.11 - Arquitetura interior do bloco lógico de comutação.

Inicialmente, a arquitetura deste bloco apresentava poucas condições de controlo, e como consequência observava-se que o ponto de operação do LCSi corrompia-se inúmeras vezes resultando em simulações inválidas. Desta forma, foram-se adicionando condições específicas até que o modelo computacional apresentasse resultados fiáveis. As condições de controlo da versão final são relatadas a seguir:

- Fluxo ligado do dispositivo superior ao fluxo ligado do ramo ascendente;

$$\psi > \lambda_a \quad (3.1)$$

- Fluxo ligado do dispositivo inferior ao fluxo ligado do ramo descendente;

$$\psi < \lambda_d \quad (3.2)$$

- Diferença entre fluxo ligado e ramo ascendente superior a uma determinada tolerância;

$$|\psi - \lambda_a| > \delta \quad (3.3)$$

- Diferença entre fluxo ligado e ramo descendente superior a uma determinada tolerância;

$$|\psi - \lambda_d| > \delta \quad (3.4)$$

- Módulo da corrente que passa pelo dispositivo inferior a I_{CC} ;

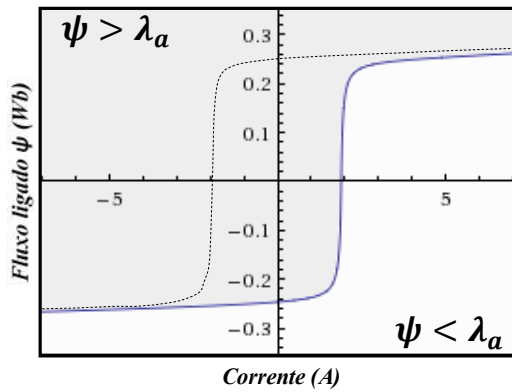
$$|I| < I_{CC} \quad (3.5)$$

As duas primeiras condições (Figura 3.12a e Figura 3.12b) servem para analisar se o ponto de operação do LCSi se encontra dentro ou fora do ciclo de histerese. A junção de ambas representa o interior do ciclo de histerese. As condições das equações 3.3 e 3.4 foram aspetos fulcrais para contornar os erros referidos anteriormente. Durante o período de testes houve diversos casos (equivocados) de transições de estado do LCSi, pois o ponto de operação oscilava muito próximo dos ramos ascendente/descendente. Estas condições (Figura 3.12c) permitiram ajustar a sensibilidade de aproximação/afastamento entre o ponto de operação e os ramos do ciclo de histerese. Desta forma, evita-se que pequenas oscilações resultem em transições equivocadas. A afinação da sensibilidade é realizada através de uma constante “Delta”, a qual pode ser modificada na janela de configuração do bloco LCSi.

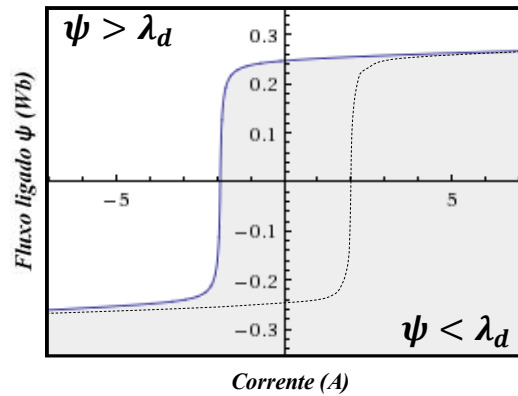
Por fim, a última condição certifica-se que o ponto de operação do dispositivo se encontra entre os limiares do ciclo de histerese (Figura 3.12d).

?

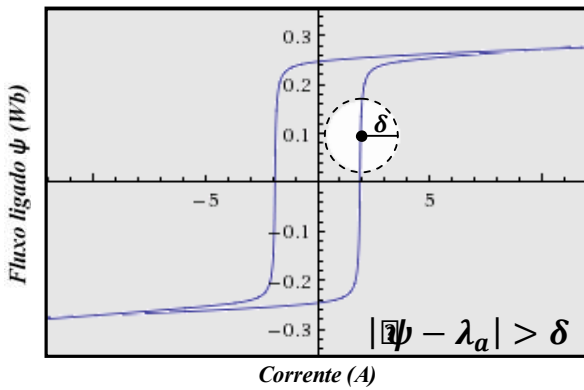
?



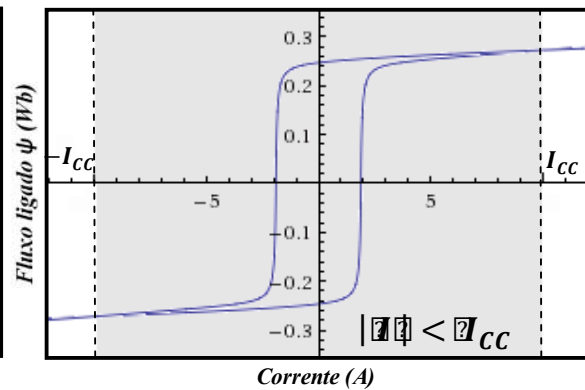
a) Condição da Equação 3.1.



b) Condição da Equação 3.2.



c) Condição das Equações 3.3 e 3.4.



d) Condição da Equação 3.5.

Figura 3.12 - Condições lógicas do bloco lógico de comutação.

A ferramenta “Combinatorial Logic” permite realizar uma tabela de verdade (consultar Anexo 4) que inclui todas as condições implementadas. O propósito inicial seria analisar individualmente cada situação da tabela, no entanto, verificou-se que o único caso em que se deve realizar o CC da fonte de corrente ($L=1$) é quando todas as condições acima são satisfeitas. Por este motivo, há a possibilidade de trocar este bloco por uma porta lógica “AND” de 5 entradas também disponível na biblioteca de blocos do Simulink. De facto, as condições de controlo não foram escolhidas ao acaso e sim propositadamente de maneira que fossem todas do mesmo regime de funcionamento.

É importante frisar que neste sub-bloco as “Lookup Tables” recebem o valor da corrente como entrada e devolvem o valor do fluxo ligado, ou seja, o contrário do caso anterior.

3.3.4 Layout Completo do LCSi

A disposição final e completa do bloco LCSi pode ser consultada na Figura 3.13. Nela, é possível verificar com maior facilidade a interligação entre os blocos do LCSi, assim como também as divisões de cada sub-bloco. Também pode ser consultado em anexo (Anexo 5) a versão sem edições.

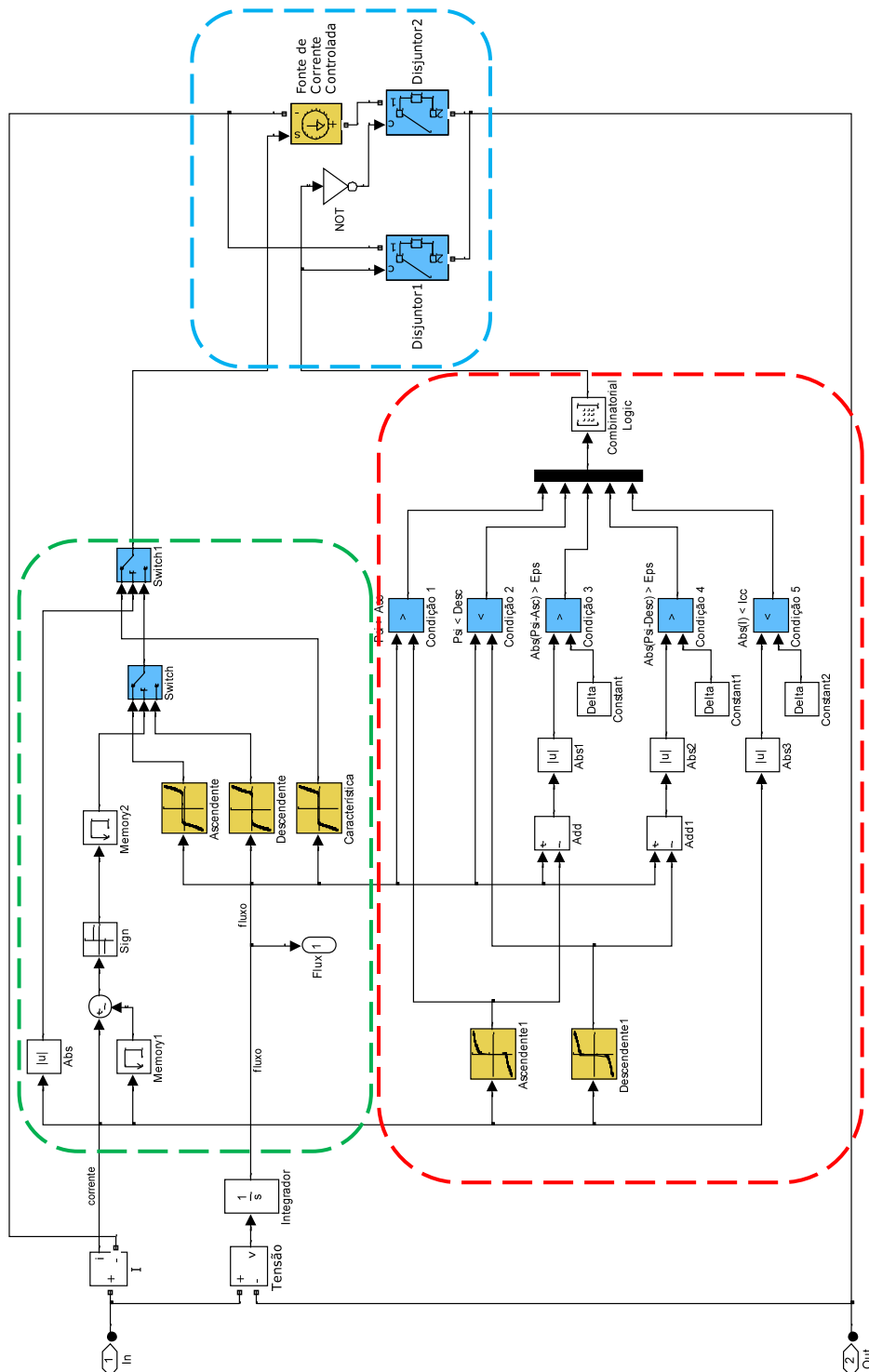


Figura 3.13 - Arquitetura final e completa do bloco LCSi.

3.4 Dificuldades e Limitações

Durante a elaboração do bloco LCSi surgiram diversos erros relacionados com *loop* algébricos (Algebraic loop). Trata-se de um evento no qual a entrada de um bloco num dado instante de tempo depende da saída do mesmo bloco no mesmo instante de tempo (Figura 3.14). Este tipo de problema causa perdas de velocidade na execução da simulação e em alguns casos pode também causar erros na respectiva simulação.

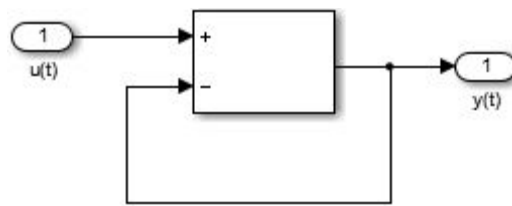


Figura 3.14 - Exemplo de caso suscetível a erros de *loop* algébrico

Conforme descrito em (MathWorks Inc., 2014), uma possível solução é utilizar blocos de condição inicial (força um valor inicial ao ramo em questão) para ajudar o algoritmo a resolver as iterações do *loop*. No entanto, esta solução não foi adequada ao modelo computacional do LCSi. Após a consulta da literatura, o erro de *loop* algébrico foi contornado introduzindo um pequeno atraso ao ramo em questão. Como referido anteriormente, introduziu-se o bloco “Memory” no bloco de limitação da corrente para solucionar o problema.

Outro erro normalmente encontrado durante o desenvolvimento do LCSi foi a violação de tamanho do passo mínimo do algoritmo do Simulink. Este erro ocorre quando o modelo computacional tende a usar um passo de integração menor do que o passo mínimo. Como nem sempre é possível modificar o tamanho do passo mínimo, deve-se então trocar para um método de ordem superior ao utilizado, que em geral utiliza um maior passo de integração. Outra opção é aumentar o valor da tolerância absoluta e relativa na página de configuração do algoritmo do Simulink. Este procedimento é, inclusive, uma possível limitação do bloco LCSi, uma vez que se observou haver necessidade de ajustar constantemente os valores de tolerância relativa e dos valores de passo (máximo) entre diferentes simulações.

Simulações e Análise de Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados provenientes das simulações do bloco LCSi. Inicialmente, o LCSi foi submetido a um circuito de carácter monofásico o qual sofreu um CC entre os intervalos da simulação. De seguida foi introduzido numa rede trifásica cujo LCSi (trifásico) será constituído por três módulos monofásicos. Neste caso, foram realizados diversos tipos de CC para que fosse possível analisar o comportamento do modelo computacional.

Todas as simulações foram realizadas em modo contínuo e o método de solução escolhido (“Solver” do Simulink) foi o ODE23S. Normalmente utiliza-se este método de passo variável, pois ajusta continuamente o passo de integração maximizando a eficiência e garantindo a precisão especificada. É de ordem fixa, passo simples e ideal para modelos inflexíveis (MathWorks Inc., 2014). Para cada caso em específico, foi necessário ajustar os parâmetros do algoritmo de solução, nomeadamente a tolerância relativa e o tamanho de passo máximo do “Solver”.

4.2 Aplicação do LCSi em Circuito Monofásico

De forma a observar o desempenho do modelo LCSi em situação de funcionamento normal e de falha, torna-se necessário a aplicação de correntes de curto-circuito à entrada do mesmo. Com este intuito, submeteu-se o bloco a um circuito monofásico (Figura 4.1) que simule uma rede constituída por fonte de tensão, linha de transmissão, resistência de carga e interruptor para ativação/desativação do CC. O ramo formado pela resistência e indutância, em série com a fonte, simulou simultaneamente a impedância do gerador e a impedância da linha de transmissão, motivo pelo qual foi designado de resistência e impedância combinada.

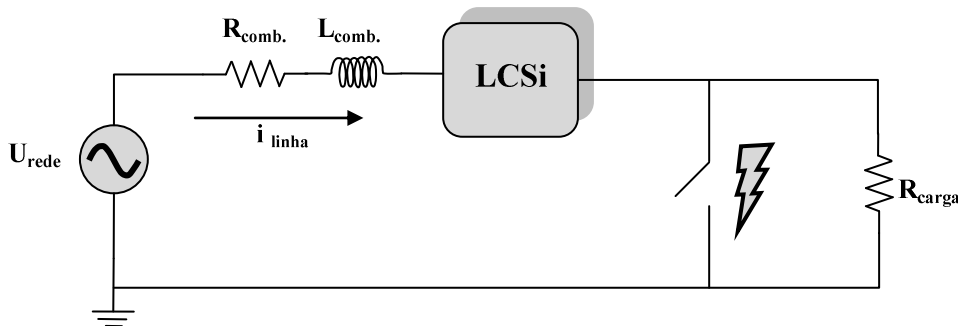


Figura 4.1 - Circuito monofásico de ensaio do LCSi.

Apesar de os LCS serem normalmente aplicados em redes de MT, foi realizado um teste em escala reduzida, não descartando a possibilidade de ser reproduzido em escalas reais. Esta opção foi baseada na possibilidade de se poder comparar os resultados de experiências anteriores abordadas na literatura consultada e assim verificar se o modelo se comporta como esperado.

Para o próximo ensaio computacional foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Frequência de 50 Hz em regime alternado sinusoidal (AC);
- Fonte de tensão com amplitude máxima de 100 V (70 V de tensão eficaz);
- Impedância resistiva combinada, , de valor 1,89 Ω ;
- Impedância indutiva combinada, , de valor 16,58 mH;
- Impedância de carga puramente resistiva, , de valor 50 Ω ;
- Período total de curto-circuito, , de valor 80 ms;
- Instante de ativação de curto-circuito em ms;
- Instante de desativação de curto-circuito em ms;
- Parâmetros do bloco LCSi semelhantes à Tabela 3.1.

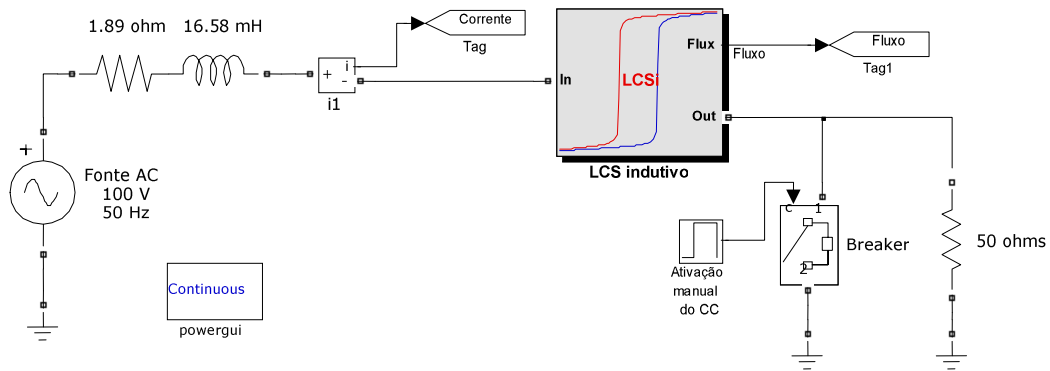


Figura 4.2 - Modelo computacional do LCSi inserido em circuito monofásico.

O modelo do circuito implementado em Simulink e com o auxílio da biblioteca SimPowerSystem pode ser observado na Figura 4.2. Além dos elementos anteriormente citados, também foi adicionado um bloco de medição de corrente cujo sinal é enviado posteriormente para instrumentos de análise gráfica (consultar Anexo 6). O curto-circuito foi ativado no instante $t = 0.04$ ms, desativado no instante $t = 0.12$ ms e foi realizado por um bloco gerador de onda retangulares.

Os resultados da simulação sob o efeito do bloco LCSi são demonstrados na Figura 4.3. Em condições de funcionamento normal, a amplitude máxima de corrente foi dimensionada para rondar os 1,9 A, mesmo próximo da corrente crítica de ativação do LCSi, I_{crit} (Equação 4.1).

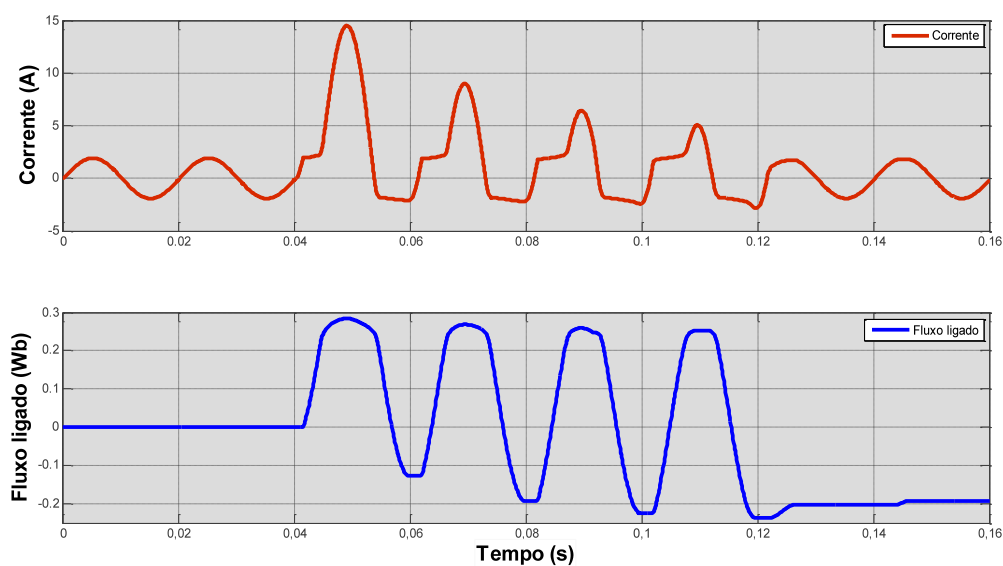


Figura 4.3 – Evolução temporal da corrente e do fluxo ligado.

Após o instante \quad ms, o CC foi ativado, resultando num rápido incremento da amplitude de corrente, chegando ao máximo de 14,5 A. Os picos de corrente subsequentes foram sempre inferior ao pico inicial, estabilizando-se no valor mínimo de 5 A, aproximadamente. Nota-se que o fluxo ligado do dispositivo permanece aproximadamente constante quando o circuito se encontra em funcionamento normal. Já em regime de CC, há variação do fluxo ligado e nota-se que quanto maior for, mais eficaz será a limitação da corrente.

A combinação entre a corrente e o fluxo ligado possibilita determinar a evolução do ponto de operação do LCSi, que basicamente assenta no ciclo de histerese máximo do dispositivo (Figura 4.4). Verifica-se também que as excursões no interior são sempre horizontais, isto porque é quando a tensão nos terminais do dispositivo é nula e conseqüentemente o fluxo ligado permanece constante até encontrar o ramo oposto. Outro comportamento verificado diz respeito à corrente exceder a corrente de curto-circuito da rede, I_{CC} , e a partir daí apresenta a característica do ciclo de histerese em vez dos ramos ascendente e descendente.

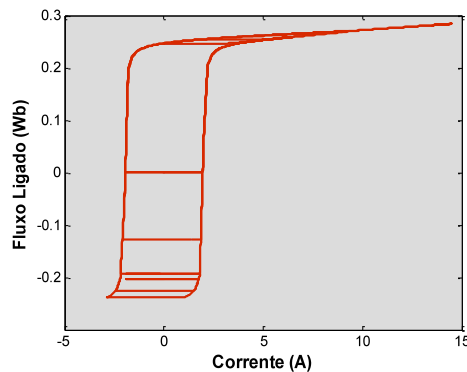


Figura 4.4 - Evolução do ponto de operação do LCSi no plano $i\psi$.

Para efeitos de comparação de resultados sobrepõem-se a corrente que passa pelo circuito com e sem a presença do LCSi. A corrente prospectiva máxima sem o bloco é de 24,2 A, e portanto, há uma redução aproximadamente de 40% da amplitude de pico no primeiro período de onda limitada até ao máximo de aproximadamente 70% nos períodos subsequentes.

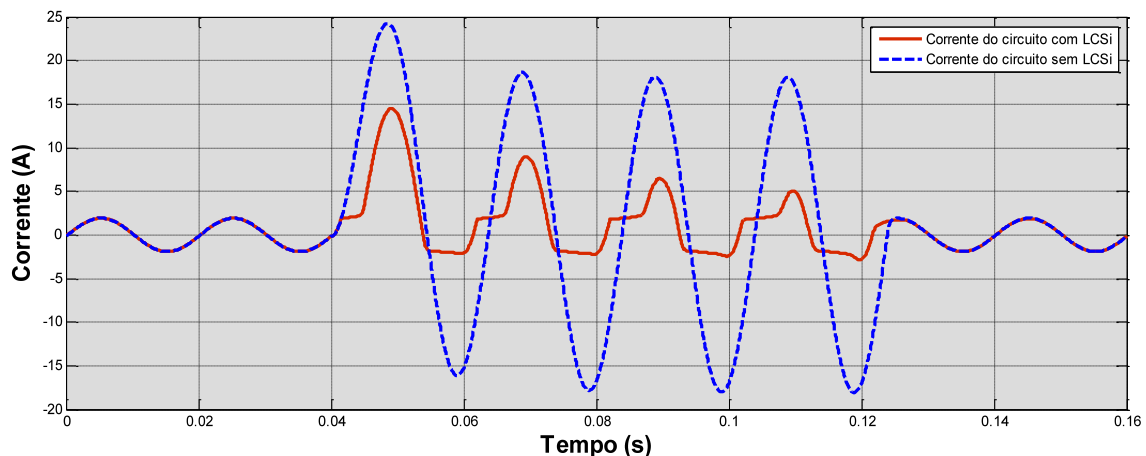


Figura 4.5 - Evolução temporal da corrente prospectiva e limitada do circuito monofásico.

4.3 Fiabilidade do Modelo Computacional

De forma a verificar a fiabilidade do modelo computacional, foram retiradas de (Pina, 2010) três simulações realizadas através do programa Flux2D, tentando reproduzi-las no modelo computacional implementado. Primeiramente, efetuou-se um CC no instante $t = 20$ ms a uma rede de impedância puramente resistiva de valor 5 ohms (Figura 4.6).

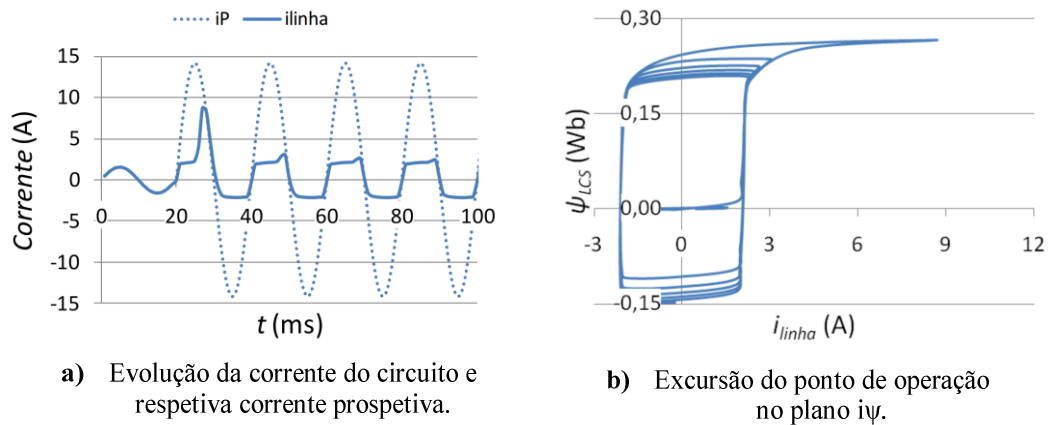


Figura 4.6 - Resultados da simulação, com o Flux2D, para uma impedância de rede resistiva e uma falha em $t = 20$ ms. Retirado de (Pina, 2010).

Baseando-se no valor da corrente prospectiva (14 A aproximadamente), sem o bloco LCSi inserido no circuito monofásico, modificaram-se os níveis de tensão da fonte até que as correntes fossem semelhantes. Voltou a inserir-se o modelo e realizou-se o ensaio, como mostra a Figura 4.7. É possível verificar que os resultados são praticamente idênticos com a exceção das linhas internas do ciclo de histerese máximo. Enquanto o modelo apresentado por (Pina, 2010) apresenta linhas internas arredondadas, o modelo computacional desenvolvido contém linhas praticamente horizontais entre os ramos ascendentes e descendentes.

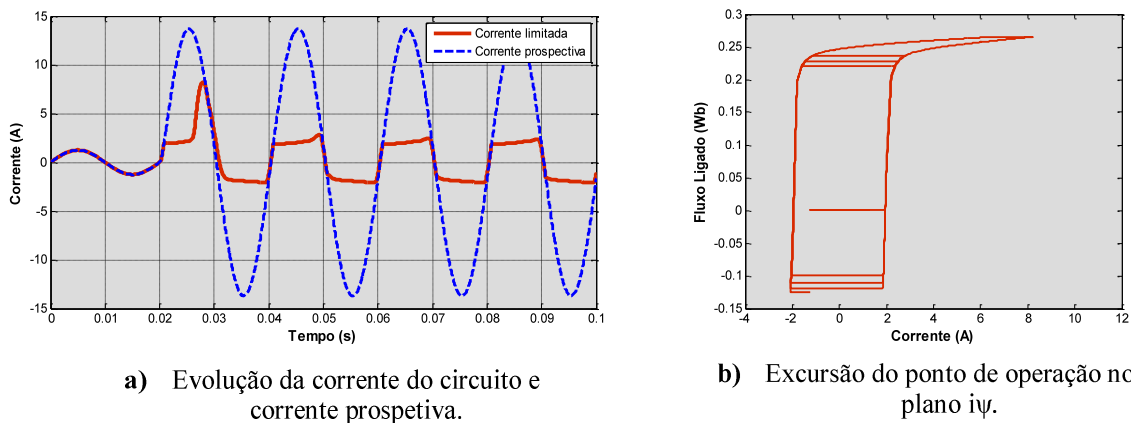


Figura 4.7 - Resultados da simulação, com bloco LCSi, em Simulink, para uma impedância de rede resistiva e uma falha em $t = 20$ ms.

Este comportamento foi propositadamente considerado para que o fluxo ligado do dispositivo fosse constante enquanto estivesse entre o ramo ascendente e descendente e pode ser verificado nos instantes $t = 0,027$ s, $t = 0,047$ s, $t = 0,067$ s (e assim por diante) do gráfico da evolução temporal da corrente e fluxo (Figura 4.8).

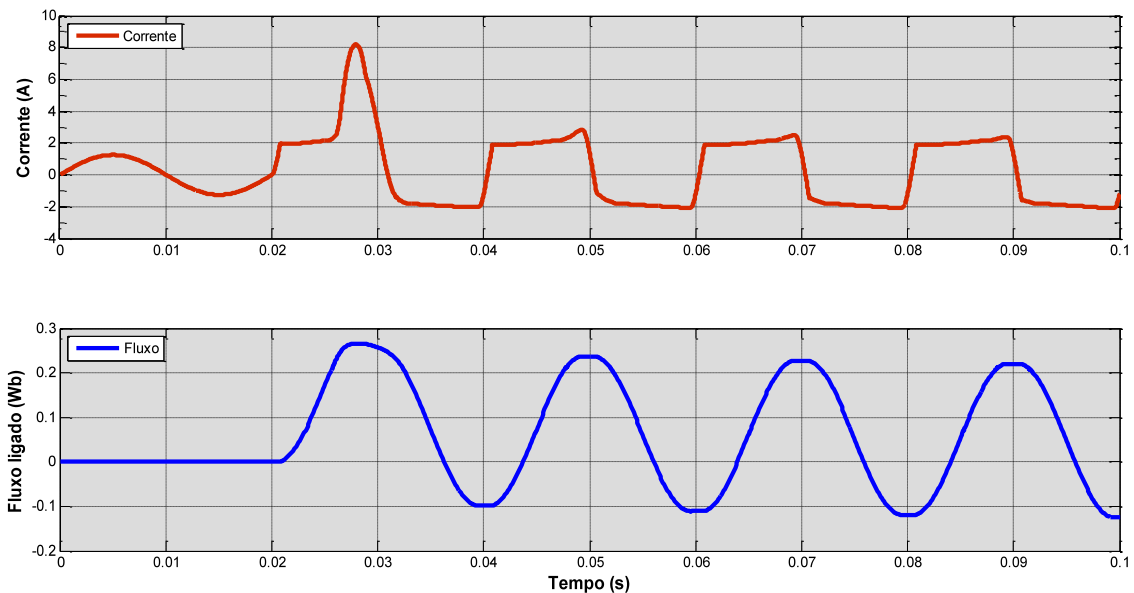
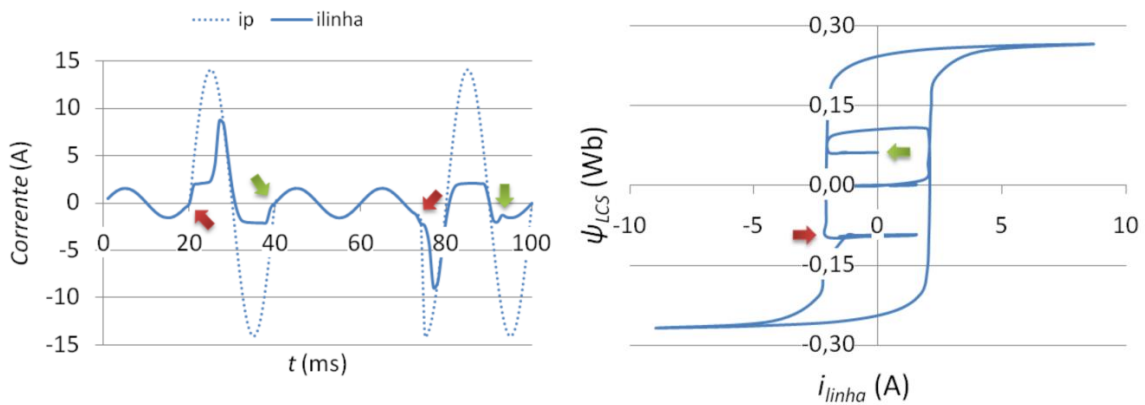


Figura 4.8 - Evolução temporal da corrente e fluxo ligado do dispositivo LCSi para uma impedância de rede resistiva e uma falha em $t = 20$ ms.

O período total de simulação deste ensaio não excedeu os 30 s, sendo que os primeiros 13 s foram de inicialização do próprio programa (leitura de tabelas do Excel, inclusive) e os restantes 17 s preenchidos com a simulação em si. Refira-se que o equipamento informático onde foi simulado o modelo é constituído de um processador Intel U4100 de 1.30 GHz e provavelmente seria possível reduzir o período de simulação através de equipamentos com maior capacidade de cálculos (frequência do processador superior). Alterar o modo de simulação de “contínuo” para “discreto” também seria uma possibilidade para reduzir os tempos de simulação.

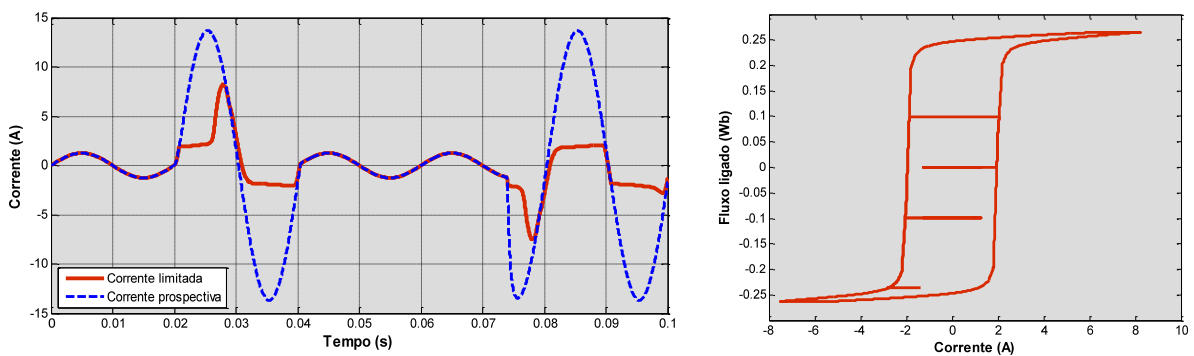
Para o próximo ensaio, foi reproduzida uma simulação com aplicação de duas falhas consecutivas de 19 ms. A primeira, no instante $t = 0,019$ ms e a seguinte no instante $t = 0,038$ ms. Os resultados da literatura consultada podem ser constatados na Figura 4.9. Nota-se que o limitador fica magnetizado após o fim do CC, o que é ilustrado pelo fluxo remanescente que permanece no material.



- a) Evolução da corrente do circuito e respectiva corrente prospetiva. As setas vermelhas assinalam a ativação de um CC e as verdes a sua remoção.
- b) Evolução da corrente do circuito e respectiva corrente prospetiva. A seta vermelha assinala o fluxo remanescente após a remoção do primeiro CC, e a verde o fluxo do segundo.

Figura 4.9 - Resultados da simulação, com o Flux2D, para uma impedância de rede resistiva e duas falhas de 19 ms, uma aplicada em $t = 20$ ms, seguida de outra falha em $t = 74$ ms. Retirado de (Pina, 2010).

O resultado da simulação com o bloco LCSi pode ser consultado na Figura 4.10. Os ensaios são quase idênticos, com uma pequena variação da onda limitada após a desativação do segundo CC (instante $t=94$ ms). Com a análise da evolução temporal da corrente e do fluxo (Figura 4.11), observou-se que a transição de estado do bloco LCSi sofreu um ligeiro atraso. Em vez do LCSi estabilizar o valor do fluxo no instante $t = 94$ ms, prorroga o evento até o instante $t = 98$ ms. De qualquer forma, o limitador faz a sua função e não permite que a corrente do dispositivo alcance as correntes presumidas do instante em questão.



- a) Evolução da corrente do circuito e respectiva corrente presumida.
- b) Excursão do ponto de operação no plano $i\psi$.

Figura 4.10 - Resultados da simulação, com bloco LCSi, em Simulink, para uma impedância de rede resistiva e duas falhas de 19 ms, uma aplicada em $t = 20$ ms, seguida de outra falha em $t = 74$ ms.

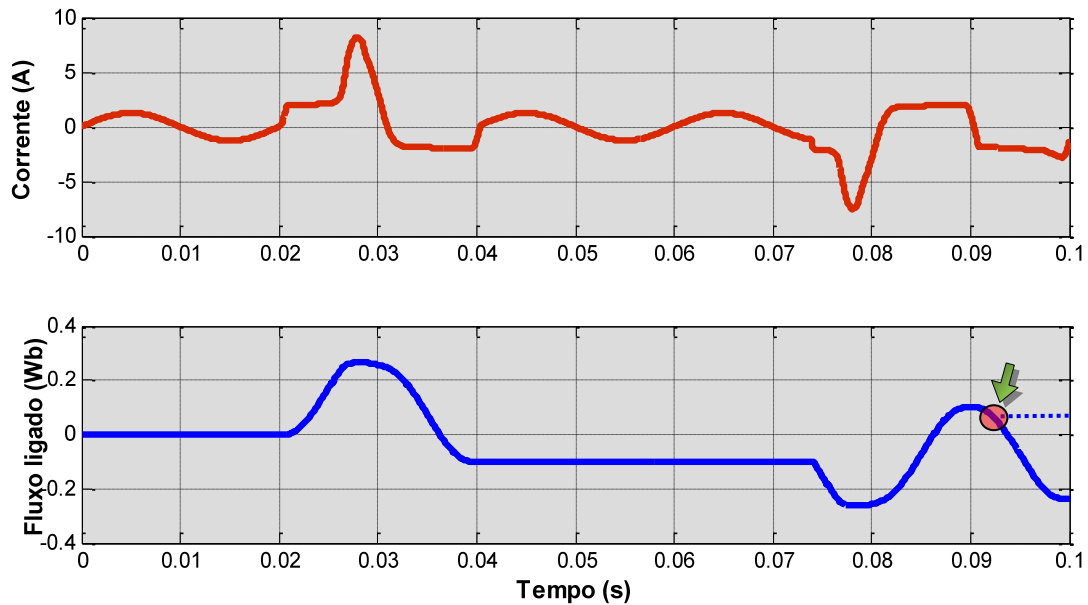


Figura 4.11 - Evolução temporal da corrente e fluxo ligado do dispositivo LCSi, para uma impedância de rede resistiva e duas falhas de 19 ms, uma aplicada em $t = 20$ ms, seguida de outra falha em $t = 74$ ms.

No que se refere à excursão no plano $i\psi$ também apresenta resultados bastante similares com exceção do fluxo remanescente do segundo CC. O bloco finaliza a simulação com um fluxo remanescente equivalente a 0,24 Wb (negativo) enquanto o ensaio original acaba aproximadamente com 0,07 Wb.

Por último, é verificado o desempenho do modelo em redes com capacidade e indutância, simulados através de um ramo RLC série. A fonte utilizada foi semelhante aos casos anteriores e os elementos da rede foram constituídos pelos seguintes valores: Ω , mH e mF. O curto-circuito é aplicado no instante ms, encontrando-se na Figura 4.12 os resultados obtidos através da simulação por elementos finitos. Verificam-se algumas zonas em que o Flux2D apresentou oscilações na resposta. Esta dificuldade em convergir verifica-se em casos em que o passo de simulação é inferior a 1 ms, como o da presente simulação, de 0,5 ms, que foi necessário para os resultados serem mais corretos. Por outro lado, a referida redução do passo temporal implicou em tempos de simulação superior a três dias, para um ensaio de período equivalente a 120 ms (Pina, 2010).

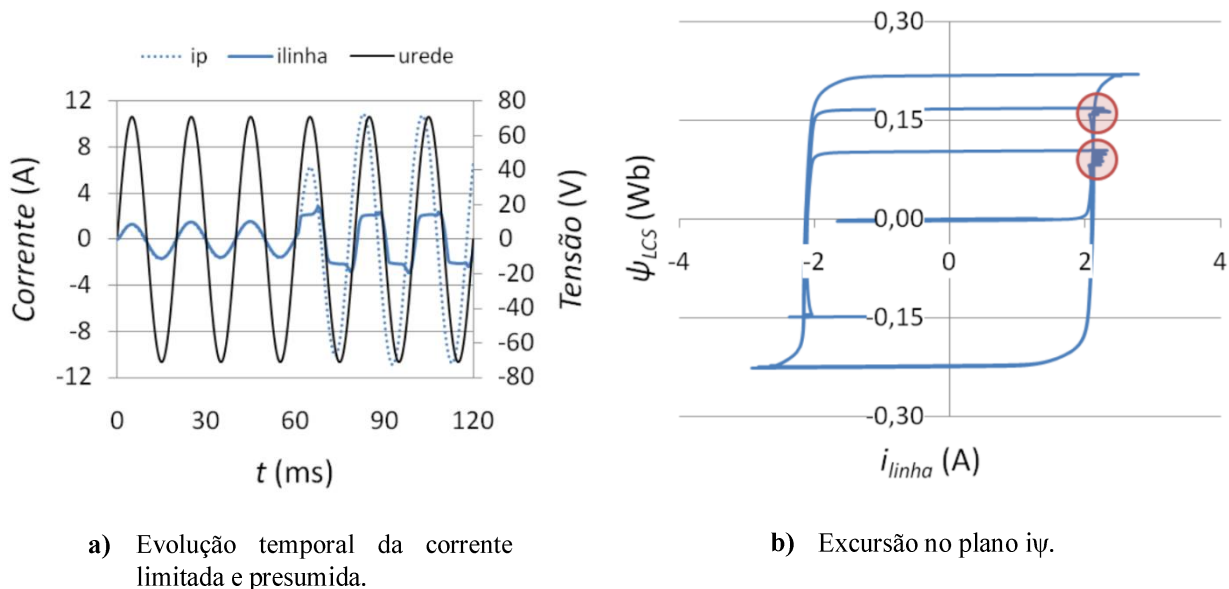


Figura 4.12 - Resultados da simulação, com o Flux2D, para uma impedância de rede representada por um RLC, com falha no instante $t = 61$ ms. Retirado de (Pina, 2010).

Relativamente à simulação recorrendo ao modelo LCSi, observa-se que o resultado da simulação é praticamente idêntico ao ensaio original. Refira-se que neste ensaio computacional, o tempo de simulação continuou a não ultrapassar os trinta segundos, o que vem a comprovar a eficácia do modelo, sem no entanto, perder fiabilidade no mesmo. A evolução temporal da corrente e do fluxo ligado durante o ensaio pode ser analisado em mais detalhe de acordo com a Figura 4.14.

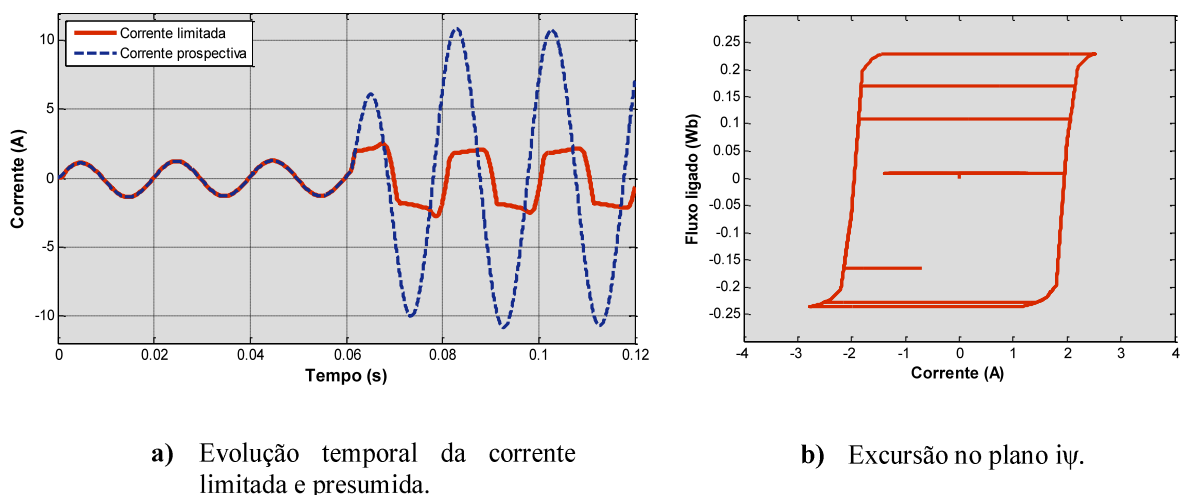


Figura 4.13 - Resultados da simulação, com bloco LCSi, em Simulink, para uma impedância de rede representada por um RLC e falhas no instante $t = 61$ ms.

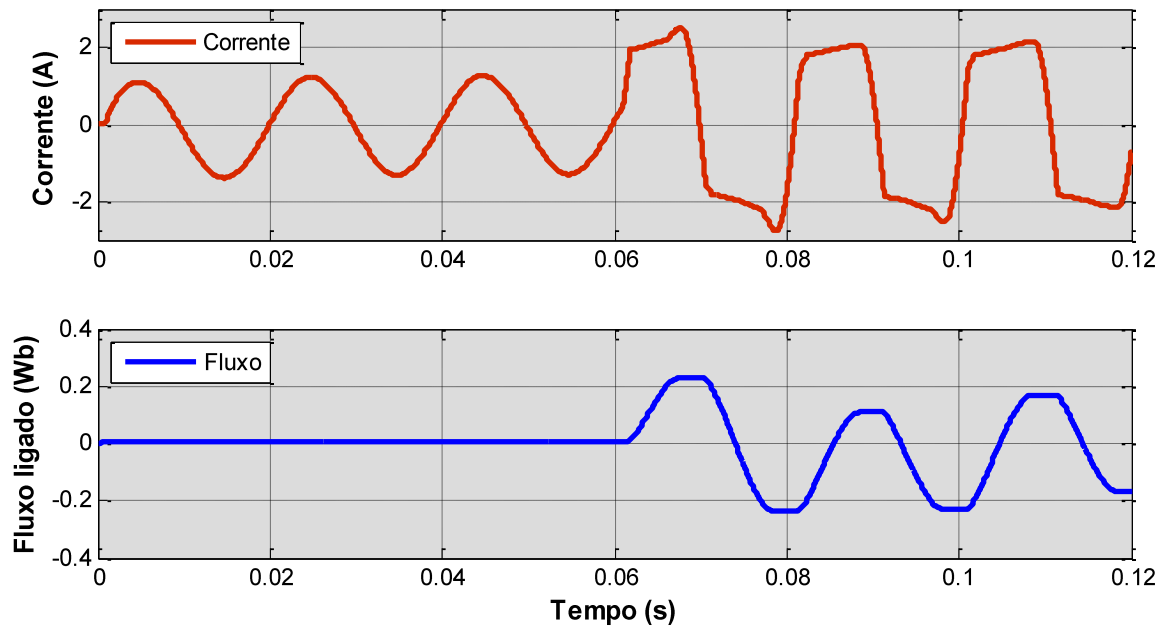


Figura 4.14 - Evolução temporal da corrente e fluxo ligado do dispositivo LCSi, para uma impedância de rede representada por um RLC e falha no instante $t=61$ ms.

Mais uma vez, evidencia-se o facto de que, em cada caso, houve a necessidade de ajustar a tolerância relativa do algoritmo de solução, para que os ensaios pudessem ser reproduzidos no modelo computacional desenvolvido.

4.4 Aplicação do LCSi em Circuito Trifásico

Os limitadores de corrente supercondutores trifásicos, podem ser formados por três módulos monofásicos ou podem ter um desenho trifásico puro. Neste trabalho foi utilizado o esquema trifásico através de três modelos monofásicos, motivo pelo qual as fases não irão relacionar-se entre si. Da mesma forma que na simulação anterior, também se submeteu o bloco LCSi a um circuito que simulasse uma rede trifásica simples (Figura 4.12).

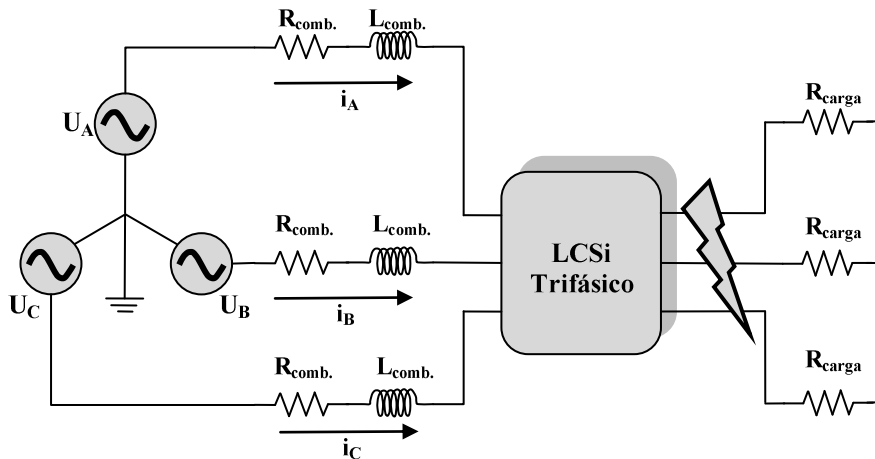


Figura 4.15 – Circuito trifásico de ensaio do LCSi.

De maneira a diversificar os ensaios ao LCSi, foi aplicada ao circuito uma tensão composta eficaz de 100 V. Isto significa que as correntes em condições normais serão ligeiramente mais baixas, assim como as correntes presumidas de falha também. Em caso de replicação do ensaio ao circuito monofásico, seria necessário aplicar à fonte trifásica uma tensão composta de valor $122,47 V_{ef}$ (Equação 4.2). Os restantes parâmetros do circuito trifásico foram os mesmos utilizados na simulação do circuito monofásico, motivo pelo qual o circuito é semelhante, porém replicado às 3 fases. A fonte trifásica é ligada em estrela e internamente conectada à terra e ao neutro, simultaneamente. É de salientar uma vez mais o facto de que o ramo formado pela resistência R e indutância L, em série com a fonte, irá simular simultaneamente a impedância do gerador e a impedância da linha de transmissão.

$$\frac{\sqrt{\quad}}{\quad} - \sqrt{\quad} -$$

O modelo de simulação computacional desenvolvido em Simulink pode ser observado na Figura 4.13. Foi aplicado um bloco específico da biblioteca SimPowerSystem, o qual realiza diversos tipos de CC. Desta forma, evitou-se a utilização de interruptores em cada fase, simplificando o esquema do modelo computacional. Além disso, possibilita a escolha de qualquer tipo de CC de forma rápida e fácil.

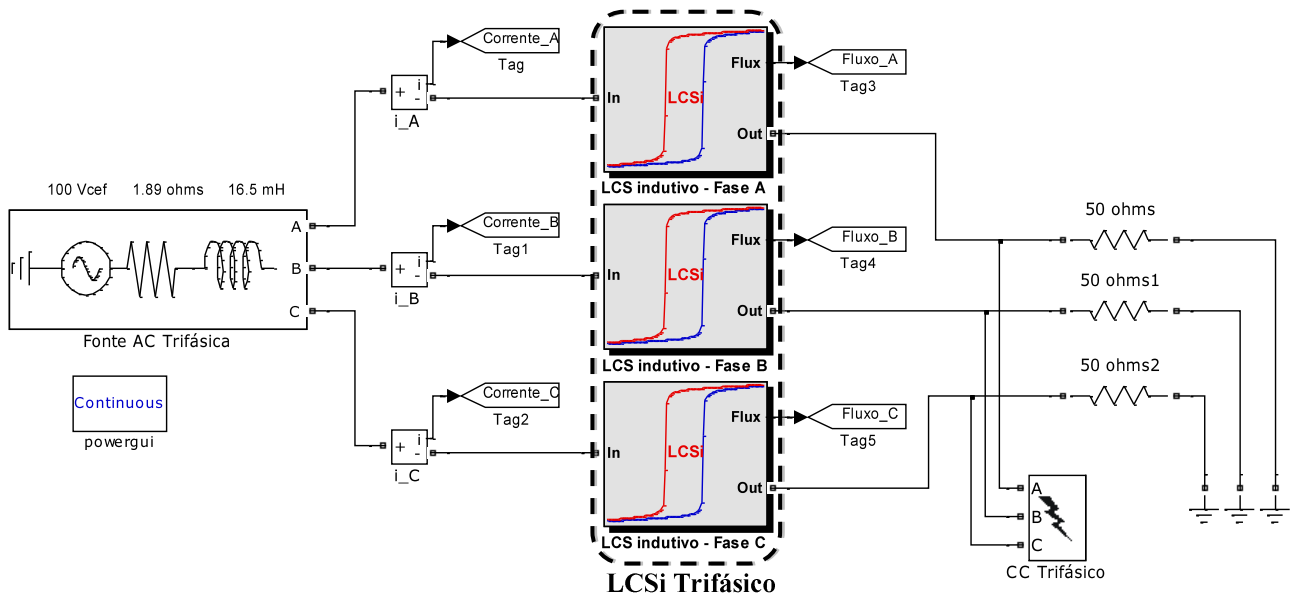


Figura 4.16 - Modelo computacional do LCSi trifásico inserido em circuito trifásico.

Tal como referido no subcapítulo 2.2.4, existem diversos tipos de CC numa rede trifásica (Figura 4.13). De modo a verificar o comportamento do LCSi, foi necessário simulá-lo para cada caso individualmente. No entanto, apenas será representado um exemplo para cada tipo de CC, uma vez que, existem diversas possibilidades de combinação entre as fases o que tornaria este capítulo extenso e demasiado repetitivo.

Em seguida serão apresentados os resultados das simulações do circuito mediante os seguintes CC:

- Curto-circuito Fase-Fase;
- Curto-circuito Fase-Terra;
- Curto-circuito Fase-Fase-Terra;
- Curto-circuito Trifásico Puro;
- Curto-circuito Trifásico com Terra.

4.4.1 Curto-Circuito Fase – Fase

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados da simulação do circuito trifásico sob o efeito de um CC entre a fase A e a fase B. O comportamento dinâmico do dispositivo é então simulado a partir da evolução da corrente e do fluxo no plano iy e limitado pelo respetivo ciclo de histerese máximo (Figura 4.14). Denota-se que a fase A abrange a parte superior do ciclo de histerese enquanto a fase B, o contrário. Este comportamento depende basicamente da evolução da corrente (se é crescente ou decrescente) no instante em que o CC é ativado. Verifica-se também o fluxo remanescente após a desativação do CC (linhas horizontais incompletas).

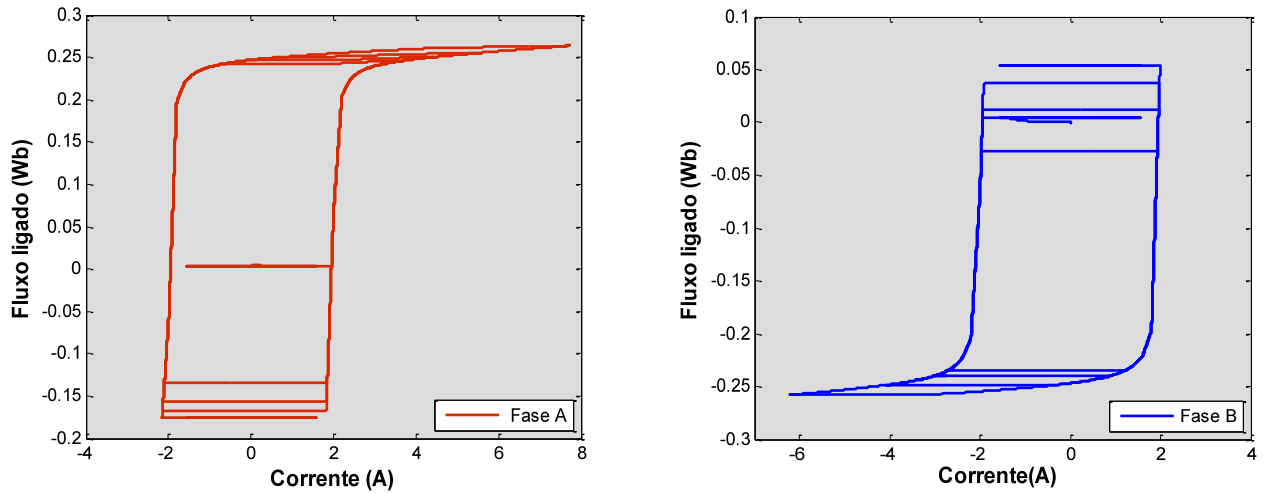


Figura 4.17 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo fase-fase.

A comparação entre a corrente limitada e a corrente presumida pode ser verificada na Figura 4.15. Dado que o CC é exclusivamente entre 2 fases e a construção do modelo não é trifásica pura, a fase C permanece inalterada durante o ensaio computacional. A corrente da fase A, atinge um pico máximo positivo de 7,7 A enquanto a fase B alcança um limiar negativo inferior (-6,2 A). As correntes expectáveis sem o bloco LCSi seriam de 17,3 A e -16 A, respetivamente. A corrente crítica de ativação do LCSi, I_{crit} , permanece inalterada (1,98 A) no entanto, as correntes em condição normal de funcionamento não ultrapassam o valor de 1,6 A.

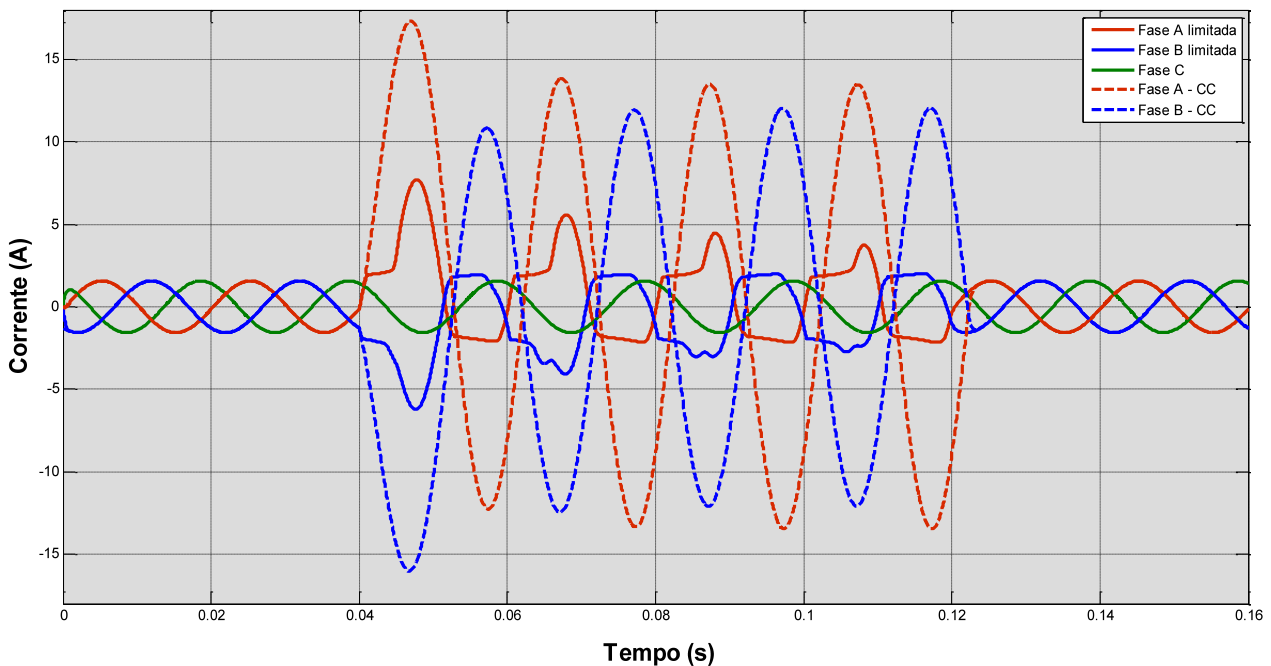


Figura 4.18 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospetivas sob o efeito de um CC do tipo fase-fase.

4.4.2 Curto-Circuito Fase – Terra

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados da simulação sob o efeito de um CC entre a fase C e a terra. Para este tipo de CC evitou-se selecionar a fase A devido à semelhança dos resultados com a simulação do LCSi inserido num circuito monofásico (subcapítulo 4.3.1). A corrente é decrescente no instante a seguir à ativação do CC e portanto atinge o seu pico máximo em valores negativos (parte inferior do ciclo de histerese). A excursão do ponto de operação no plano $i\psi$ é análoga aos casos anteriores e a taxa de limitação chega a ser, em média, aproximadamente 80% inferior à corrente expectável de CC (Figura 4.16 e Figura 4.17).

Figura 4.19 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo fase-terra.

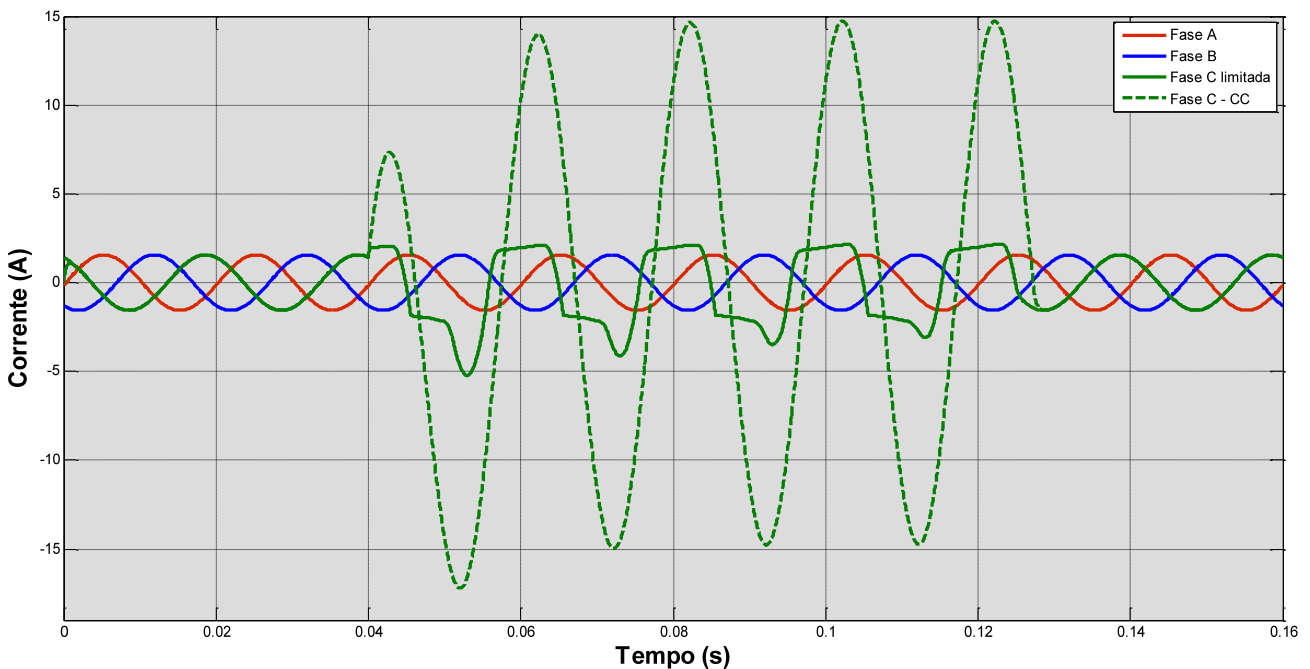
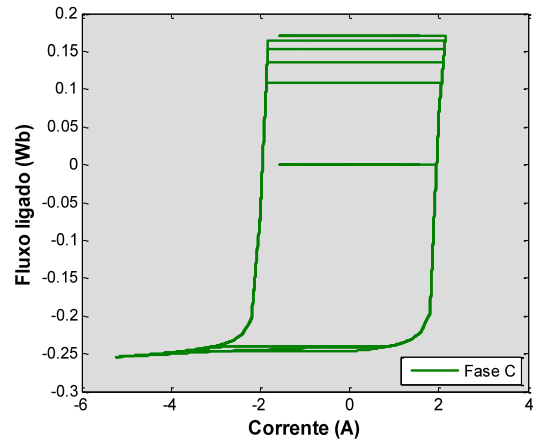


Figura 4.20 - Evolução temporal da correntes limitada e prospetiva sob o efeito de um CC do tipo fase-terra.

4.4.3 Curto-Circuito Fase – Fase – Terra

A seguir serão analisados os resultados obtidos do ensaio computacional do circuito trifásico sob influência de um CC entre a fase A, a fase C e a terra. Constata-se na Figura 4.18 que este tipo de falha apresenta uma corrente de pico superior à situação prévia o que reflete numa maior gravidade em caso de ocorrência em redes reais.

Relativamente à fase A, a corrente limitada no primeiro período de CC atinge 10,1 V face aos 19,8 V expectáveis sem o LCSi (taxa de limitação equivalente a 50% aproximadamente). O elevado crescimento de corrente resulta num ponto de operação mais acentuado na parte superior do ciclo de histerese (Figura 4.19). De facto, ao alcançar I_{CC} (parâmetro do limitador) a excursão no plano $i\psi$ quase que forma o ciclo de histerese máximo do limitador.

As correntes estabilizam-se após a segunda onda limitada e tendem a ficar simétricas. O resultado da fase C comprova ser significativamente semelhante ao subcapítulo 4.3.2 e a taxa de limitação permanece 80% inferior às correntes presumidas de CC.

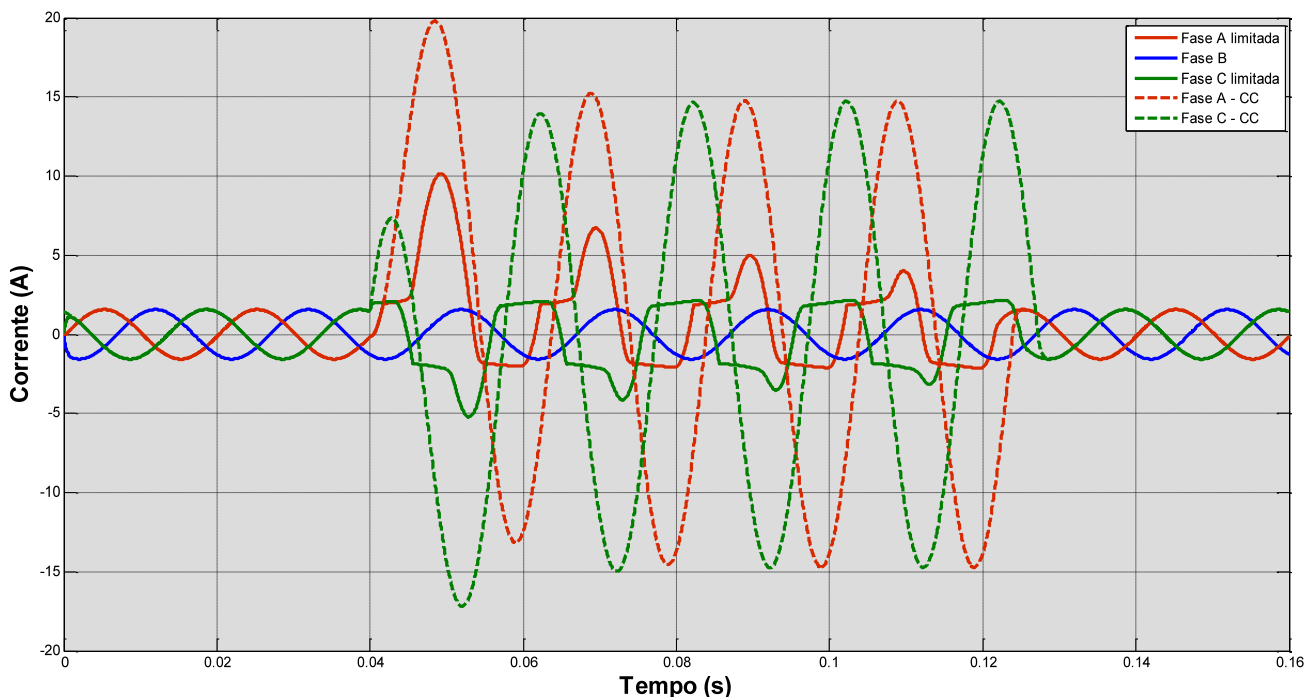


Figura 4.21 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospectivas sob o efeito de um CC do tipo fase-fase-terra.

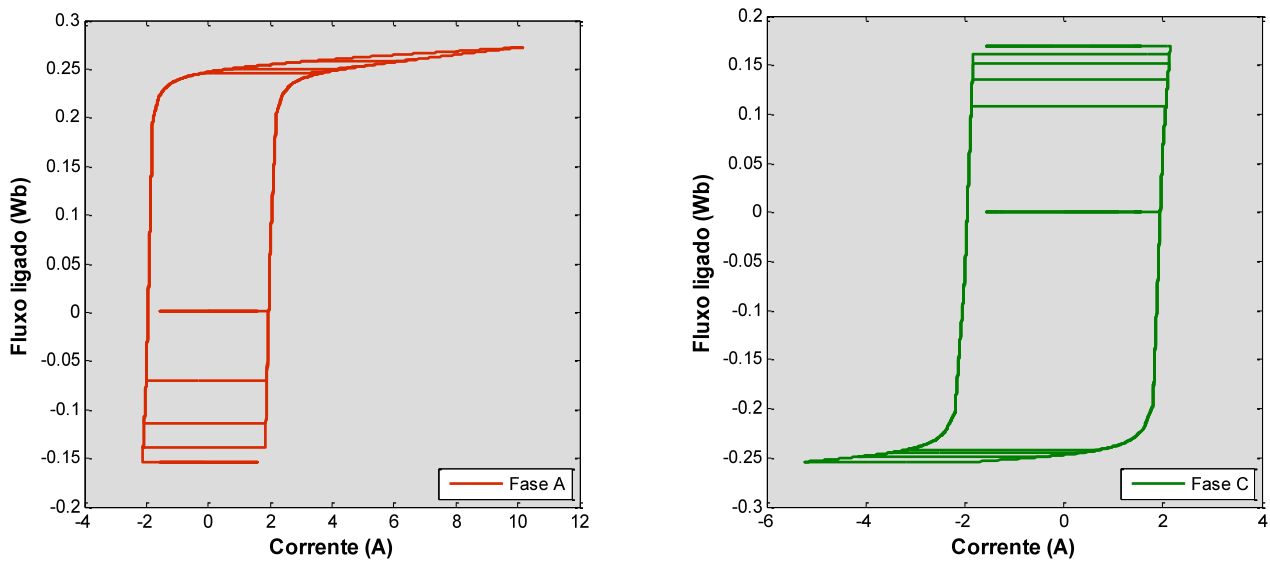


Figura 4.22 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo fase-fase-terra.

4.4.4 Curto-Circuito Trifásico sem Ligação à Terra

Nesta secção serão apresentados os resultados da simulação sob o efeito de um CC entre as três fases e sem ligação à terra. Observa-se na Figura 4.20 que a corrente prospectiva da fase A também alcança os 19,8 A, no entanto, o LCSi consegue limitar mais eficazmente a mesma, alcançando o máximo de 8,8 A (taxa de limitação equivalente a 55% aproximadamente). As restantes fases não atingem patamares de corrente tão elevados o que resulta em taxas de limitações ligeiramente superiores (em média, 70%).

As respetivas excursões de correntes e fluxos de cada fase podem ser verificadas na Figura 4.21. Uma pequena perturbação no instante inicial da simulação originou numa diferença de fluxo próximo ao ponto (0,0) a qual foi restabelecida logo de imediato. Observa-se que o fluxo remanescente da fase A permanece na parte inferior do ciclo de histerese uma vez que o fluxo ligado era negativo quando o circuito retornou às condições normais de operação. O mesmo sucedeu com a fase B enquanto a fase C obteve um fluxo remanescente de valor positivo.

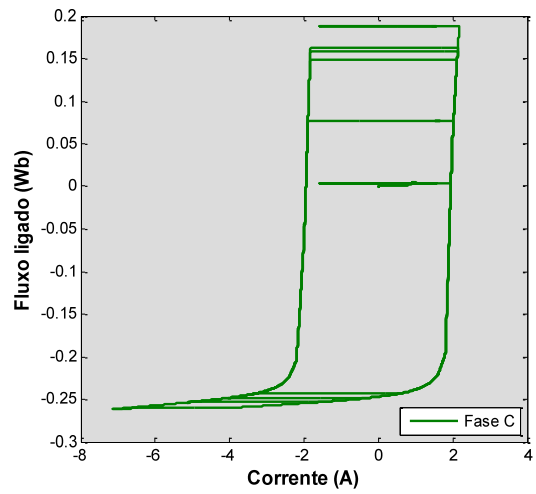
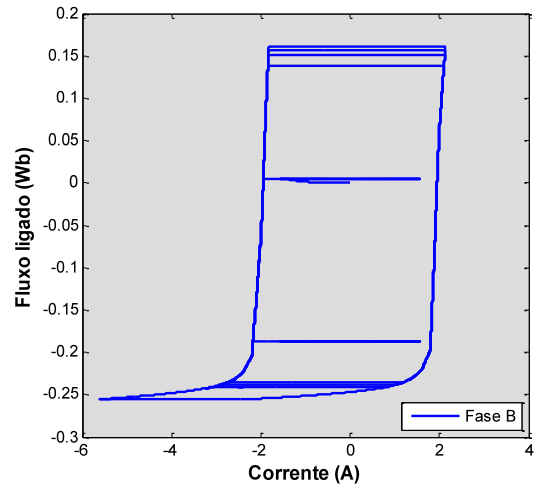
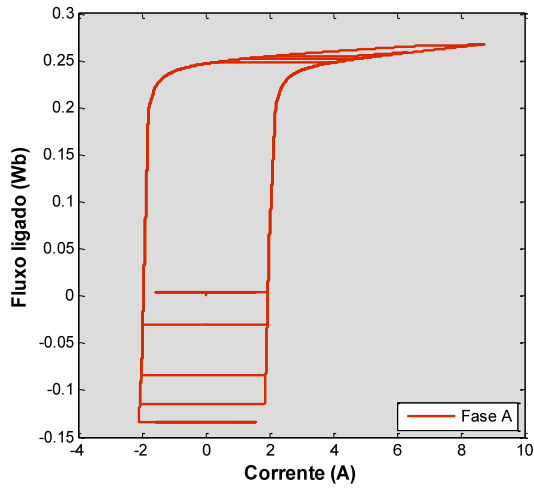


Figura 4.23 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo trifásico, sem ligação à terra.

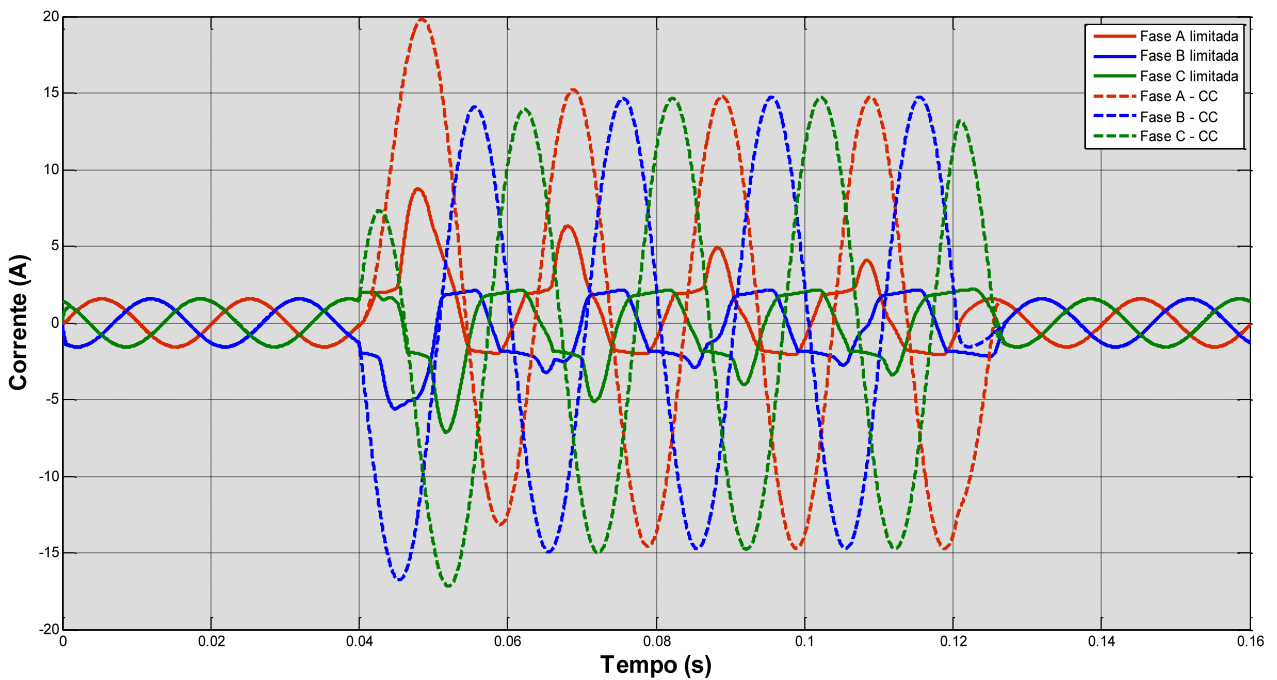


Figura 4.24 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospetivas sob o efeito de um CC do tipo trifásico, sem ligação à terra.

4.4.5 Curto-Circuito Trifásico – Terra

Procede-se por último à análise do ensaio computacional da rede sob influência de um CC trifásico com ligação à terra. Mais uma vez, verifica-se que a corrente máxima presumida da fase A atinge os 19,8 A enquanto a corrente máxima limitada ronda os 10 A (Figura 4.22). Nas ondas posteriores há uma atenuação do pico de corrente o que permite alcançar uma taxa de limitação aproximadamente 73% inferior. As restantes fases também apresentam uma taxa de limitação aproximadamente 70% inferior e tendem a atenuar mais rapidamente.

Observa-se também que após o primeiro período de onda limitada as correntes prospetivas tendem a ficar simétricas. Tal como nas simulações anteriores, o comportamento dinâmico do dispositivo face este tipo de CC é então caracterizado a partir da excursão da corrente e do fluxo no espaço limitado pelo referido ciclo máximo, assim como mostra a Figura 4.23.

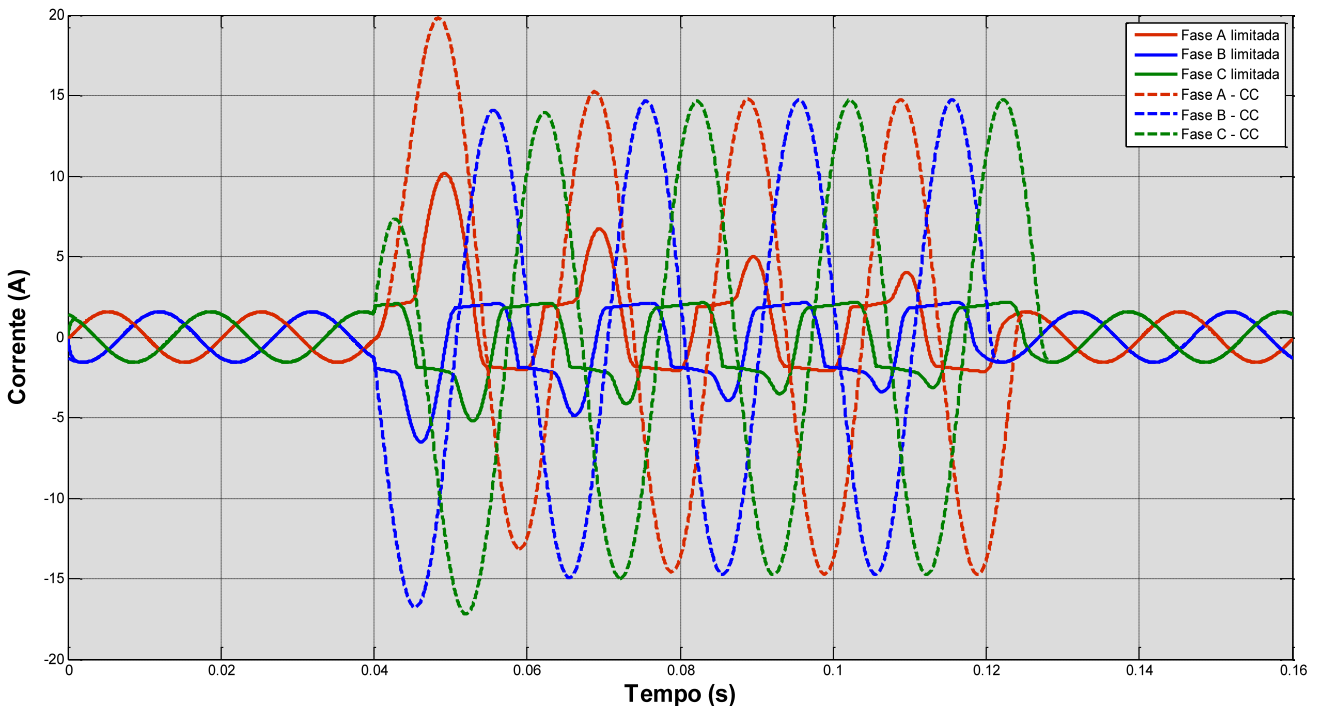


Figura 4.25 - Evolução temporal das correntes limitadas e prospetivas sob o efeito de um CC do tipo trifásico, com ligação à terra.

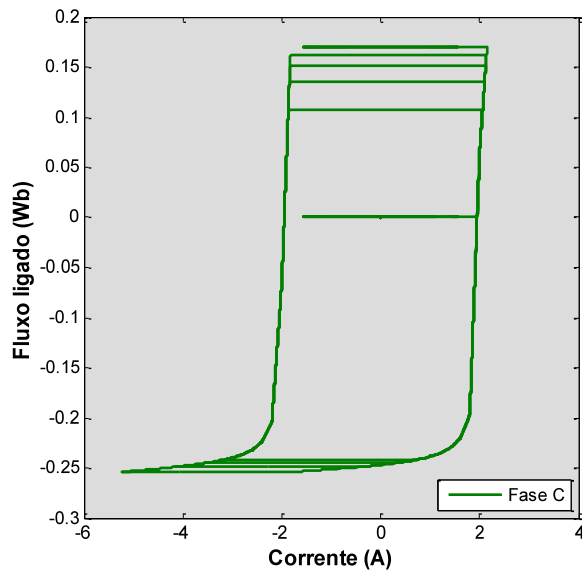
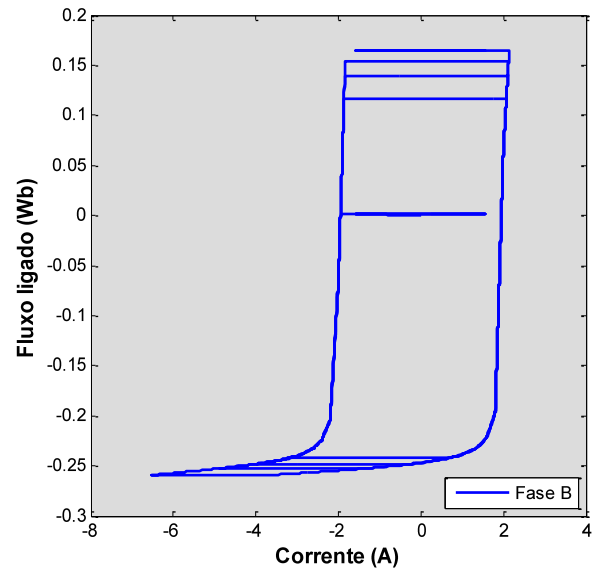
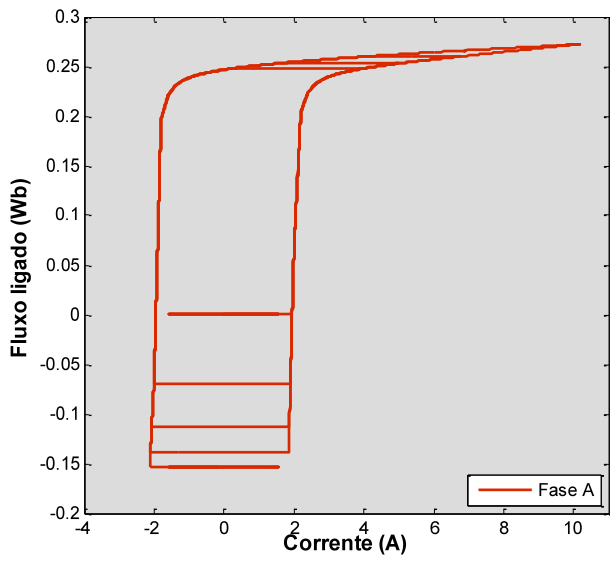


Figura 4.26 - Excursão do ponto de operação do LCSi trifásico, no plano $i\psi$, sob efeito de um CC do tipo trifásico, com ligação à terra.

4.5 Síntese e Conclusões

Ao longo deste capítulo foram apresentados os resultados das simulações referentes ao modelo computacional desenvolvido.

Numa primeira fase, submeteu-se o LCSi a um circuito monofásico cuja finalidade era analisar se os elevados picos de corrente de CC eram devidamente limitados pelo bloco. De maneira a confirmar a fiabilidade do modelo, tentou-se reproduzir ensaios obtidos na literatura (Pina, 2010). Concluiu-se que há a possibilidade de haver ligeiros atrasos na desativação do LCSi, no entanto, o mesmo não se sucede no momento da ativação do limitador. Desta forma, o modelo computacional mantém o circuito seguro de possíveis picos de correntes e garante a segurança da rede.

De seguida, ensaiou-se uma rede trifásica cujo LCSi (trifásico) era constituído por três módulos monofásicos. Nesta situação, foram realizados diversos tipos de CC para que fosse possível analisar o comportamento do modelo computacional. Como verificado na secção 2.3.4, os piores casos possíveis de CC são os trifásicos, o que se comprova ao observar as elevadas correntes prospetivas nas simulações realizadas. Além disso, é de extrema importância observar o caso do CC fase-terra sabendo-se que é o mais propenso a ocorrer nas redes energéticas.

Mesmo sem inviabilizar a fiabilidade das simulações, notaram-se pequenas perturbações numa das fases dos ensaios de CC sem ligação à terra. Foram utilizados na totalidade das simulações do circuito trifásico os mesmos parâmetros de afinação (erros de tolerância, tamanho máximo de passo e constante), o que pode ter resultado numa indevida afinação específica em determinados casos. Mais uma vez, demonstra-se a necessidade de afinação entre diferentes ensaios, o que torna uma possível limitação do modelo computacional desenvolvido.

No que diz respeito ao funcionamento do bloco LCSi, observou-se que o comportamento de limitação e valores de pico alcançados durante as limitações, dependem quase que exclusivamente do instante em que o CC é ativado na onda. O comportamento dinâmico do dispositivo é então simulado a partir da excursão da corrente e do fluxo no espaço limitado pelo referido ciclo.

Capítulo

5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Motivado pela crescente investigação no ramo dos LCS, esta dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo computacional de simulação do LCS indutivo, de blindagem magnética. De facto, foi demonstrado na literatura a existência de modelos atuais para a simulação dos mesmos, nomeadamente, o programa de simulação por elementos finitos, Flux2D. Apesar dos resultados fiáveis e precisos, as simulações demonstraram ser demasiado morosas, alcançando a ordem dos dias para simulações de períodos de 120 ms. A aplicação da modelização baseada no ciclo de histerese máxima, associado a métodos iterativos de simulação (Método de Euler, por exemplo) veio a resolver esta situação, uma vez que realizava as mesmas simulações que o Flux2D em períodos consideravelmente inferiores. Esta metodologia mostrou-se bastante eficaz na resolução de redes simples, no entanto, é quase impraticável na simulação de redes complexas, com diversas cargas e fontes.

Neste contexto, surge a conceção do modelo computacional baseado em Matlab/simulink. O principal interesse desta metodologia assenta no facto da simplicidade com que se podem planear e simular limitadores testando diferentes núcleos de ferro, materiais supercondutores, espiras do primário, ou mesmo redes de diferentes parâmetros, o que será sem dúvida, valorizado em aplicações comerciais. De facto, o modelo computacional do LCSi simula o comportamento dinâmico do dispositivo a partir da excursão da corrente e do fluxo no espaço limitado pelo referido ciclo de histerese, sendo possível a rápida inserção dos parâmetros construtivos de um LCS na sua janela de configurações.

Referente aos tempos de simulação, verificou-se que o modelo desenvolvido nunca excedeu um minuto de simulação, para cada ensaio. Apesar de não ser tão rápido quanto a simulação por métodos iterativos, traz a vantagem de poder realizar facilmente as alterações que se pretender, sem o manuseio de equações matemáticas ou códigos iterativos. Em relação ao Flux2D, é incomparavelmente mais rápido que o mesmo, o que soluciona esta problemática.

Como foi possível verificar através das simulações, a fiabilidade do modelo é satisfatória, apresentando em alguns casos, pequenas perturbações que não interferem demasiado no ensaio de redes. Tais perturbações baseiam-se na constante necessidade de afinações das tolerâncias do algoritmo de solução do Simulink, assim como dos parâmetros específicos do modelo. A solução para resolver esta dificuldade pode remeter ao aperfeiçoamento da lógica de comutação de estados do modelo LCSi. Assim, como trabalho futuro, é possível rever estas condições do bloco, no que diz respeito à lógica de comutação, permitindo desta maneira uma transição de estados mais eficaz e fidedigna.

Na continuação do trabalho desenvolvido nesta dissertação, seria uma mais-valia a inserção e análise de comportamento do LCSi em casos de redes complexas reais. De modo a otimizar o modelo desenvolvido, também seria possível realizar testes em modo discreto, o que possivelmente, iria reduzir os períodos de simulação, principalmente em casos de maior dimensão e complexidade.

Numa perspetiva futura, também se poderia proceder à conceção de modelos de LCSi trifásicos puros, o que tornaria o modelo computacional mais aplicável a escalas reais e à simulação da mesma. Outra sugestão, seria o desenvolvimento de modelos através do programa de simulação PSCAD.

Bibliografia

- Afonso, J. L., Martins, J. S. (2004) Qualidade da Energia Eléctrica. Revista o Eletricista, 9:66-71.
- Aly, M., Mohamed, E. (2012) Comparison between resistive and inductive superconducting fault current limiters for fault current limiting. Computer Engineering & Systems (ICCES), Seventh International Conference, 227-232.
- Arsénio, P. M. (2012) Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223. Dissertação de Mestrado (Engenharia Electrotécnica e de Computadores). Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Bäumel, K., Kaltenborn, U. (2011) Inductive Shielded Superconducting Fault Current Limiter - A New Cost Effective Solution for Industrial Network Applications. Germany: Schneider.
- Branício, P.S. (2001) Introdução à Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB₂: Uma Abordagem Didática. Revista Brasileira de Ensino de Física, 23(4): 381-390.
- Cai, y., Okuda, S., Odake, T., Yagai, T., Tsuda, M., Hamajima, T. (2010) Study on Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 20(3): 1127-1130
- Catalão, R.J.C.F.C. (2013) Desenvolvimento de um Sistema de Detecção de Quench baseado em Campo Magnético. Dissertação de Mestrado (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- CCAS (Coalition for the Commercial Application of Superconductors) (2009) Superconductivity, Present and Future Applications. (Disponível em http://www.ccas-web.org/pdf/ccas_brochure_web.pdf. Consultado a 12/09/14)
- Costa, M.B.S., Pavão, A.C. (2012) Supercondutividade: um século de desafios e superação. Revista Brasileira de Ensino de Física, 34(2): 2602 – 2615.
- Darie, E., Darie, E. (2007) Fault Current Limiters Based on High Temperature Superconductors. Electric Fuses and Their Applications. ICEFA, 8th International Conference on IEEE, 69-73.
- Decreto de Lei nº 297/1984 – 26 de Dezembro de 1984- DIÁRIO DA RÉPÚBLICA - I SÉRIE – nº 90. Ministério da Indústria e Energia e do Equipamento Social.

- Ferreira, B.A. (2013) Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética. Dissertação de Mestrado (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Freitas, T. R., Henrique, H. F., Fardin, J. F., Orlando, M. T., Simonetti, D. S. (2009) Um Modelo Simples e Eficaz para Simulação de um Limitador de Corrente de Falta Supercondutor. VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia elétrica.
- Gor, V., Povh, D., Lerch, E. (2004) SCCL: a new type of Facts based short-circuit current limiter for application in high-voltage systems. Paper B4-209, CIGRE, Session, Paris.
- Gupta, V., Trivedi, N.B., Buch, N.J. (2010) Solid State Eletronic Fault Current Limiter to Limit the Fault Current in Power System. National Power Electronic Conference.
- Janowski, T., Wojtasiewicz, G., Kondratowicz-Kucewicz, B., Kozak, S., Kozak, J., Majka, M. (2009) Superconducting Winding for Inductive Type SFCL Made of HTS Tape With Increased Resistivity. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3): 1884-1887.
- Junior, A. E. (2011) Uma contribuição ao estudo de Limitadores de Corrente elétrica Supercondutores usando transformador e fita supercondutora de alta temperatura crítica. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Kozak, J., Janowski, T., Kozak, S., Wojtasiewicz, G., Glowacki, B. (2006) Tests results and analysis of inductive superconducting fault current limiter with Bi-2223 tube and HTS tape as secondary winding. *Journal of Physics:Conference Series*, 43: 946–949.
- Kovalsky, L., Yuan, X., Tekletsadik, K., Keri, A., Bock, J., Breuer, F. (2005) Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15: 2130-2133.
- Lamchich, M.T., Lachguer, N. (2012) Matlab Simulink as Simulation Tool for Wind Generation Systems Based on Doubly Fed Induction Machines. *Edited by Vasilios N. Katsikis*, 139-160.
- Lázaro, F. D. (2009) Estudo e Simulações do Dispositivo Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor. Dissertação de Mestrado (Engenheiro Eletricista). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Majoros, M., Jansák, L., Sello, S., Zanella, S. (1997) Transient Analysis of HTS Inductive Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7(2): 989-992.
- MathWorks Documentation Center (2014)
(Disponível em <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/index.html>. Consultado a 7/03/14).

- MathWorks Inc. (2014) Simulink User's Guide. Matlab&Simulink, versão r2014a.
- Metz-Noblat, B., Dumas, F., Thomasset, G. (2005) Calculation of Short Circuit Currents. Cahier technique, 158.
- Moriconi F., Usoskin A., Hnning A., Schimdt S., Bäuml, K., Janetschek T. (2012) 5 LB-05 Inductive Shielded superconducting fault current limiter:test results for scaled model. ASC. Bruker. (Disponível em <http://pt.slideshare.net/FrancoMoriconi1/i-sfel-asc2012public>. Consultado a 8/05/14).
- Paiva, J. P. (2011) Redes de Energia Elétrica: Uma Análise Sistémica. 3ª Edição: IST Press, 1-774.
- Pina, J. M. (2010) Desenho e Modelização de Sistemas de Energia empregando materiais supercondutores de alta temperatura. Tese de Doutoramento (Engenharia Eletrotécnica). Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Puret, C. (1992) Distribution Networks Throughout the World. Cahier Technique Merlin Gerin, 155.
- Samah, N.A. A., Abdullah, W.N.W. (2010) Application of Superconducting Fault Current Limiter in Power System. The 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 325-330.
- Santos, V.M. (2009) Estudo de Caso de um Curto-Circuito em um Sistema Elétrico Industrial. Dissertação para obtenção de Licenciatura (Engenheiro Electricista). Universidade de São Paulo.
- Schmitt, H. (2006). Fault current limiters report on the activities of CIGRE WG A3.16. Power Engineering Society General Meeting, IEEE.
- Schmitt, H., Amon, J., Braun, D., Camescasse, F. X., Collet, M., Damstra, G. C., et al. (2003). Fault Current Limiters: Report on the Activities of CIGRE WG A3.10. CIGRE, Working Group 13.10.
- Sena, C. V. (2011) Ensaio de um módulo Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor. Dissertação de Licenciatura (Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Silva, F. R. (2010) Efeito da Relaxação de Fluxo Magnético na Força de Levitação em Mancais Supercondutores. Dissertação para obtenção de Licenciatura (Engenheiro Electricista). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Silva, T. A. S. (2013) Construção, ensaio e modelização de um limitador de corrente supercondutor. Dissertação Mestrado (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de Ciências e Tecnologia.

- Sybille, G., Brunelle, P., Giroux, P., Casoria, S., Gagnon, R., Kamwa, I., Roussel, R., Chamagne, R., Dessaint, L., Lehuy, H. (2003) SimPowerSystems For Use with Simulink. SimPowerSystems User's Guide, versão 3.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V. (2007) Thermal regimes of HTS cylinders operating in devices for fault current limitation. *Superconductor Science and Technology*, 20: 457–462.
- Sousa, W. T., Polasek, A., Dias, R., Junior, R. A. (2012) Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores: principais conceitos e testes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 34(4): 4313-4313.
- Stavrev, S. (2002) Modelling of High Temperature Superconductors for AC Power Applications. Ph. D. Thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Tinkham, M. (1996) Introduction to Superconductivity. Second Edition, Dover Publications.
- Vilhena, N. M. (2012) Construção e Ensaio de Um Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados. Dissertação de Mestrado (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Zaneta Jr., L., Pereira, C., Campos, V., Santos, R. (2007) Aplicação de Dispositivos para Limitação de Correntes de Curto-Circuito. Projeto 0068-012/2007 . Artigo Técnico CTEEP.
- Yamaguchi, H., Kataoka, T. (2008) Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter With Shunt Impedance and Inductive Load. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18(2): 668-671.

Anexos

Anexo 1 – Ficheiro do Matlab “cicloHistereseMax.m”.

```
clear;
clc;
close;

%Ciclo de Histerese Máximo para Limit. de Corrente SC de Núcleo Fechado

%Determinação de Parâmetros:
a= 7.3421E-6;
b= 6.2343;
c= 457.8311;
d= 25.1627;

Icc1= 10;
Isat= 694;
N= 350;

%Onda Sinusoidal de amplitude 50A:

f=50;
T=1/f;
passo= T/5000; % 5000 amostras por periodo
t=0:passo:2*T;

il= 50*sin(2*pi*f*t);

figure(1)
plot(t,il)

%Equações Auxiliares:

Af=(Isat/N)/(cos((pi/2)*((Isat/N)/Icc1)));
Bf=(pi/2)*(1/Icc1);

f= Af*cos(Bf*il);

%Fluxo ligado em função da corrente de linha:

psi= a*N*il + (b*N*il)./(c+d*N*abs(il));

figure(2)
plot(t,psi)

%Ramo Ascendente:

lambAsc= a*N*(il-f) + (b*N*(il-f))./(c+d*N*abs(il-f));

%Ramo Descendente:

lambDesc = a*N*(il+f) + (b*N*(il+f))./(c+d*N*abs(il+f));

%Gráfico do Ciclo de Histerese Máximo

figure(3)
handle=plot(il,psi,il,lambAsc,il,lambDesc)
set(handle,'LineWidth',[2])
title('Ciclo de Histerese Máximo para LSC do tipo Indutivo')
xlabel('Corrente no Primário [A]')
ylabel('Fluxo ligado [Wb]')
legend('Característica','Ramo Ascendente','Ramo Descendente',4);
axis([-11,11,-0.35,0.35])
grid
```

Anexo 2

Tabela 7.1 - Tabela desenvolvida em Excel para construção do ciclo de Histerese máximo.

Corrente [A]	Fluxo [Wb]	f(i)	Fluxo(Asc)	Fluxo(Desc)
-10	-0,27201	0,00000	-0,27201	-0,27201
-9,5	-0,27065	0,16344	-0,27110	-0,27021
-9	-0,26929	0,32587	-0,27018	-0,26840
-8,5	-0,26793	0,48629	-0,26926	-0,26659
-8	-0,26655	0,64371	-0,26832	-0,26476
-7,5	-0,26516	0,79716	-0,26737	-0,26291
-7	-0,26375	0,94570	-0,26640	-0,26104
-6,5	-0,26233	1,08841	-0,26540	-0,25914
-6	-0,26088	1,22441	-0,26438	-0,25719
-5,5	-0,25940	1,35286	-0,26333	-0,25518
-5	-0,25789	1,47296	-0,26225	-0,25306
-4,5	-0,25632	1,58399	-0,26113	-0,25075
-4	-0,25469	1,68525	-0,25995	-0,24810
-3,5	-0,25296	1,77612	-0,25873	-0,24477
-3	-0,25108	1,85604	-0,25745	-0,23977
-2,5	-0,24897	1,92452	-0,25608	-0,22855
-2	-0,24646	1,98113	-0,25463	-0,06598
-1,5	-0,24315	2,02553	-0,25305	0,22665
-1	-0,23792	2,05744	-0,25131	0,23870
-0,5	-0,22556	2,07666	-0,24931	0,24374
0	0,00000	2,08308	-0,24691	0,24691
0,5	0,22556	2,07666	-0,24374	0,24931
1	0,23792	2,05744	-0,23870	0,25131
1,5	0,24315	2,02553	-0,22665	0,25305
2	0,24646	1,98113	0,06598	0,25463
2,5	0,24897	1,92452	0,22855	0,25608
3	0,25108	1,85604	0,23977	0,25745
3,5	0,25296	1,77612	0,24477	0,25873
4	0,25469	1,68525	0,24810	0,25995
4,5	0,25632	1,58399	0,25075	0,26113
5	0,25789	1,47296	0,25306	0,26225
5,5	0,25940	1,35286	0,25518	0,26333
6	0,26088	1,22441	0,25719	0,26438
6,5	0,26233	1,08841	0,25914	0,26540
7	0,26375	0,94570	0,26104	0,26640
7,5	0,26516	0,79716	0,26291	0,26737
8	0,26655	0,64371	0,26476	0,26832
8,5	0,26793	0,48629	0,26659	0,26926
9	0,26929	0,32587	0,26840	0,27018
9,5	0,27065	0,16344	0,27021	0,27110
10	0,27201	0,00000	0,27201	0,27201

a	7,34E-06
b	6,23
c	457,8311
d	25,1627

N	350
lcc	10
lsat	694

Af	2,08308
Bf	0,15708

Anexo 3 – Comandos de inicialização do bloco LCSi.

```
%Definicao dos Parametros construtivos
%(Recebe os valores do LCSi e envia para o EXCEL)
xlswrite('caract_Histerese2.xlsx',a,'Folha1','C2');
xlswrite('caract_Histerese2.xlsx',b,'Folha1','C3');
xlswrite('caract_Histerese2.xlsx',c,'Folha1','C4');
xlswrite('caract_Histerese2.xlsx',d,'Folha1','C5');
xlswrite('caract_Histerese2.xlsx',N,'Folha1','F2');
xlswrite('caract_Histerese2.xlsx',Isat,'Folha1','F4');
xlswrite('caract_Histerese2.xlsx',Icc,'Folha1','F3');

%Definicao do ciclo de histerese
%(Recebe o ciclo de histerese calculado pelo EXCEL)
sat = xlsread('caract_Histerese2.xlsx','Folha1','B209:C409');
sat2=xlsread('caract_Histerese2.xlsx','Folha1','E9:F409');

% Completa a parte negativa da característica de saturação
[npoints,ncol]=size(sat);
sat1=[sat ; -sat(2:npoints,:)];
sat1=sort(sat1);

% Vector de Corrente (A) e vector de fluxo (Wb)
Current_vect=sat1(:,1);
Flux_vect=sat1(:,2);

% Vector de Fluxo Ascendente(Wb) e Fluxo Descendente(Wb)
Flux_Asc = sat2(:,1);
Flux_Desc = sat2(:,2);

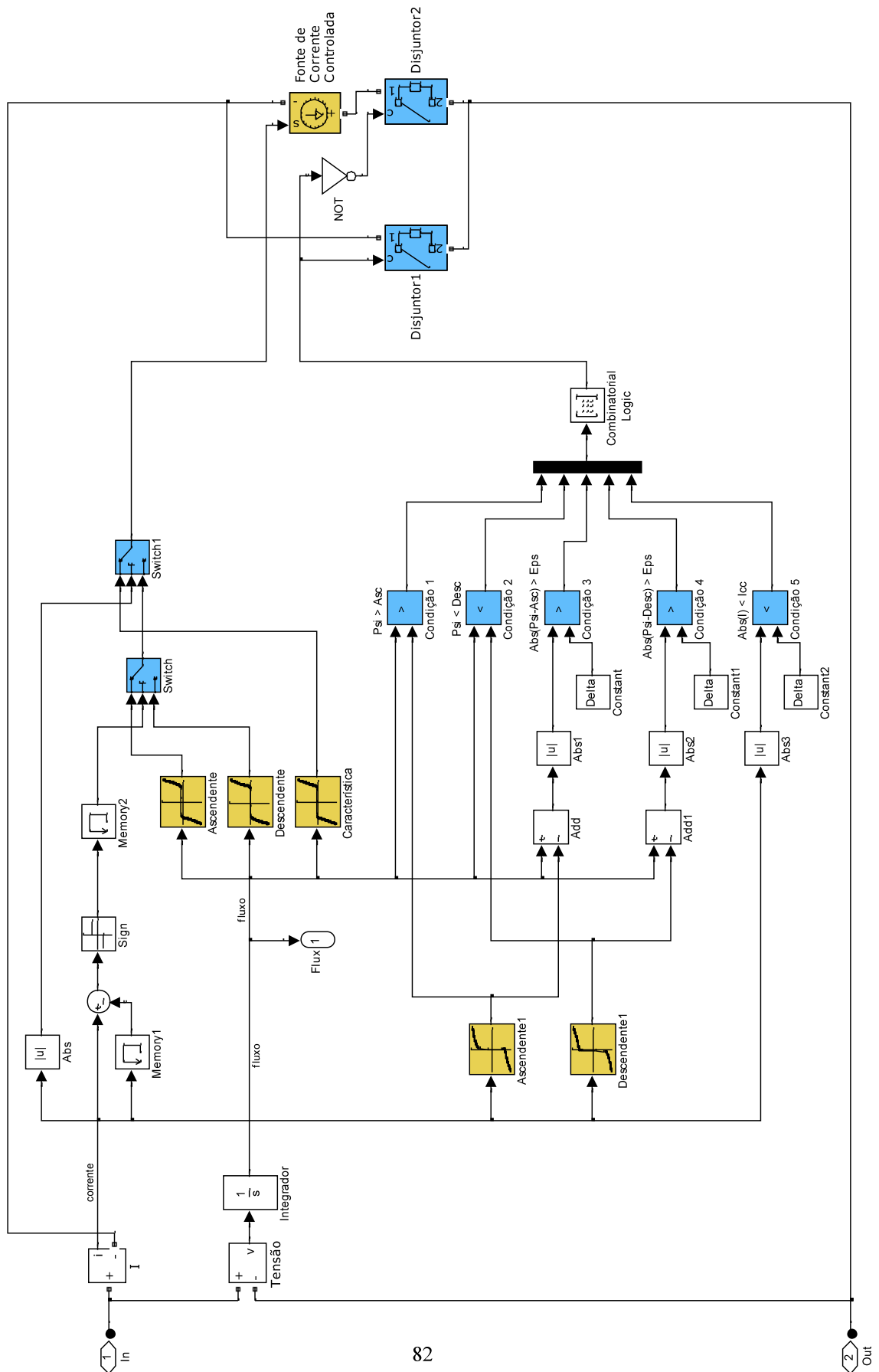
% Ferramentas para plot do bloco LCSi
Current = xlsread('caract_Histerese2.xlsx','Folha1','B169:B249');
Flux = xlsread('caract_Histerese2.xlsx','Folha1','C169:C249');
Asc = xlsread('caract_Histerese2.xlsx','Folha1','E169:E249');
Desc = xlsread('caract_Histerese2.xlsx','Folha1','F169:F249');
```

Anexo 4

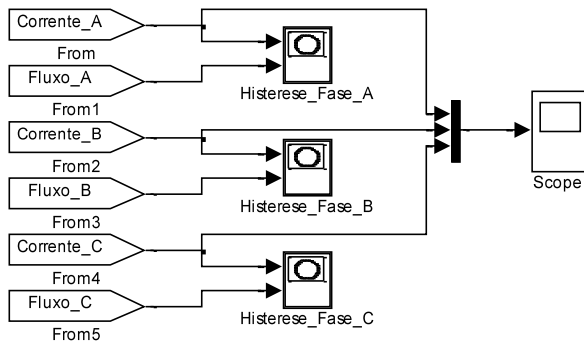
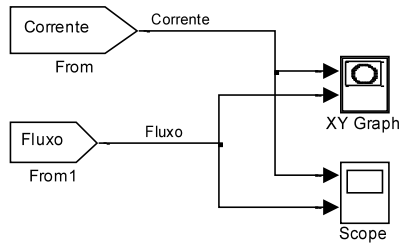
Tabela 7.2 - Tabela de verdade do bloco "Combinatorial Logic".

					CC da Fonte
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0
1	1	0	1	1	0
1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1

Anexo 5 – Layout completo do bloco LCSi.



Anexo 6 - Ferramentas do Simulink para análise gráfica de sinais.





**Desenvolvimento de um modelo computacional para simulação de
limitadores de corrente supercondutores indutivos**

Filipe Ferreira

[2014]