



**Ricardo Bruno Abreu Ferreira**

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

## **Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética**

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

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

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando José Almeida Vieira do Coito  
Arguente: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins  
Vogal: Mestre Rui Miguel Cachado Bernardo



## **Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética**

Copyright © Ricardo Bruno Abreu 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.



*À minha mãe*  
*Aos meus tios*  
*Ao meu pai, família, namorada e amigos*



# Agradecimentos

Concluída a dissertação que me permite finalizar a minha formação académica de Mestrado, é altura de reavivar e agradecer a todos os que colaboraram para este meu objectivo.

No âmbito académico, gostaria de destacar, em primeira mão, os meus orientadores, Professor João Murta Pina e a Professora Anabela Pronto, por me terem motivado ao longo das unidades curriculares que me leccionaram no Mestrado, o interesse pela área de Energia, graças aos seus conhecimentos, disponibilidade e simpatia, contribuindo em muito para a minha escolha e realização do trabalho. Um apreço pelo apoio total ao longo do estudo da dissertação.

Um obrigado a todos os docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, os quais colaboraram para a minha formação e que tive o prazer de conhecer.

Um agradecimento às pessoas que tive a possibilidade de fazer amizades no laboratório de Supercondutividade, presentes ao longo do meu último ano lectivo, nos bons e maus momentos; em especial ao Nuno Vilhena e Pedro Arsénio, pelo positivismo e alegres disposições transmitidas e seus auxílios iniciais no manuseamento dos equipamentos e diversas tarefas que foram requeridas ao longo do trabalho.

Aos meus amigos que conheci nos primeiros anos, Bruno Soares, Debs Tavares, João Bento, Patrick Boura, Ricardo Silva e Rui Borrego, pelos convívios, jantares, jogos de futebol e companhia ao longo destes anos, um forte agradecimento pela excelente camaradagem. Aos restantes colegas de curso, um reconhecido obrigado também.

No geral, um agradecimento à instituição universitária, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, pelo acolhimento, condições e profissionalismo académico concedidos ao longo da minha formação, não esquecendo a secção da Acção Social da Universidade de Lisboa pelo apoio financeiro prestado, o meu obrigado.

Em segundo lugar, quero agradecer imenso à minha mãe, pelas qualidades e virtudes transmitidas, pelo amor e confiança incondicional que sempre depositou em mim. Aos meus tios, Frederico e Clarisse, autênticos segundos pais, pelo carinho e apoio disponibilizados. Aos três, obrigado pelos sacrifícios e encargos financeiros que fizeram para que eu pudesse entrar no ensino superior.

Ao meu pai pela ajuda, preocupação pelo meu bem-estar e orgulho em mim. À minha família, que sempre reconheceu as minhas qualidades e me desejou os melhores sucessos. À memória do meu avô paterno, que partiu sem poder me ver concluir o curso, sei que sempre me quis ver atingir este objectivo.

Aos meus grandes amigos de longa data, Christopher, Soares e Pedro, que sempre respeitaram o meu tempo e me proporcionaram grandes momentos.

À minha namorada, Juliana, que apesar de ter presenciado apenas o meu último ano académico, foi importante na realização da minha dissertação, graças ao carinho, motivação e companhia concedida.

Um obrigado a todos.



## Sumário

Considerando o panorama energético actual, que reflecte um aumento intenso de consumo energético, e conseqüente adição em redes existentes, de novas instalações de produção de energia eléctrica, nomeadamente renovável e descentralizada, advêm as possibilidades de ocorrência de falhas, resultando em correntes de curto-circuito com níveis superiores aos equipamentos adequados de protecção disponíveis na rede.

Numa perspectiva de prevenção de danos na rede; de redução de perdas associadas à geração, transporte e distribuição de energia; e atendendo aos factores ambientais, surge a solução consubstanciada nos limitadores de corrente supercondutores (LCS).

Estes dispositivos, actualmente alvos de um estudo e desenvolvimento constante, apresentam um potencial adequado à protecção de redes de distribuição, em detrimento de outras soluções existentes, devido à sua transparência na rede quando em funcionamento normal, e à capacidade de resposta, quase instantânea, em situações de defeito, e retorno automático ao estado normal, após resolução do curto-circuito.

Apesar da existência de estudos e demonstrações da capacidade de LCS monofásicos, desponta a necessidade de testar o desempenho destes equipamentos em aplicações práticas, o que requer limitadores trifásicos.

Esta dissertação aborda o estudo dos efeitos dos curto-circuitos possíveis de ocorrerem em redes trifásicas, sob a protecção de um LCS, nomeadamente, trifásico, fase-fase, fase-terra e fase-fase-terra, e conseqüentes efeitos em cada fase. Por exemplo, num circuito trifásico, onde se prevê a existência destes dispositivos, uma falha fase-terra influencia as fases não afectadas.

Para tal objectivo, procede-se à construção de um LCS trifásico do tipo indutivo de blindagem magnética, à escala laboratorial, e avaliação do seu desempenho mediante diferentes tipos de curto-circuitos, contribuindo assim com aspectos construtivos para projectos de maior amplitude. O limitador a construir baseia-se na integração de um núcleo ferromagnético de três colunas, com um primário de cobre e um secundário de fita supercondutora Bi-2223.

**Termos-chave:** Correntes de curto-circuito, Fita supercondutora Bi-2223, Limitador de corrente supercondutor trifásico do tipo indutivo, Supercondutores de alta temperatura.



## Abstract

Considering the current energy scenario which reflects an intense increase in energy consumption and consequent addition in existing networks of new power facilities for electrical energy, namely renewable and decentralized, the possibility of failures that originate short-circuit currents with higher intensity levels than those provided by the protection equipment available in the network increases.

In a perspective of preventing damage to the network; reduce losses associated with the generation, transmission and distribution of energy; and regarding environment factors, comes the solution proposed by the superconducting fault current limiters.

Nowadays these devices with suitable potential for network protection are constantly being studied and developed, and chosen instead of other existing solutions, due to their transparency in the network under normal conditions, quick answer capacity and self-recovering to normal state after short-circuit resolution.

Despite the existence of studies and demonstrations of the capacity of a single phase superconducting fault current limiter, emerges the necessity to test the performance in practical applications which requires three-phase limiters.

This dissertation addresses the study of the most common types of short-circuit, specifically three-phase, phase-phase, phase-to-ground and phase-phase-to-ground and consequent effects at each phase. For instance, in a three legged core, a phase to ground fault affects healthy phases, and these are the most frequent faults in distribution grids, where such systems are envisaged.

For this purpose we proceed to the construction of a magnetic shielding three-phase superconducting inductive fault current limiter, at laboratory scale, and evaluate its performance through short-circuit situations, thus contributing with constructive aspects for projects of greater magnitude. The limiter is built by the integration of a three columns iron core with primary coil of copper and a secondary coil of superconducting Bi-2223 tape.

**Keywords:** Inductive three-Phase superconducting fault current limiter, High temperature superconductors, Short-circuit currents, Superconducting Bi-2223 tape.



# Índice de Matérias

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objectivos .....	2
1.3	Organização da dissertação .....	3
1.4	Contribuições Originais .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Supercondutividade</b> .....	<b>5</b>
2.1.1	Propriedades .....	6
2.1.1.1	Resistividade Nula .....	6
2.1.1.2	Efeito Meissner .....	7
2.1.2	Tipos de Supercondutores .....	8
2.1.2.1	Supercondutores do tipo I .....	8
2.1.2.2	Supercondutores do tipo II .....	9
<b>2.2</b>	<b>Curto-Circuitos</b> .....	<b>10</b>
2.2.1	Tipos de Curto-Circuito.....	11
2.2.1.1	Curto-Circuito Simétrico.....	13
2.2.1.2	Curto-Circuito Assimétrico .....	13
<b>2.3</b>	<b>Síntese</b> .....	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>ESTADO DE ARTE</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Limitadores de Corrente</b> .....	<b>21</b>
3.1.1	Soluções Convencionais para Limitar as Correntes de Curto-Circuito.....	22
3.1.1.1	Exemplos de Limitadores de Corrente Convencionais.....	23
<b>3.2</b>	<b>Limitadores de Corrente Supercondutores</b> .....	<b>24</b>
3.2.1	Classificação dos Limitadores de Corrente Supercondutores .....	25
3.2.1.1	Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Indutivo .....	27
<b>3.3</b>	<b>Síntese</b> .....	<b>34</b>

<b>4</b>	<b>ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO LIMITADOR DE CORRENTE.....</b>	<b>35</b>
4.1	Princípio de Funcionamento do Limitador .....	35
4.2	Construção do Limitador de Corrente .....	38
4.2.1	Banho Criogénico .....	39
4.2.2	Bobina do Primário .....	41
4.2.3	Bobina do Secundário .....	42
4.2.4	Protótipo Desenvolvido.....	43
4.3	Aquisição de Sinais.....	43
4.4	Tratamento de dados .....	46
4.4.1	Sistema de Aquisição de Sinais 1 .....	47
4.4.2	Sistema de Aquisição de Sinais 2 .....	48
4.5	Síntese.....	49
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>	<b>51</b>
5.1	Correntes Presumidas de Curto-Circuito .....	54
5.1.1	Curto-Circuito Trifásico.....	54
5.1.2	Curto-Circuito Fase-Fase .....	55
5.1.3	Curto-Circuito Fase-Terra.....	56
5.1.4	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra .....	56
5.2	Desempenho do Limitador de Corrente em Situações de Curto- Circuito .....	58
5.2.1	Curto-Circuito Trifásico.....	58
5.2.1.1	Curto-Circuito Trifásico: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário.....	59
5.2.1.2	Curto-Circuito Trifásico: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário ....	62
5.2.1.3	Curto-Circuito Trifásico: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário ....	66
5.2.2	Curto-Circuito Fase-Fase .....	70
5.2.2.1	Curto-Circuito Fase-Fase: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário ..	71
5.2.2.2	Curto-Circuito Fase-Fase: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário	74
5.2.2.3	Curto-Circuito Fase-Fase: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário	77
5.2.3	Curto-Circuito Fase-Terra.....	81
5.2.3.1	Curto-Circuito Fase-Terra: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário .	82
5.2.3.2	Curto-Circuito Fase-Terra: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário	85
5.2.3.3	Curto-Circuito Fase-Terra: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário	89
5.2.4	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra .....	92

5.2.4.1	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário .....	94
5.2.4.2	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário .....	97
5.2.4.3	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário .....	101
<b>5.3</b>	<b>Resumo dos Resultados Experimentais .....</b>	<b>104</b>
<b>5.4</b>	<b>Síntese .....</b>	<b>110</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>121</b>
1.	Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Núcleo Ferromagnético .....	121
2.	Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Suporte da Bobina do Primário .....	122
3.	Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Suporte da Bobina do Secundário .....	123
4.	Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Implementação em banho criogénico .....	124



## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama de fases T-J-H de um supercondutor. O volume interno do diagrama representa a supercondutividade. ....	6
Figura 2.2 – Comportamento de um supercondutor e um condutor perfeito. ....	8
Figura 2.3 – Curvas de magnetização dos supercondutores do tipo I e do tipo II. ....	9
Figura 2.4 – Caracterização dos curto-circuitos. Adaptado de (Metz-Noblat, Dumas, & Poulain, 2005). ....	11
Figura 2.5 – Diferentes tipos de curto-circuito. Adaptado de (Metz-Noblat, Dumas, & Poulain, 2005). ....	12
Figura 2.6 – Diagrama Esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito trifásico simétrico. ....	13
Figura 2.7 – Diagrama esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito fase-terra. Adaptado de (Paiva, 2011). ....	15
Figura 2.8 – Diagrama esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito fase-fase. Adaptado de (Paiva, 2011). ....	16
Figura 2.9 – Diagrama esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito fase-fase-terra. Adaptado de (Paiva, 2011). ....	18
Figura 3.1 – Limitador $I_s$ da ABB. Fonte: <a href="http://www.abb.com/">http://www.abb.com/</a> . ....	23
Figura 3.2 – Reactor de núcleo de ar da Hilkar. Fonte: <a href="http://www.hilkar.com/">http://www.hilkar.com/</a> . ....	24
Figura 3.3 – Classificação dos Limitadores de Corrente Supercondutores. ....	26
Figura 3.4 – LCST produzido pela ABB. Retirado de (Paul, et al., 1997). ....	28
Figura 3.5 – Corte transversal da fase A do LCST (lado esquerdo). Estrutura completa do LCST construído (lado direito). Retirado de (Shirai, et al., 2013). ....	29
Figura 3.6 – LCST do tipo indutivo sem núcleo com enrolamentos supercondutores de fita SF12050 SAT de 2G. Retirado de (Kozak, Majka, Kozak, & Janowski, 2012). ....	30
Figura 3.7 - LCS produzido pela Zenergy Power, instalado na subestação "The Circuit of the Future" da rede elétrica dos Estados Unidos da América. Fonte: <a href="http://www.zenergypower.com/">http://www.zenergypower.com/</a> . Último acesso em Agosto de 2013. ....	31
Figura 3.8 – Projecto do LCST do tipo indutivo, intitulado "iSFCL Project Augsburg". Retirado de (Klein, H.; Energy, B.; Technologies, S., 2012). ....	32
Figura 3.9 - LCS construído pelo projecto ECCOFLOW. Fonte: <a href="http://eccoflow.org">http://eccoflow.org</a> . Último acesso em Agosto de 2013. ....	33
Figura 3.10 - Perspectiva frontal (lado esquerdo) e perspectiva traseira (lado direito) do limitador de corrente, de 10 kV, do tipo indutivo construído na Delft University of Technology (Holanda). Retirado de (Cvoric, De Haan, Ferreira, Van Riet, & Bozelie, 2010). ....	34
Figura 4.1 - Esquema de princípio do LCST. ....	36
Figura 4.2 – Circuito laboratorial de ensaio com o LCST. ....	37
Figura 4.3 – Perspectivas do bloco do LCST. ....	39
Figura 4.4 – Construção dos depósitos para a implementação em banho criogénico. ....	40
Figura 4.5 – Depósitos do banho criogénico. ....	41

Figura 4.6 – Bobinas do primário do LCST.....	41
Figura 4.7 – Bobinas do secundário colocadas em suportes de Celeron. ....	42
Figura 4.8 – LCST construído. ....	43
Figura 4.9 – Esquemático da montagem subtratora implementada. ....	44
Figura 4.10 – Esquemático da montagem subtratora, com integrador, implementada. ....	45
Figura 4.11 – Placas de aquisição de dados e circuitos subtratores implementados. ....	46
Figura 4.12 – Montagem experimental para determinação do desempenho do limitador.....	47
Figura 5.1 – Esquema eléctrico de ensaio do LCST.....	52
Figura 5.2 – Esquema eléctrico de ensaio sem o LCST.....	53
Figura 5.3 – CC trifásico: corrente em função do tempo sem LCST. ....	55
Figura 5.4 – CC fase-fase: corrente em função do tempo sem LCST.....	55
Figura 5.5 – CC fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST. ....	56
Figura 5.6 – CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST. ....	57
Figura 5.7 – Esquema eléctrico de ensaio do LCST com uma falha trifásica. ....	58
Figura 5.8 - CC trifásico: corrente em função do tempo sem LCST (idêntico à Figura 5.3).....	59
Figura 5.9 - CC trifásico: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário. ....	59
Figura 5.10 - CC trifásico: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário. ....	60
Figura 5.11 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário. ....	60
Figura 5.12 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário. ....	61
Figura 5.13 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário. ....	61
Figura 5.14 - CC trifásico: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário. ....	61
Figura 5.15 - CC trifásico: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário. ....	62
Figura 5.16 - CC trifásico: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário. ....	62
Figura 5.17 - CC trifásico: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário. ....	63
Figura 5.18 - CC trifásico: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário. ....	63
Figura 5.19 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário. ....	64
Figura 5.20 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário. ....	64

Figura 5.21 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.....	65
Figura 5.22 - CC trifásico: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.....	65
Figura 5.23 - CC trifásico: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.....	66
Figura 5.24 - CC trifásico: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.....	66
Figura 5.25 - CC trifásico: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.....	67
Figura 5.26 - CC trifásico: fluxo magnético em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	67
Figura 5.27 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	68
Figura 5.28 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	68
Figura 5.29 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	68
Figura 5.30 - CC trifásico: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	69
Figura 5.31 - CC trifásico: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	69
Figura 5.32 - CC trifásico: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	70
Figura 5.33 - Esquema eléctrico de ensaio do LCST com uma falha fase-fase (idêntico à Figura 5.4). .....	70
Figura 5.34 - CC fase-fase: corrente em função do tempo sem LCST.....	71
Figura 5.35 - CC fase-fase: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.....	71
Figura 5.36 - CC fase-fase: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.....	72
Figura 5.37 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário.....	72
Figura 5.38 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário.....	73
Figura 5.39 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário.....	73
Figura 5.40 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário.....	73

Figura 5.41 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário.....	74
Figura 5.42 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário.....	74
Figura 5.43 - CC fase-fase: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.....	75
Figura 5.44 - CC fase-fase: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.....	75
Figura 5.45 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.....	76
Figura 5.46 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.....	76
Figura 5.47 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.....	76
Figura 5.48 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutora no secundário.....	77
Figura 5.49 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutora no secundário.....	77
Figura 5.50 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutora no secundário.....	77
Figura 5.51 - CC fase-fase: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.....	78
Figura 5.52 - CC fase-fase: fluxo magnético em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.....	78
Figura 5.53 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	79
Figura 5.54 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	79
Figura 5.55 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	79
Figura 5.56 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	80
Figura 5.57 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	80
Figura 5.58 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	80
Figura 5.59 - Esquema eléctrico de ensaio do LCST com uma falha fase-terra.....	81
Figura 5.60 – CC fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST (idêntico à Figura 5.5).	82
Figura 5.61 - CC fase-terra: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.....	82

Figura 5.62 - CC fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.....	83
Figura 5.63 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário.....	83
Figura 5.64 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário.....	84
Figura 5.65 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário.....	84
Figura 5.66 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário.....	84
Figura 5.67 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário.....	85
Figura 5.68 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário.....	85
Figura 5.69 - CC fase-terra: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.....	86
Figura 5.70 - CC fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.....	86
Figura 5.71 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.....	87
Figura 5.72 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.....	87
Figura 5.73 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.....	88
Figura 5.74 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.....	88
Figura 5.75 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.....	88
Figura 5.76 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.....	89
Figura 5.77 - CC fase-terra: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.....	89
Figura 5.78 - CC fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.....	90
Figura 5.79 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	90
Figura 5.80 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	91
Figura 5.81 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	91

Figura 5.82 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	92
Figura 5.83 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	92
Figura 5.84 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	92
Figura 5.85 - Esquema eléctrico de ensaio do LCST com uma falha bifásica-terra.....	93
Figura 5.86 – CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST (idêntico à Figura 5.6). .....	93
Figura 5.87 - CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.....	94
Figura 5.88 - CC fase-fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.....	95
Figura 5.89 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário.....	95
Figura 5.90 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário.....	95
Figura 5.91 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário.....	96
Figura 5.92 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário.....	96
Figura 5.93 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário.....	97
Figura 5.94 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário.....	97
Figura 5.95 - CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.....	98
Figura 5.96 - CC fase-fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.....	98
Figura 5.97 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.....	99
Figura 5.98 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.....	99
Figura 5.99 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.....	99
Figura 5.100 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.....	100
Figura 5.101 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.....	100

Figura 5.102 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.....	100
Figura 5.103 - CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.....	101
Figura 5.104 - CC fase-fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.....	101
Figura 5.105 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	102
Figura 5.106 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	102
Figura 5.107 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	103
Figura 5.108 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.....	103
Figura 5.109 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.....	104
Figura 5.110 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.....	104



## Índice de Tabelas

Tabela 4.1– Detalhes técnicos da fita supercondutora Bi-2223 comercializada pela empresa Innost.....	42
Tabela 4.2 – Dados técnicos das placas NI-6008 e NI-6009.....	44
Tabela 5.1 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha trifásica. ....	105
Tabela 5.2 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha fase-fase. ....	105
Tabela 5.3 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha fase-terra. ....	106
Tabela 5.4 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha fase-fase-terra. ....	106
Tabela 5.5 – Limitação do LCST numa falha trifásica em termos percentuais. ....	107
Tabela 5.6 – Limitação do LCST numa falha fase-fase em termos percentuais. ....	108
Tabela 5.7 – Limitação do LCST numa falha fase-terra em termos percentuais. ....	109
Tabela 5.8 – Limitação do LCST numa falha fase-fase-terra em termos percentuais. ....	110



## Simbologia

Símbolo	Descrição	Unidades
$B$	Densidade de fluxo magnético (ou campo de indução magnética)	T
$\mathbf{B}$	Vector densidade de fluxo magnético (ou campo de indução magnética)	T
$C$	Capacidade de um condensador	F
$f$	Frequência	Hz
$G$	Ganho da montagem substractora	-
$H$	Campo magnético	$A \cdot m^{-1}$
$\mathbf{H}$	Vector campo magnético	$A \cdot m^{-1}$
$H_c$	Campo magnético crítico	$A \cdot m^{-1}$
$H_{c1}$	Campo magnético crítico inferior	$A \cdot m^{-1}$
$H_{c2}$	Campo magnético crítico superior	$A \cdot m^{-1}$
$I$	Corrente eléctrica	A
$i_A$	Corrente eléctrica na fase A do circuito trifásico	A
$\mathbf{I}_A$	Vector corrente eléctrica na fase A do circuito trifásico	A
$i_B$	Corrente eléctrica na fase B do circuito trifásico	A
$\mathbf{I}_B$	Vector corrente eléctrica na fase B do circuito trifásico	A
$i_C$	Corrente eléctrica na fase C do circuito trifásico	A
$I_{CR}$	Corrente eléctrica crítica	A
$\mathbf{I}_C$	Vector corrente eléctrica na fase C do circuito trifásico	A
$i_{CC}$	Corrente eléctrica de curto-circuito	A
$\mathbf{I}_{CC}$	Vector corrente eléctrica de curto-circuito	A
$\mathbf{I}_{CC3f}$	Vector corrente eléctrica de curto-circuito trifásico simétrico	A
$\mathbf{I}_{CC,B}$	Vector corrente eléctrica de curto-circuito na fase B do circuito trifásico	A
$\mathbf{I}_{CC,C}$	Vector corrente eléctrica de curto-circuito na fase C do circuito trifásico	A
$\mathbf{I}_D$	Vector corrente da componente simétrica directa	A
$\mathbf{I}_H$	Vector corrente da componente simétrica homopolar	A
$\mathbf{I}_I$	Vector corrente da componente simétrica inversa	A
$i_L$	Corrente eléctrica na linha	A
$i_{L1P}$	Corrente eléctrica presumida na linha no primeiro pico do sinal após a falha	A
$\mathbf{I}_N$	Vector corrente eléctrica no neutro	A
$i_P$	Corrente eléctrica presumida na linha excluindo o primeiro pico do sinal após a falha	A
$I_S$	Corrente do secundário do transformador monofásico	A
$J$	Densidade de corrente eléctrica	$A \cdot m^{-2}$

<b><i>J</i></b>	Vector densidade de corrente eléctrica	$A \cdot m^{-2}$
<i>j</i>	Número imaginário ( $\sqrt{-1}$ )	-
<i>J<sub>c</sub></i>	Densidade de corrente eléctrica crítica	$A \cdot m^{-2}$
<b><i>J<sub>n</sub></i></b>	Vector densidade de corrente eléctrica normal	$A \cdot m^{-2}$
<b><i>J<sub>s</sub></i></b>	Vector densidade de corrente eléctrica supercondutora	$A \cdot m^{-2}$
<b><i>M</i></b>	Vector magnetização	$A \cdot m^{-1}$
<i>N</i>	Número de espiras	-
<i>N<sub>1</sub></i>	Número de espiras do primário	-
<i>N<sub>2</sub></i>	Número de espiras do secundário	-
<i>P<sub>H</sub></i>	Perdas por histerese específicas	$W \cdot Kg^{-1}$
<i>R</i>	Resistência eléctrica	$\Omega$
<i>R<sub>a</sub></i>	Resistência de amostragem	$\Omega$
<i>R<sub>c</sub></i>	Resistência de carga	$\Omega$
<i>T</i>	Temperatura	K
<i>T<sub>c</sub></i>	Temperatura crítica	K
<i>u</i>	Tensão	V
<b><i>U</i></b>	Vector tensão	V
<i>u<sub>0</sub></i>	Tensão de saída da montagem substractora	V
<i>u<sub>i</sub></i>	Tensão de entrada da montagem substractora	V
<i>u<sub>A</sub></i>	Tensão aos terminais da fonte de alimentação na fase A do circuito trifásico	V
<i>u<sub>B</sub></i>	Tensão aos terminais da fonte de alimentação na fase B do circuito trifásico	V
<i>u<sub>C</sub></i>	Tensão aos terminais da fonte de alimentação na fase C do circuito trifásico	V
<i>u<sub>leitura_L</sub></i>	Tensão aos terminais da resistência de linha, adquirida pela placa de aquisição de sinais	V
<i>u<sub>L</sub></i>	Tensão aos terminais da resistência de linha	V
<i>u<sub>leitura_fonte</sub></i>	Tensão aos terminais da fonte de alimentação, adquirida pela placa de aquisição de sinais	V
<i>u<sub>fonte</sub></i>	Tensão aos terminais da fonte de alimentação	V
<i>u<sub>leitura_LCST</sub></i>	Tensão aos terminais do limitador de corrente supercondutor trifásico, adquirida pela placa de aquisição de sinais	V
<i>u<sub>LCST</sub></i>	Tensão aos terminais do limitador de corrente supercondutor trifásico	V
<i>U<sub>p</sub></i>	Tensão do primário do transformador monofásico	V
<i>U<sub>s</sub></i>	Tensão do secundário do transformador monofásico	V
<b><i>Z<sub>D</sub></i></b>	Vector impedância da componente simétrica directa	$\Omega$
<b><i>Z<sub>DEF</sub></i></b>	Vector impedância de defeito	$\Omega$

$Z_H$	Impedância da componente simétrica homopolar	$\Omega$
$Z_I$	Impedância da componente simétrica inversa	$\Omega$
$Z_M$	Impedância a montante do ponto de curto-circuito	$\Omega$
$Z_N$	Impedância de ligação do neutro à terra do gerador	$\Omega$
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vazio ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ )	$H \cdot m^{-1}$
$\psi$	Fluxo ligado com o primário	Wb
$\psi_A$	Fluxo ligado com o primário na fase A do limitador trifásico	Wb
$\psi_B$	Fluxo ligado com o primário na fase B do limitador trifásico	Wb
$\psi_C$	Fluxo ligado com o primário na fase C do limitador trifásico	Wb
$\psi_{LCST}$	Fluxo ligado com o primário na presença de núcleo de ferro trifásico	Wb
$\phi$	Fluxo simples	Wb
$\zeta$	Constante de tempo	segundos
$\alpha$	Rotação de $2\pi/3$ no sentido positivo	-
$\chi_m$	Susceptibilidade magnética	-



## Notações

1G	Fita supercondutora de primeira geração
2G	Fita supercondutora de segunda geração
AC	<i>Alternating current</i>
AT	Alta tensão (entre 45 kV e 110 kV)
Bi-2212	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$
Bi-2223	Supercondutor de composição química $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{12}$
BSCCO	<i>Bismuth strontium calcium copper oxide</i>
BT	Baixa tensão (abaixo de 1 kV)
CC	Curto-circuito
DC	<i>Direct current</i>
ECCOFLOW	<i>Efficient YBCO Coated Conductor based Fault Current Limiter for Operation in Electricity Networks</i>
FMM	Força magnetomotriz (Ae)
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
iSFCL	Inductive Shielded Superconductive Fault Current Limiter
LCS	Limitador de corrente supercondutor
LCST	Limitador de corrente supercondutor trifásico
MT	Média tensão (entre 1 kV e 45 kV)
REBCO	Rare earth-Barium-Copper-Oxide
SAT	Supercondutor de alta temperatura
SBT	Supercondutor de baixa temperatura
SEE	Sistema de energia eléctrica
XPS	Plástico do tipo poliestireno extrudido
YBCO	Supercondutores de composição química $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , sendo $\delta$ o conteúdo de oxigénio.
Y-123	YBCO na sua fase supercondutora



# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Hoje em dia, um pouco por todo o mundo, têm-se assistido a uma forte tendência na prática da separação entre os sistemas de geração e transporte de energia. As acções constantes de conectar fontes de energia independentes a redes de transporte e de distribuição eléctrica, aumentam a possibilidade de aparecimento de correntes de curto-circuito (CC), que não foram consideradas nos dimensionamentos de protecção das redes, realizados anteriormente (Schmitt, 2006).

Atendendo a esta necessidade de incorporar pontos de geração distribuída ao longo de uma rede eléctrica, de maneira a que seja possível aumentar a potência instalada exigida pelos consumidores, devido à sua crescente dependência por energia, há que procurar e considerar as soluções que permitam evitar os danos consequentes de um incremento cada vez mais intenso dos níveis de corrente de CC, cujos valores podem exceder os níveis de correntes admissíveis pelos elementos protectores existentes na rede, comprometendo a integridade dos sistemas (Cai, et al., 2010).

De modo a lidar com as correntes originadas por falhas, diversos dispositivos têm sido introduzidos na rede nas últimas décadas. Têm sido abordadas opções como construção de novas subestações, construção de barramentos, ou outras mais atractivas financeiramente, como fusíveis, reactores em série e transformadores de alta impedância, contudo, estas alternativas apresentam problemas associados, nomeadamente redução da estabilidade dos sistema, aumento nas perdas de energia, e consequente diminuição da flexibilidade operacional e menor confiabilidade.

Por outro lado, numa perspectiva de superar as adversidades mencionadas antes, surge o conceito dos limitadores de corrente supercondutores (LCS). Estes limitadores apresentam vantagens face aos limitadores convencionais enunciados, e a sua integração no circuito reduz os níveis de corrente de falha para valores aceitáveis, permitindo assim que os elementos protectores do sistema possam ainda operar. Caracterizam-se pela impedância nula sob condições normais de funcionamento e impedância elevada em situações de defeito, e tempo de resposta quase instantâneo<sup>1</sup> após detecção da falha (Yazawa, et al., 2009). Os LCS podem ser classificados como resistivos ou indutivos, e podem ser produzidos com supercondutores de alta temperatura (SAT) ou supercondutores de baixa temperatura (SBT). Os SAT podem operar mediante o arrefecimento com azoto líquido<sup>2</sup>, que é consideravelmente mais barato que o hélio líquido<sup>3</sup>, e que serve de elemento de arrefecimento para os SBT (Aly & Mohamed, 2012).

Os limitadores de tipologia resistiva são inseridos em série com a linha. Em situações normais de funcionamento da rede, o material supercondutor encontra-se no estado

---

<sup>1</sup> Em menos de um quarto de ciclo da onda.

<sup>2</sup> O azoto, neste estado físico, apresenta uma temperatura crítica de 77 K.

<sup>3</sup> O hélio, neste estado físico, apresenta uma temperatura crítica de 4 K.

supercondutor, não adicionando impedância ao circuito. Em regime de falha, o supercondutor transita para o estado normal devido ao aumento abrupto da corrente de linha, e consequentemente a impedância do LCS aumenta acentuadamente e de forma rápida (Samah & Abdullah, 2010). Pelo facto do material supercondutor se encontrar em série com a linha, o início da limitação é muito rápido. No entanto, estes dispositivos necessitam de pontas terminais de corrente, de onde advêm perdas resistivas.

Os limitadores de tipologia indutiva baseiam-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. Em regime de operação normal, o supercondutor blinda o fluxo magnético do enrolamento primário do núcleo, o que resulta numa impedância desprezável no circuito. Aquando de uma falha, as correntes elevadas de CC provocam a transição do material supercondutor para o estado normal, permitindo assim a circulação de fluxo no núcleo de ferro e conseqüente incremento da impedância do primário, que está em série com a linha. (Steurer & Noe, 2007). Relativamente aos prós e contras desta tipologia, destaca-se pela positiva a ausência de pontas terminais de corrente e possibilidade de modificar a impedância mediante o ajuste do número de espiras no primário e, pela negativa, o peso e volume superiores aos dos resistivos, devido aos núcleos de ferro.

## 1.2 Objectivos

O objectivo desta dissertação é a construção e ensaio de um limitador de corrente supercondutor trifásico do tipo indutivo de blindagem magnética, com o secundário formado a partir de fita supercondutora Bi-2223. Os ensaios consistem em sujeitar o protótipo construído a diferentes tipos de curto-circuito em redes energéticas trifásicas, e analisar os seus efeitos nas diferentes fases.

Os objectivos específicos foram os seguintes:

- Projecto e construção do limitador de corrente supercondutor trifásico, à escala laboratorial.
- Realização de ensaios laboratoriais sem a presença do limitador, de modo a obter as correntes originadas sem limitação.
- Realização de ensaios laboratoriais com a presença do limitador, de forma a obter os dados relativos ao comportamento do mesmo.
- Análise e descrição dos resultados experimentais.
- Avaliação do desempenho do limitador construído.

## 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação organiza-se em 6 capítulos, nomeadamente:

- **Capítulo 1: Introdução**  
Neste primeiro capítulo procede-se à apresentação do projecto desenvolvido, com referência às motivações que incitaram o seu desenvolvimento, objectivos propostos e estrutura da dissertação.
- **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica.**  
No segundo capítulo, expõe-se o conceito do fenómeno físico da supercondutividade; as propriedades dos materiais supercondutores; os formatos e aplicações dos materiais supercondutores de alta temperatura; e as correntes de curto-circuito possíveis de ocorrerem em redes trifásicas.
- **Capítulo 3: Estado da Arte.**  
Este capítulo aborda as características dos limitadores de corrente; os tipos de limitadores supercondutores de alta temperatura; e menção a alguns projectos associados ao respectivo estado da arte.
- **Capítulo 4: Aspectos Construtivos do Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico do Tipo Indutivo de Blindagem Magnética.**  
Enuncia-se os aspectos construtivos, a partir dos quais o protótipo é fabricado, nomeadamente: funcionamento do limitador, elementos constituintes do sistema, materiais e suas características. Divulga-se também a montagem do sistema para a aquisição de dados dos ensaios.
- **Capítulo 5: Procedimento Experimental, Resultados e Análise do Limitador de Corrente Supercondutor do Tipo indutivo de Blindagem Magnética.**  
Apresentam-se os parâmetros do sistema ensaido, e os resultados referentes aos ensaios de curto-circuito, com e sem limitador, e respectiva análise do desempenho do limitador. Expõe-se um resumo de todos os resultados adquiridos e inferências associadas.
- **Capítulo 6: Conclusões e Trabalhos Futuros.**  
No sexto capítulo apresenta-se uma síntese do trabalho executado, e suas conclusões e algumas considerações sobre trabalhos futuros.

## 1.4 Contribuições Originais

As contribuições originais presentes nesta dissertação correspondem à construção e ensaio de um limitador de corrente supercondutor trifásico do tipo indutivo de blindagem magnética, com o secundário formado a partir de fita supercondutora Bi-2223, e avaliação de desempenho do respectivo protótipo desenvolvido em situações de falha, originadas a partir da activação dos tipos de curto-circuito possíveis de ocorrerem em redes trifásicas, contribuindo assim com evidências práticas sobre o efeito de diferentes falhas num limitador trifásico desta tipologia. Do trabalho desenvolvido resultam contribuições para um artigo científico:

- i. Ferreira, R., Pina, J. M., Vilhena, N., Arsénio, P., Pronto, A, G., Martins, J., “Analysis of the effects of asymmetric faults in three-phase superconducting inductive fault current limiters”, apresentado na conferência europeia EUCAS (European Conference on Applied Superconductivity), Génova, Itália, Setembro de 2013.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo abordam-se os conceitos da literatura mais significantes e contributivos ao desenvolvimento do objectivo da dissertação. Inicialmente focam-se as propriedades respeitantes ao fenómeno da supercondutividade, os materiais supercondutores do tipo I e tipo II, seguindo-se uma descrição dos CC possíveis de ocorrerem em redes trifásicas.

### 2.1 Supercondutividade

A supercondutividade designa-se como o fenómeno físico correspondente à redução da resistência eléctrica dos condutores para níveis desprezáveis, o que permite a circulação de corrente eléctrica num condutor, sem perdas por efeito de Joule. Este estado da matéria, onde os materiais apresentam resistência eléctrica nula e designado por estado superconductor, foi descoberto em 1911 pelo professor holandês de Física, Karmerlingh Onnes. Esse estudo, em conjunto com o trabalho relacionado com a liquefacção do hélio, foram merecedores da conquista do prémio Nobel em 1913.

A obtenção das propriedades supercondutoras, i.e., a perda abrupta da resistência e consequente redução de perdas, é atingida mediante o arrefecimento dos materiais a temperaturas extremamente baixas, sendo o valor da temperatura o qual o material se torna superconductor conhecido por temperatura crítica,  $T_c$ , enquanto que acima deste valor o material encontra-se no estado normal, ou seja, resistivo.

Outras duas características descobertas pelo físico Onnes acerca deste novo estado de matéria foram a da relação de inversa proporcionalidade entre a densidade de corrente crítica<sup>4</sup>,  $J_c$ , e a temperatura; e a existência de um campo magnético máximo,  $H_c$ , que quando atingido elimina o estado da supercondutividade. Estas propriedades intrínsecas do material, respeitantes à temperatura  $T$ , densidade de corrente  $J$  e campo magnético  $H$ , podem se relacionar por via de um diagrama de fases T-J-H, que exhibe os limites físicos das propriedades supercondutores do material através de uma superfície espacial. De acordo com o que se observa na Figura 2.1, no interior da superfície das grandezas, o material exhibe propriedades supercondutoras e no exterior encontra-se no estado normal, ou seja, o material permanece no estado de supercondutividade quando se verificam as condições de (2.1), sendo perceptível que qualquer grandeza pode destruir este estado da matéria.

---

<sup>4</sup> Quantidade máxima admissível de corrente que pode circular num material superconductor sem que este transite para o seu estado normal.

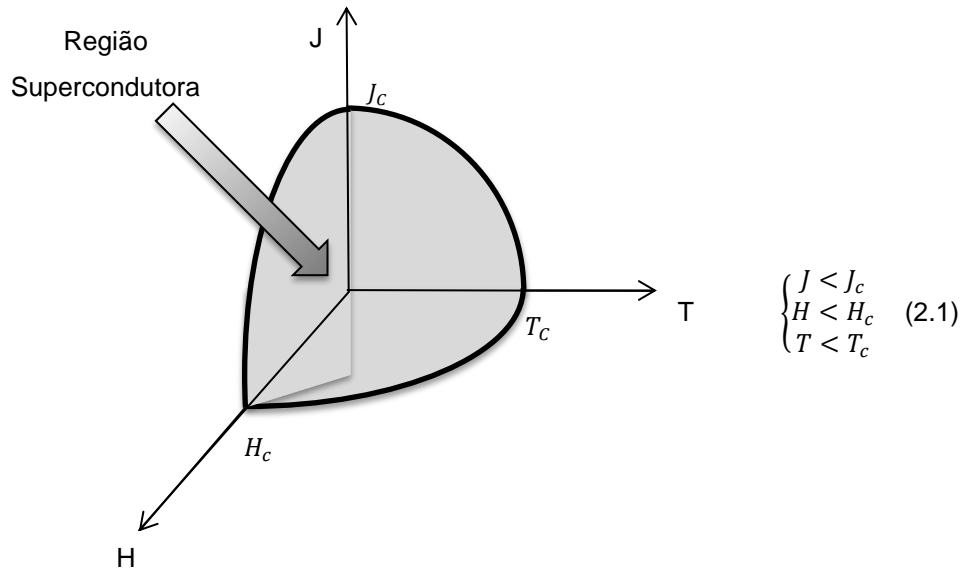


Figura 2.1 – Diagrama de fases T-J-H de um supercondutor. O volume interno do diagrama representa a supercondutividade.

## 2.1.1 Propriedades

Tal como referido anteriormente, a ausência de resistência eléctrica quando alcançado o estado supercondutor, foi a primeira propriedade associada a este estado de matéria. Outra propriedade relevante que caracteriza um supercondutor é o efeito Meissner, que tem como consequência a distinção de um material supercondutor de um condutor perfeito.

### 2.1.1.1 Resistividade Nula

Esta propriedade eléctrica garante a não dissipação de potência, e consequente eliminação das perdas quando em regime DC. Em regime AC, e apesar de muito reduzidas, verifica-se a ocorrência de perdas.

O facto evidenciado pela teoria dos dois fluídos<sup>5</sup> justifica o facto de os materiais apresentarem resistividade nula quando se encontram no estado supercondutor, na medida em que a teoria aborda a distinção de duas classes de electrões que constituem um material quando este atinge o seu estado supercondutor: uma fracção de electrões normais responsáveis pela existência da resistividade do material; e outra porção de electrões supercondutores encarregue da formação de pares de Cooper<sup>6</sup>, e que proporciona as propriedades supercondutoras do material, ou seja, sem a presença da resistividade. Assim, em termos gerais, esta teoria indica que a densidade corrente eléctrica  $J$  de um material supercondutor é formada por dois componentes: um associado aos condutores convencionais,  $J_n$ , e um relativo aos supercondutores,  $J_s$ .

<sup>5</sup> Teoria proposta em 1934 pelos físicos holandeses C. Gorter e H. Casimir, e que descreve o estado supercondutor nos materiais.

<sup>6</sup> Teoria proposta em 1957 pelos físicos Bardeen, Cooper e Schrieffer, designada por BCS, e que descreve a existência de associações de pares de electrões ligados (pares de Cooper), que se comportam como portadores de carga.

A mensuração da indução magnética originada pelas correntes persistentes que se estabelecem em espiras supercondutoras podem servir de método de confirmação para o fenómeno da ausência da resistência eléctrica nos materiais supercondutores.

#### 2.1.1.2 Efeito Meissner

Esta propriedade da supercondutividade é relacionada com o diamagnetismo perfeito que um material apresenta no estado supercondutor. Em 1933, dois físicos alemães, W. Meissner e R. Ochsenfeld, verificaram a capacidade de um material supercondutor em repelir totalmente o fluxo magnético do seu interior, quando sujeitos a um campo magnético.

Portanto, de acordo com a expressão (2.2) que define a indução magnética  $\mathbf{B}$  no interior de um material supercondutor, em função do campo magnético aplicado  $\mathbf{H}$  e da magnetização  $\mathbf{M}$ , e atendendo ao facto da densidade de fluxo ser nula,  $\mathbf{B} = 0$ , resulta o expresso na condição (2.3):

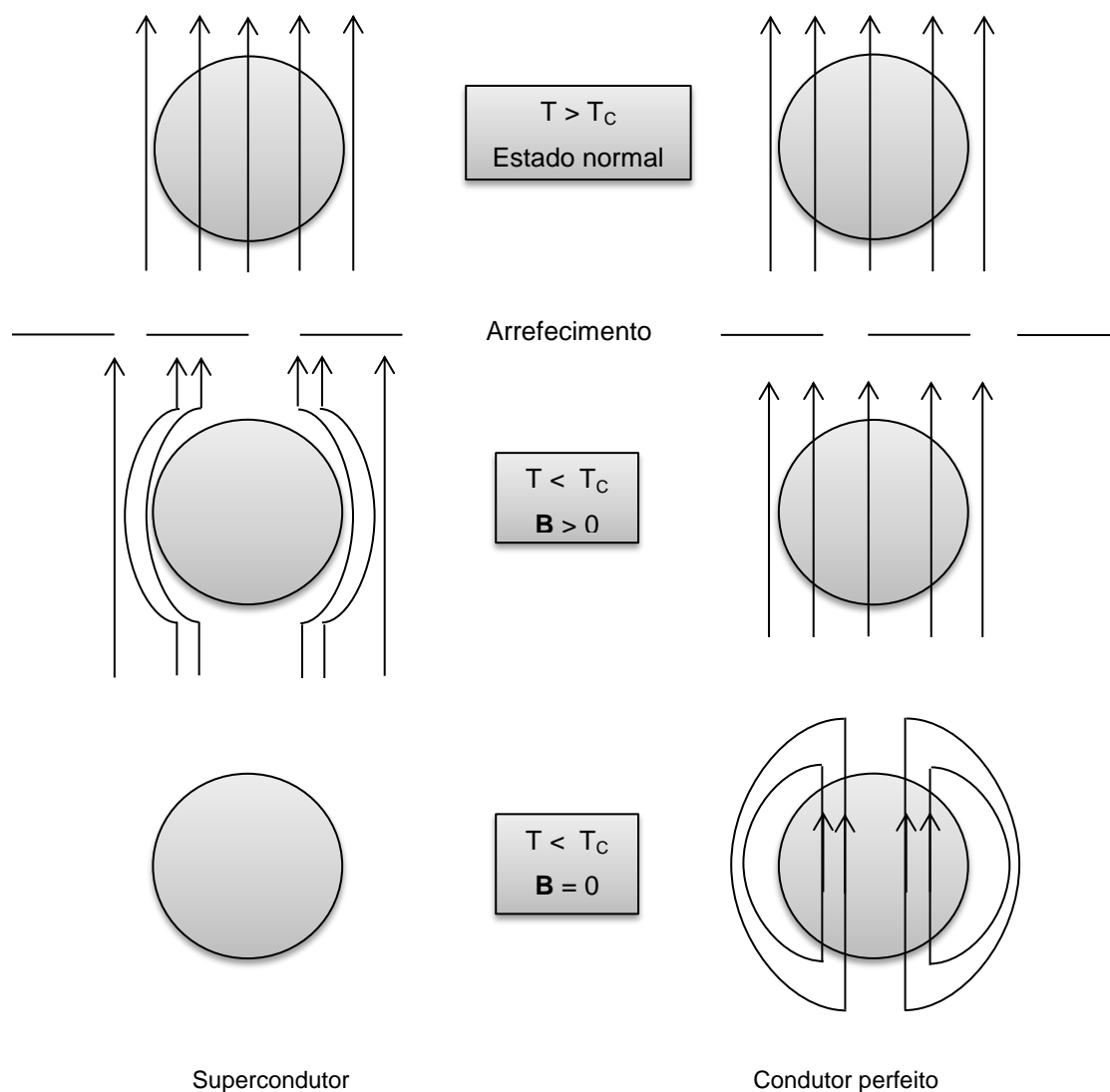
$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{M} = -\mathbf{H} \quad (2.3)$$

Assim, conclui-se que o campo aplicado e a magnetização têm módulo igual de sentido contrário, e sendo a susceptibilidade magnética  $\chi_m$  definida pela equação (2.4), resulta que  $\chi_m = -1$ , ou seja, verifica-se o fenómeno do diamagnetismo perfeito.

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

Considerando a evidência de que num supercondutor não existe campo de indução magnética no seu interior, e de que num condutor perfeito admite-se a hipótese da presença de fluxo no seu interior, devido ao facto da variação temporal das linhas de fluxo ser constante ( $d\mathbf{B}/dt = 0$ ), então o efeito de Meissner demonstra que há diferenças entre um supercondutor e um condutor perfeito. Na Figura 2.2 compara-se o efeito Meissner de um supercondutor ao comportamento de um condutor perfeito.



**Figura 2.2 – Comportamento de um supercondutor e um condutor perfeito.**

## 2.1.2 Tipos de Supercondutores

Até ao ano 1957, os supercondutores eram todos considerados iguais em termos do seu comportamento. Nesse ano, ocorreu a descoberta de um novo tipo de supercondutores, passando estes a serem classificados como supercondutores do tipo II (ou duros), enquanto que os antecessores ficaram classificados como sendo do tipo I (ou macios).

### 2.1.2.1 Supercondutores do tipo I

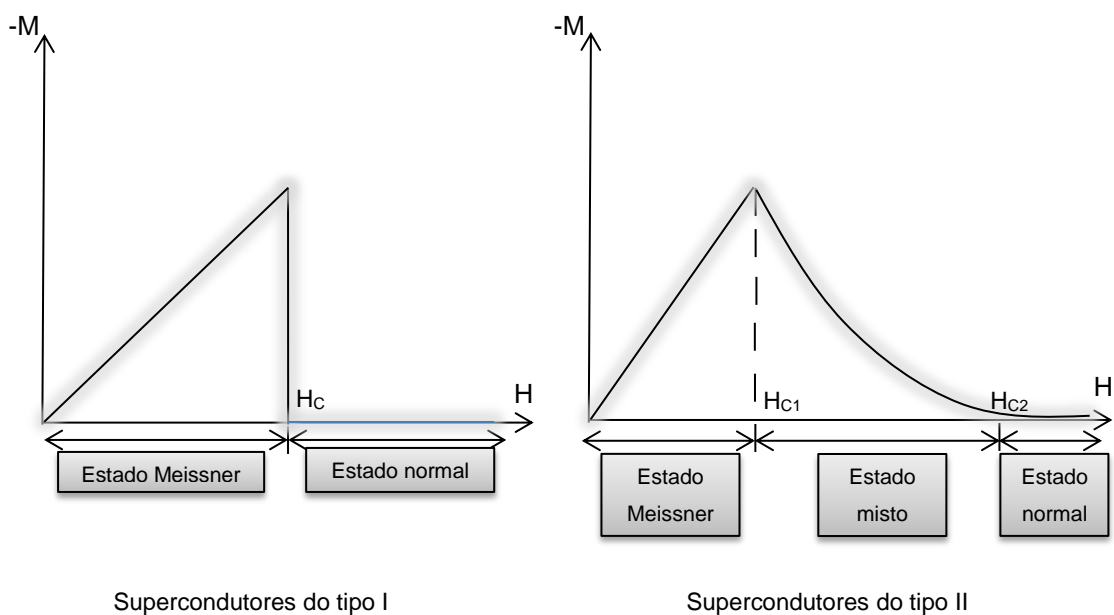
Os materiais classificados como sendo supercondutores do tipo I são aqueles que têm um comportamento sustentado pelo efeito de Meissner, ou seja, exibem a capacidade de repelir por completo o fluxo magnético do seu interior, nas situações em que o campo magnético aplicado é inferior ao respectivo campo magnético crítico  $H_c$  do material. Em situações contrárias, i.e., campo magnético aplicado ser superior ao campo magnético crítico  $H_c$ , o estado da supercondutividade é destruído.

### 2.1.2.2 Supercondutores do tipo II

Na nova categoria de supercondutores descoberta em 1957, verifica-se um estado intermédio na transição que ocorre entre o estado supercondutor e estado normal do material, designado por estado misto, não ocorrendo portanto a transição abrupta do estado de Meissner para o estado normal nesta categoria de supercondutores.

O estado misto do material é definido como aquele limitado por dois valores do campo magnético crítico,  $H_{C1}$  e  $H_{C2}$ , onde coexistem simultaneamente as propriedades supercondutoras e normais do material. Assim, num material supercondutor, o estado Meissner, respeitante ao intervalo onde o material exhibe um comportamento diamagnético perfeito e conseqüentemente expulsa o fluxo do seu interior, verifica-se até ser atingido o valor do campo magnético crítico inferior,  $H_{C1}$ . A partir deste valor, o material admite a penetração parcial de fluxo magnético no seu interior. Por fim, para valores superiores ao campo magnético crítico superior,  $H_{C2}$ , o estado da supercondutividade é eliminado.

Na Figura 2.3 apresenta-se as curvas de magnetização que caracterizam os supercondutores do tipo I e do tipo II. De referir que todos os campos críticos mencionados para as duas classes,  $H_c$ ,  $H_{C1}$  e  $H_{C2}$ , dependem da temperatura, sendo nulos quando se atinge a temperatura crítica  $T_c$ .



**Figura 2.3 – Curvas de magnetização dos supercondutores do tipo I e do tipo II.**

## 2.2 Curto-Circuitos

Devido ao aumento progressivo das necessidades energéticas, que conduz à construção de novas fontes de produção e geração de energia, têm-se verificado um incremento na densidade de energia nos SEE, o que induz ao aparecimento frequente de falhas na rede, para níveis cada vez mais elevados nos níveis de corrente de curto-circuito, quer em falhas simétricas ou assimétricas (Mitolo, Sutherland, & Natarajan, 2006).

O CC define-se como uma alteração conjuntural na rede, que pode ser modelada por via da ligação de baixa impedância, resultante de um defeito, entre dois pontos cujos potenciais estão em níveis diferentes, traduzindo-se na origem de uma corrente geralmente muito elevada. As ligações mais comuns que se estabelecem podem ser metálicas, que correspondem às situações de CC franco<sup>7</sup>, ou por arco eléctrico, que são as situações mais frequente, e que actuam como uma explosão poderosa resultante da ruptura dieléctrica de um gás.

A maioria das falhas num SEE ocorre nos cabos aéreos, devido ao facto de estarem sujeitos a fenómenos físicos naturais, tais como as descargas atmosféricas que provocam sobretensões elevadas; ou o contacto entre objectos externos ou “estranhos” e a rede, como aves e ramos de árvores. Por outro lado, em menor escala, os equipamentos que não estão sujeitos a este tipo de acontecimentos, como por exemplo, linhas abaixo da superfície da terra ou transformadores, os defeitos surgem devido aos excessos de temperatura e campos eléctricos intensos que causam o desgaste físico do referido material (Paiva, 2011) (Schneider Electric).

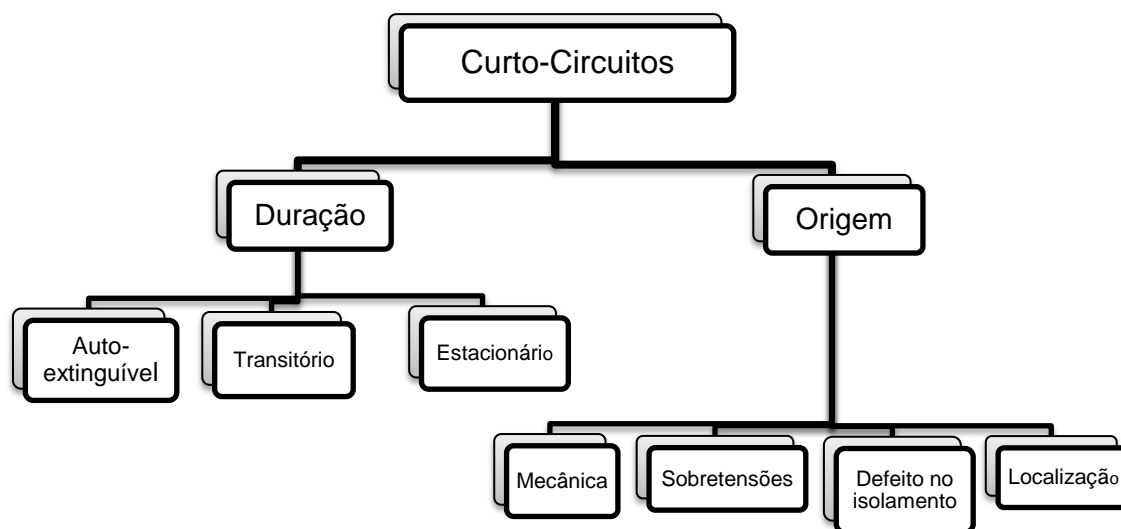
Estas acções que se reflectem no surgimento de correntes muito superiores às correntes em regime sem falha, têm evidentemente consequências térmicas e mecânicas nos equipamentos distribuídos ao longo das linhas da rede, e provocam quedas de tensão nas instalações dos utilizadores, podendo por exemplo originar incêndios, explosões, deformar barramentos, desconectar cabos, interromper o funcionamento e conseqüente distúrbio e destabilização de outros circuitos na rede, etc. A fim de evitar de forma eficaz estas situações extremamente prejudiciais à rede eléctrica, é crucial o sector industrial energético dotá-la de equipamentos de protecção suficientemente robustos e capazes de suportar o aumento abrupto das correntes de falha, bem como os esforços electrodinâmicos nas máquinas e barramentos.

Um CC pode ser caracterizado pela sua durabilidade e origem, tal como especificado na Figura 2.4 (Metz-Noblat, Dumas, & Poulain, 2005). No que respeita ao seu instante temporal, um CC denomina-se por auto-extinguível quando tem a capacidade de se extinguir por si próprio; transitório quando provém de uma falha de isolamento, resultando num aumento de corrente de serviço que evolui para corrente de CC; e estacionário, que corresponde às situações em que é necessário a intervenção de algum dispositivo para o cessar. Relativamente à causa que o inicia, um CC pode ter origem mecânica, que deriva da quebra ou contacto casual entre condutores; de sobretensões, internas ou atmosféricas; falha de

---

<sup>7</sup> Os CC francos são aqueles cuja impedância de defeito é nula.

isolamento, devido a factores como temperatura ou corrosão; e quanto à sua localização, quer no interior ou exterior das máquinas/equipamentos.



**Figura 2.4 – Caracterização dos curto-circuitos. Adaptado de (Metz-Noblat, Dumas, & Poulain, 2005).**

Os equipamentos actualmente mais usados e encarregues de responder no menor tempo possível às situações de defeito na rede são os disjuntores e fusíveis. Contudo, estes interruptores apresentam limitações, que podem ser superadas através da solução proposta pelo LCS. No capítulo 3 procede-se às análises e referências dos equipamentos existentes e suas limitações, e também dos LCS.

### **2.2.1 Tipos de Curto-Circuito**

O dimensionamento e selecção dos elementos de um SEE é de extrema importância, visto as correntes de CC atingirem valores muito superiores às correntes normais, causando pressões dinâmicas e térmicas, bem como quedas de tensão que podem ser penalizadoras para os utilizadores da rede. Há que ter em conta as condições de funcionamento quer em regime permanente (corrente e tensão em operação normal), quer em regime de falha (CC entre fases ou falhas à terra) (Delgado, 2011).

De forma a alcançar o objectivo, é de extrema importância efectuar o cálculo das correntes de curto-circuito nas instalações eléctricas. O referido cálculo permite determinar e calibrar o poder de corte de corte dos equipamentos de protecção, assim como prever os efeitos térmicos e electrodinâmicos que as correntes de CC provocam sobre os mesmos.

Como citado antes, os tipos possíveis de falhas que podem interromper o bom funcionamento de sistemas energéticos são simétricos ou assimétricos. As falhas simétricas definem-se como as que afectam simultaneamente as três fases do sistema, enquanto as falhas assimétricas consistem em defeitos fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra (Samah & Abdullah, 2010). Inúmeros dados estatísticos demonstram que a falha mais frequente é a fase-

terra, que se verifica em 85% das falhas. Em menor frequência, surgem as falhas assimétricas fase-fase-terra (15% a 25%), fase-fase (5% a 15%), sendo que esta falha muitas vezes se degenera em falhas trifásicas. Por último a falha simétrica trifásica, que sucede em cerca de 5% dos casos, considerada a falha mais severa que pode atingir um sistema (Jian-ping, Ying-ping, & Zhi-ping, 2008) (Metz-Noblat, Dumas, & Poulain, 2005) (Stemmler, et al., 2007). Pode-se visualizar os diferentes tipos de CC na Figura 2.5.

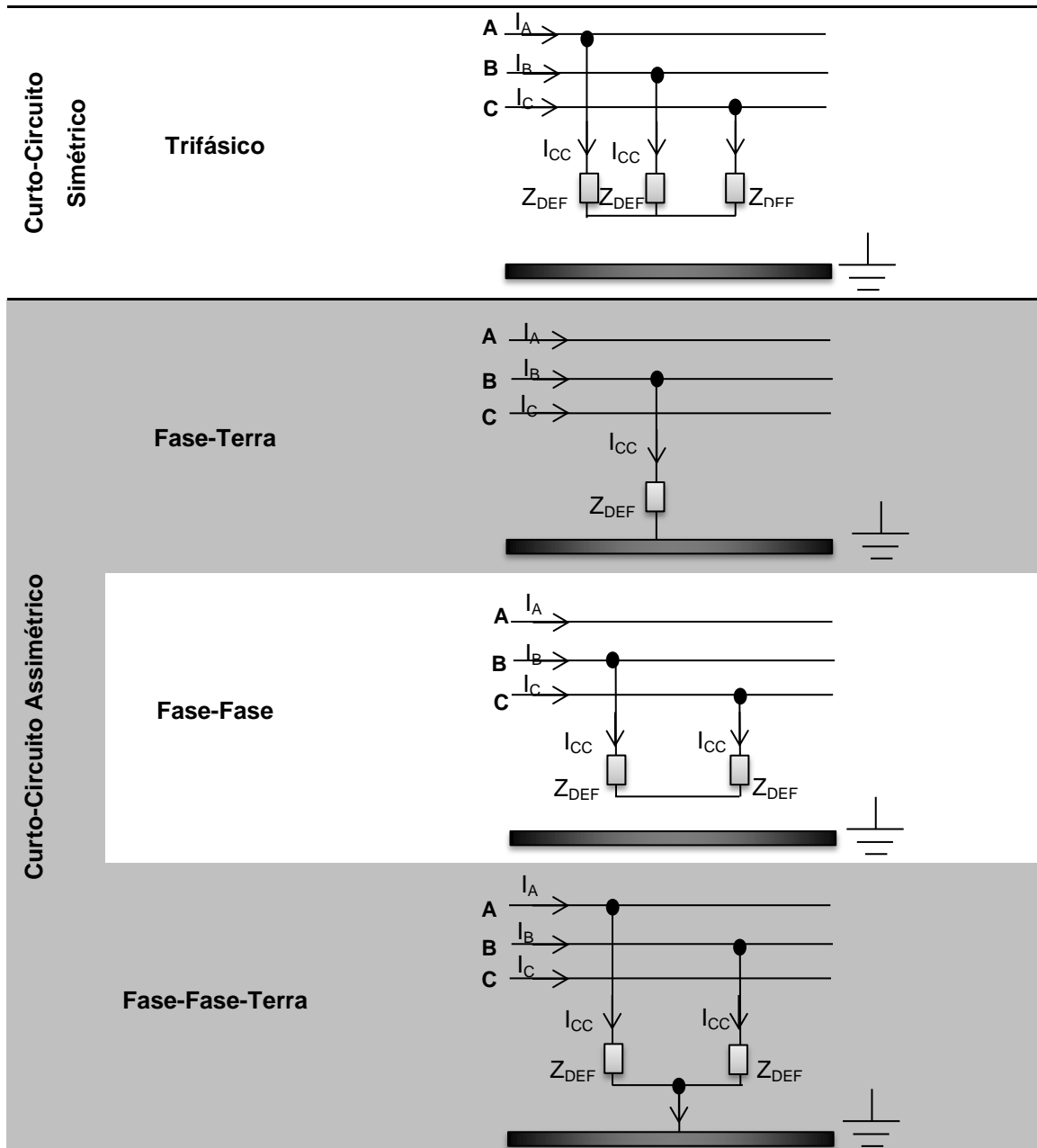


Figura 2.5 – Diferentes tipos de curto-circuito. Adaptado de (Metz-Noblat, Dumas, & Poulain, 2005).

De seguida apresentam-se as expressões que definem as correntes de CC das falhas possíveis de ocorrerem em sistemas trifásicos, retiradas da referência (Paiva, 2011).

### 2.2.1.1 Curto-Circuito Simétrico

Um CC simétrico trifásico consiste na falha simultânea das três fases do sistema, onde as impedâncias de defeito são iguais em todas as fases do circuito, resultando correntes de curto-circuito iguais em módulo nas três fases e defasadas de  $120^\circ$  entre si. Visto as três fases do circuito serem afectadas em proporções iguais, o sistema permanece equilibrado, razão pelo qual é designado simétrico, sendo a análise feita através da equivalência a um circuito monofásico, tal como se observa na Figura 2.6.

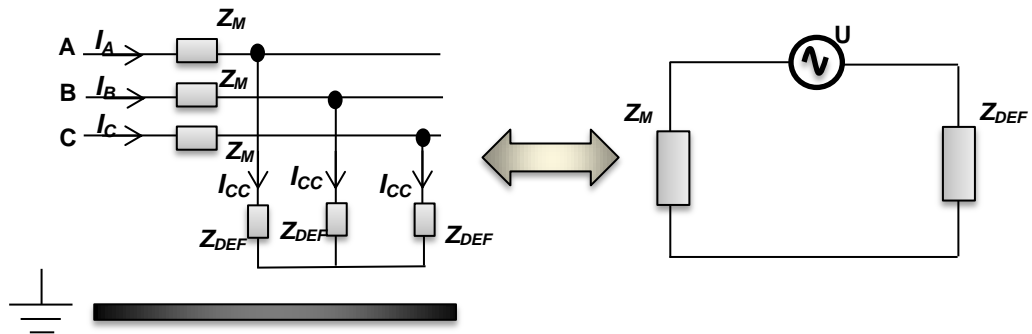


Figura 2.6 – Diagrama Esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito trifásico simétrico.

Sendo  $U$  a tensão na fonte antes da ocorrência do defeito,  $Z_M$  a impedância a montante<sup>8</sup> do ponto onde se origina o defeito e  $Z_{DEF}$  a impedância de defeito, então a corrente de CC de um defeito trifásico simétrico é dada por:

$$I_{CC3f} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (Z_M + Z_{DEF})} \quad (2.5)$$

No caso do CC franco,  $Z_{DEF} = 0$ , logo:

$$I_{CC3f} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_M} \quad (2.6)$$

### 2.2.1.2 Curto-Circuito Assimétrico

As falhas provocadas pela perturbação no estado de equilíbrio na rede são denominadas falhas assimétricas ou desequilibradas. Os tipos possíveis deste tipo de falha são o fase-terra (monofásico), fase-fase e fase-fase-terra.

Pelo teorema de Fortescue, é possível transformar o sistema com componentes simétricas. A rede, vista a partir do ponto onde se verifica o CC, é modelizada por três esquemas distintos: directo, inverso e homopolar. Estas três componentes, que se ligam de acordo com o tipo de falha que se estabelece, possuem propriedades de simetria e permitem desagrupar um sistema trifásico desequilibrado em três esquemas equilibrados, reduzindo o

<sup>8</sup> Impedância equivalente que inclui as várias redes com diferentes tensões e a série de condutores de ligação com diferentes secções e comprimentos.

grau de complexidade de análise do sistema (Paiva, 2011). Pelo método das componentes simétricas, temos o seguinte para as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$  de um sistema trifásico, onde  $\alpha$  representa o defasamento entre fases, correspondendo a uma rotação de  $2\pi/3$  no sentido positivo.

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_D + I_I + I_H \\
 I_B &= \alpha^2 I_D + \alpha I_I + I_H \\
 I_C &= \alpha I_D + \alpha^2 I_I + I_H \\
 \alpha &= e^{\frac{j2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Relativamente às componentes simétricas a partir das correntes em cada fase, elas são calculadas pela expressão (2.8).

$$\begin{aligned}
 I_D &= \frac{I_A + \alpha I_B + \alpha^2 I_C}{3} \\
 I_I &= \frac{I_A + \alpha^2 I_B + \alpha I_C}{3} \\
 I_H &= \frac{I_A + I_B + I_C}{3}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

- **Curto-circuito fase-terra (monofásico)**

A expressão (2.11), que define a corrente de curto-circuito de uma falha fase-terra num sistema trifásico, é obtida com base no esquema representado na Figura 2.7. Considere-se a falha na fase A de um sistema trifásico. Como neste tipo de CC só uma fase é afectada, então a corrente de CC nas outras duas fases é nula ( $I_B = I_C = 0$ ). Assim, na fase defeituosa<sup>9</sup>, as três componentes simétricas são iguais, ou seja:

---

<sup>9</sup> Fase afectada pelo curto-circuito.

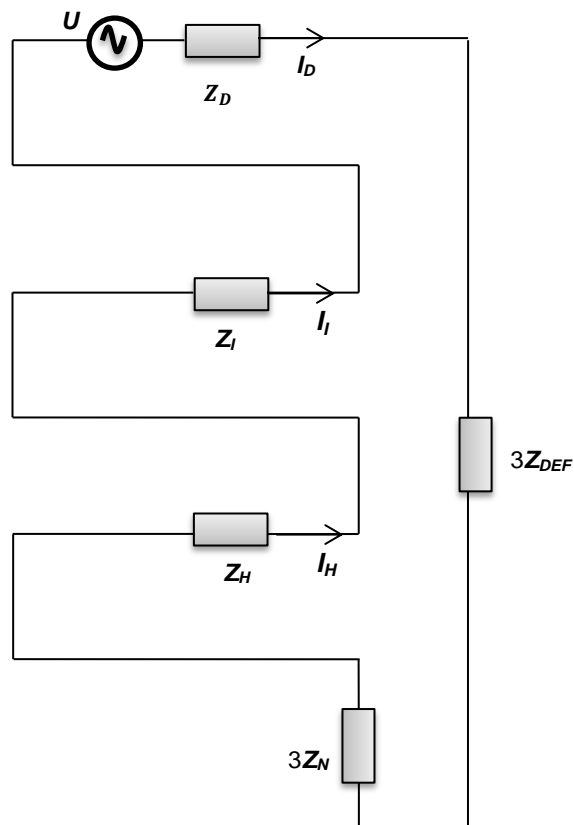


Figura 2.7 – Diagrama esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito fase-terra. Adaptado de (Paiva, 2011).

$$I_D = I_I = I_H = \frac{I_{CC}}{3} \quad (2.9)$$

$$I_D = I_I = I_H = \frac{U}{Z_D + Z_I + Z_H + 3 \cdot (Z_{DEF} + Z_N)} \quad (2.10)$$

Como  $I_{CC} = 3 \cdot (I_D = I_I = I_H)$ , então a corrente de falha fase-terra é dada por:

$$I_{CC} = \frac{U}{\frac{Z_D + Z_I + Z_H}{3} + Z_{DEF} + Z_N} \quad (2.11)$$

Assim, verifica-se que a corrente de curto-circuito num defeito monofásico é dada pelo quociente entre a tensão e a adição da média das impedâncias simétricas com a impedância de defeito e de neutro.

Na situação de CC franco, ou seja, com a impedância de defeito nula, a corrente do defeito monofásico é calculada pela condição (2.12):

$$I_{CC} = \frac{U}{\frac{Z_D + Z_I + Z_H}{3} + Z_N} \quad (2.12)$$

- **Curto-circuito fase-fase**

Relativamente ao defeito fase-fase, considere-se que a falha se estabelece entre as fases B e C de um sistema trifásico, logo as condições de assimetria impostas nesta situação são consequentes da corrente da fase A que é nula,  $I_A = 0$ , e pela relação  $I_B = -I_C$ .

Pela expressão definida em (2.8), calcula-se as componentes simétricas da corrente, resultando na componente homopolar nula,  $I_H = 0$  e na relação  $I_D = -I_I$ . A partir da Figura 2.8, que traduz as relações de simetria estabelecidas neste defeito, calcula-se a corrente de CC, expressa na condição (2.15).

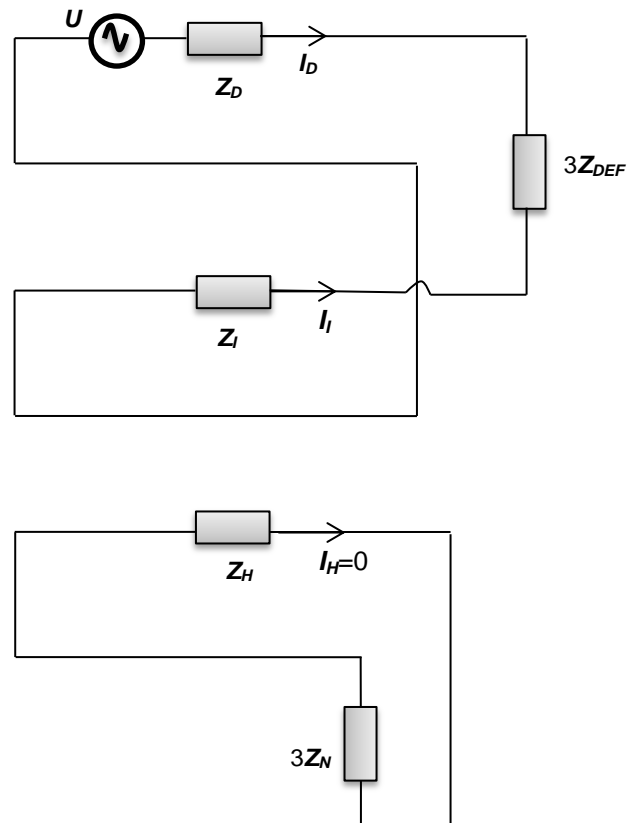


Figura 2.8 – Diagrama esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito fase-fase. Adaptado de (Paiva, 2011).

$$I_H = 0 \quad (2.13)$$

$$I_D = -I_I = \frac{(\alpha - \alpha^2) \cdot I_B}{3} = j \frac{I_B}{\sqrt{3}}$$

Pelas condições de simetria que se deduz da Figura 2.8, obtemos a componente directa e inversa da corrente.

$$I_D = -I_I = \frac{U}{Z_D + Z_I + Z_{DEF}} \quad (2.14)$$

Assim, e de acordo com a relação de (2.14), a corrente de CC na fase B é:

$$I_{CC\_B} = -j \frac{\sqrt{3} \cdot U}{Z_D + Z_I + Z_{DEF}} \quad (2.15)$$

Na situação de CC fase-fase franco, a corrente é imposta por:

$$I_{CC\_B} = -j \frac{\sqrt{3} \cdot U}{Z_D + Z_I} \quad (2.16)$$

Quanto à corrente de CC na fase C, é dada pela relação  $I_{CC\_B} = I_{CC\_C}$ .

- **Curto-circuito fase-fase-terra**

Por último, no CC assimétrico bifásico-terra, considere-se as fases B e C como as defeituosas de um sistema trifásico. Como a fase A não é afectada, a respectiva corrente de CC é nula,  $I_A = 0$ . Com base no método das componentes simétricas, definido na expressão (2.8), obtém-se a condição de simetria indicada em (2.17), e o conseqüente diagrama esquemático ilustrado na Figura 2.9.

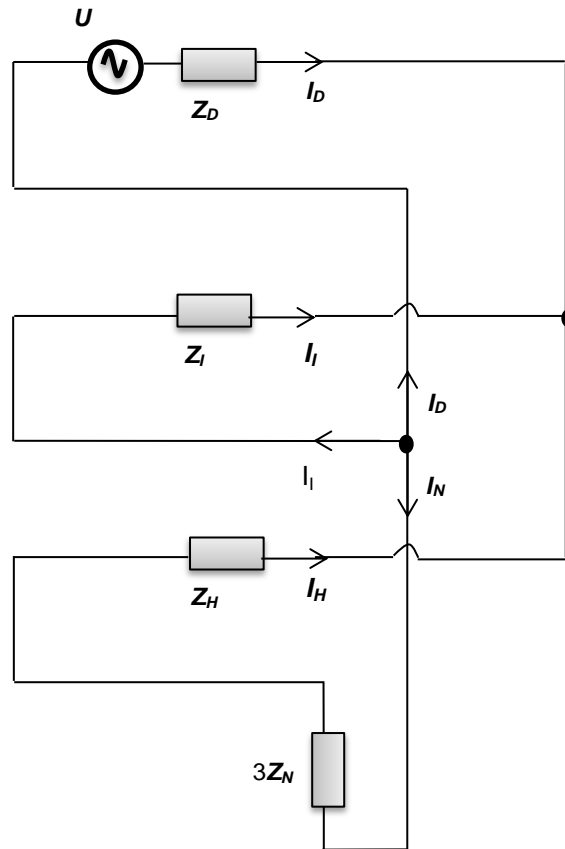


Figura 2.9 – Diagrama esquemático para o cálculo da corrente do curto-circuito fase-fase-terra. Adaptado de (Paiva, 2011).

$$I_D + I_I + I_H = 0 \quad (2.17)$$

Com base na Figura 2.9, deduz-se as componentes simétricas da corrente (2.18).

$$I_D = U \cdot \frac{Z_I + Z_H + 3Z_N}{Z_D Z_I + Z_D \cdot (Z_H + 3Z_N) + Z_I \cdot (Z_H + 3Z_N)}$$

$$I_I = -U \cdot \frac{Z_H + 3Z_N}{Z_D Z_I + Z_D \cdot (Z_H + 3Z_N) + Z_I \cdot (Z_H + 3Z_N)} \quad (2.18)$$

$$I_H = -U \cdot \frac{Z_I}{Z_D Z_I + Z_D \cdot (Z_H + 3Z_N) + Z_I \cdot (Z_H + 3Z_N)}$$

Aplicando a equação indicada em (2.7), determina-se as correntes de CC fase-fase-terra na fase B e C:

$$I_{CC.B} = U \cdot \frac{(\alpha^2 - 1)Z_I + (\alpha^2 - \alpha)(Z_H + 3Z_N)}{Z_D Z_I + Z_D \cdot (Z_H + 3Z_N) + Z_I \cdot (Z_H + 3Z_N)} \quad (2.19)$$

$$I_{CC.C} = U \cdot \frac{(\alpha - 1)Z_I + (\alpha - \alpha^2)(Z_H + 3Z_N)}{Z_D Z_I + Z_D \cdot (Z_H + 3Z_N) + Z_I \cdot (Z_H + 3Z_N)}$$

A partir destas duas correntes de CC, pode-se determinar a expressão da corrente no neutro,  $I_N$ .

$$I_N = I_{CC.B} + I_{CC.C} = \frac{-3U \cdot Z_I}{Z_D Z_I + Z_D \cdot (Z_H + 3Z_N) + Z_I \cdot (Z_H + 3Z_N)} \quad (2.20)$$

## 2.3 Síntese

Neste primeiro capítulo abordaram-se os dois principais contextos a partir do qual se iniciou o projecto da dissertação. Em primeiro lugar, enuncia-se o conceito da supercondutividade, com referência às principais características dos materiais supercondutores e às duas classes de supercondutores existentes no que toca à sua transição do estado supercondutor para o estado normal. Em segundo lugar, procede-se à análise dos CC, com referência às suas causas, consequências e tipos, finalizando com as expressões analíticas que permitem calcular as correntes de falha nos CC possíveis de ocorrerem em redes trifásicas.



### 3 Estado de Arte

Devido às situações da falha que afectam a estabilidade da rede eléctrica e dos danos resultantes que ocorrem na vizinhança da zona onde sucede a falha (e.g. devido aos efeitos do arco eléctrico), as correntes provenientes das fontes e que fluem para o local da falha originam tensões elevadas nos equipamentos, tais como cabos, linhas áreas ou transformadores (Schmitt, Fault Current Limiters, 2003). Assim, sendo as redes eléctricas susceptíveis de sofrerem danos devido às correntes de falha, torna-se imprescindível munir a rede com capacidade de protecção, de modo a garantir segurança e robustez aos sistemas de energia. Este objectivo, que é tanto mais difícil quanto mais elevada for a corrente, pode ser alcançado mediante a adição de limitadores de corrente, permitindo assim conferir um maior nível de segurança, robustez e confiabilidade das redes de nova geração.

#### 3.1 Limitadores de Corrente

Existem distintos tipos de limitadores de corrente instalados nas redes eléctricas, principalmente limitadores convencionais. De referir que actualmente existem também diversos projectos de desenvolvimento de LCS, alguns dos quais enunciados adiante.

Essencialmente, o limitador de corrente deve possuir os seguintes atributos (Xin, et al., 2006) (Hewitson, Brown, & Balakrishnan, 2004):

- a. Impedância suficientemente baixa em funcionamento normal.
- b. Impedância suficientemente elevada em situações de falha.
- c. Rápida detecção de falha.
- d. Rápida resposta a uma falha, em menos de um ciclo de onda.
- e. Transição veloz para o estado de funcionamento normal após a eliminação da falha, em menos de meio ciclo.
- f. Capacidade de resposta aquando da ocorrência de duas falhas em períodos de 15 segundos.
- g. Baixos requisitos de manutenção.
- h. Compatibilidade com os sistemas de protecção já existentes.

Para aplicações comerciais, e em relação aos sistemas existentes, o dispositivo ideal deve ser compacto, mais leve e barato, totalmente automático, confiável e com um período de vida longo, reduzindo assim riscos a nível social e ambiental (Xin, et al., 2006).

### 3.1.1 Soluções Convencionais para Limitar as Correntes de Curto-Circuito

As soluções convencionais existentes que têm como função reduzir as correntes de CC apresentem diferentes graus de eficácia. As formas mais comuns para a redução dos níveis de corrente de curto-circuito são (Kovalsky, et al., 2005) (Schaffer, 2000) (Schmitt, Fault Current Limiters, 2003):

a. Construção de novas subestações.

Esta solução permite corrigir os problemas e também proporciona o futuro crescimento da rede eléctrica. No entanto é a solução mais dispendiosa e o tempo de construção é longo.

b. Divisão ou construção novos barramentos.

Este recurso influencia a interconectividade<sup>10</sup> da rede. Por um lado reduz de forma eficiente o número de fontes que podem alimentar e contribuir para uma falha. Contudo, em situação de funcionamento normal ou de sobrecarga, tem a desvantagem de diminuir também o número de fontes que fornecem carga. Este recurso apresenta-se como uma medida menos dispendiosa que a anterior.

c. Actualização dos vários disjuntores da rede.

Na ocorrência de uma falha, normalmente mais do um disjuntor é afectado, daí que seja importante proceder à actualização de grande parte deles quando se aumenta o nível das correntes de CC. Esta solução tem a desvantagem de não reduzir as correntes de falha disponíveis e os seus perigos associados.

d. Reactores de núcleo de ar e transformadores de alta impedância.

Estes dispositivos, fáceis de instalar, limitam a corrente devido à queda de tensão aos seus terminais. Este género de equipamento não necessita de manutenção regular e tem pouco impacto ambiental. No entanto, têm como inconveniente o facto de apresentarem quedas de tensão e perdas mesmo em regime normal, que podem interferir com outros componentes e provocar instabilidade ao sistema.

e. Fusíveis de alta tensão.

Esta solução de limitação de corrente consiste em dispor os fusíveis em série com a linha. Assim, quando surge uma falha, a corrente na linha é descontinuada. Porém, até que se proceda à substituição do equipamento, o circuito mantém-se em aberto.

f. Limitadores de corrente pirotécnicos ou limitadores  $I_s$ .

Estes limitadores são compostos por dois caminhos em paralelo. Um deles apresenta o condutor que possibilita uma passagem preferencial para a circulação da corrente (com perdas reduzidas). No outro caminho, encontra-se o fusível encarregue pela interrupção da corrente na linha.

---

<sup>10</sup> Diversas fontes ligadas ao mesmo barramento.

O seu modo de operação baseia-se num sensor de corrente que interrompe a passagem de corrente pelo condutor preferencial quando é detectado um aumento abrupto da mesma. Logo, a corrente passa a circular pelo caminho do fusível, que ao se fundir instiga o final do CC em menos de um quarto de ciclo da onda.

### 3.1.1.1 Exemplos de Limitadores de Corrente Convencionais

A empresa ABB<sup>11</sup> concebeu um limitador de corrente pirotécnico ( $I_s$ ). Em termos de desempenho, e de acordo com os dados do produtor, este limitador com gamas de funcionamento entre [0,75 - 40,5] kV e [630 – 5000] A é eficiente na detecção e limitação de uma corrente de falha em menos de 1 ms. Na Figura 3.1 encontra-se ilustrado o modelo em questão.



**Figura 3.1 – Limitador  $I_s$  da ABB. Fonte: <http://www.abb.com/>.**

Outro projecto desenvolvido no âmbito dos limitadores de corrente convencionais é o reactor de núcleo de ar por parte da empresa Hilkar. Actualmente, este fabricante produz este tipo de limitadores até 420 kV. Estes reactores têm o propósito de limitar as correntes de falha durante um determinado período de tempo, sendo também utilizados como reactores de partilha de carga para equilibrar a corrente em circuitos paralelos. Esta solução tem como inconveniente o facto de apresentar impedância alta e dissipação de calor em actividade normal (Bauml & Kaltenborn, 2011). Apresenta-se na Figura 3.2 o aspecto da referida tecnologia da Hilkar.

<sup>11</sup> Asea Brown Boveri - <http://www.abb.com/>



Figura 3.2 – Reactor de núcleo de ar da Hilkar. Fonte: <http://www.hilkar.com/>.

### 3.2 Limitadores de Corrente Supercondutores

O conceito base dos LCS consiste no aproveitamento da não linearidade inerente à resistividade dos materiais na transição entre o estado supercondutor e o estado normal. Estes limitadores caracterizam-se pelo seu rápido tempo de resposta aquando da ocorrência de uma falha. Este atributo impossibilita sobrecargas prejudiciais aos elementos distribuídos ao longo da rede eléctrica.

Pelo exposto, resulta que a integração destes dispositivos nas redes de geração, transporte e distribuição é benéfica para a protecção das mesmas. Tipicamente, os LCS introduzidos nos sectores de geração e distribuição são direccionados para aplicações de média tensão<sup>12</sup> (MT). No que concerne às redes de transporte, os LCS são mais empregados em situações de alta tensão<sup>13</sup> (AT). Para aplicações que requerem níveis de tensão muito superiores<sup>14</sup>, estes dispositivos não se apresentam viáveis devido à dificuldade em implementar um sistema que suporte níveis tão elevado de tensão. Não se exclui a possibilidade de inserção em baixa<sup>15</sup> tensão (BT) (Steurer & Noe, 2007).

Os principais critérios associados aos LCS quando instalados nas redes são (Pina, 2010):

- a. Corrente de activação.  
Corrente na linha quando se inicia a penetração de fluxo ligado no ferro.
- b. Corrente presumida.  
Corrente de linha sem a presença do limitador.
- c. Corrente limitada.  
Quantidade de corrente que é limitada, em comparação com a corrente presumida, devido à presença do limitador.
- d. Valores nominais de tensão e corrente.  
Valores registados na rede em que estão introduzidos.

<sup>12</sup> Níveis de tensão nominal inferior a 60 kV.

<sup>13</sup> Níveis de tensão nominal iguais ou superiores aos 60 kV.

<sup>14</sup> Níveis de tensão superiores aos 300 kV.

<sup>15</sup> Níveis de tensão de 230 V entre fase e neutro e 400 V entre fases.

A nível das potenciais localizações da rede energética, onde se torna útil o emprego dos LCS, temos as seguintes possibilidades (Kozak & Janowski, 2003) (Pina, 2010):

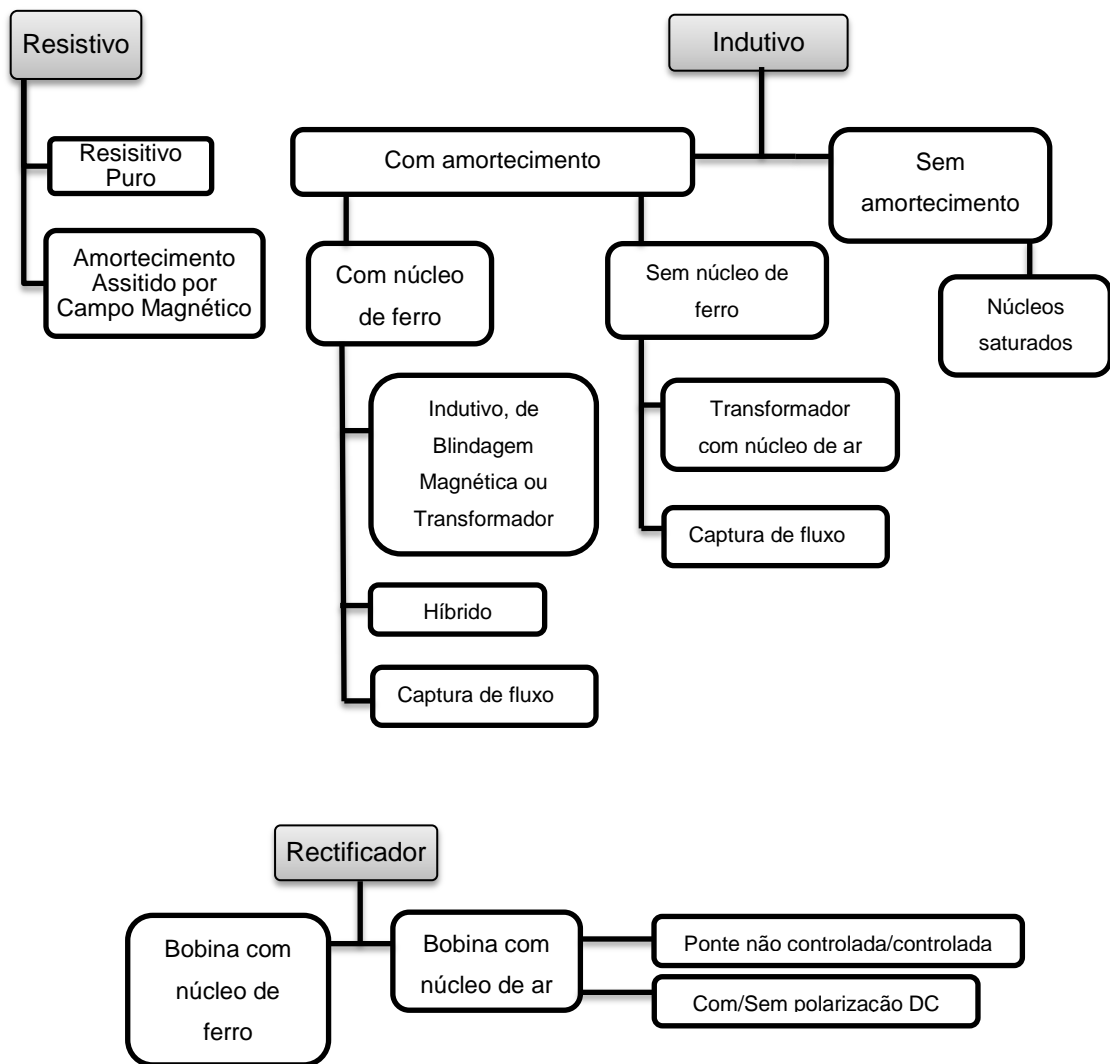
- Redes de distribuição.
  - a. Interligação entre barramentos nas subestações: a presença do dispositivo permite a limitação das correntes originadas pelos defeitos nos barramentos e possibilita a circulação de energia por uma alternativa com menos perdas.
  - b. Ramais de entrada de postos de transformação: a presença do LCS garante a protecção a toda a ramificação.
  - c. Ramais de saída dos postos de transformação: a corrente proporcionada por uma falha é limitada pela presença do LCS.
  - d. Protecção de cargas críticas em MT:
  - e. Ligação a fontes de produção descentralizada: as correntes originadas pela produção descentralizada, como por exemplo a eólica, são limitadas pela presença do LCS.
- Redes de transporte.
  - a. Ligação a fontes de produção centralizada: as correntes provenientes da produção centralizada são limitadas pela existência do LCS à saída do gerador.
  - b. Em interligação entre sub-redes de transporte.

### **3.2.1 Classificação dos Limitadores de Corrente Supercondutores**

Os LCS podem ser classificados em três tipos, de acordo com o tipo de ligação que estabelecem com a linha. Caso o LCS se encontre em série com a linha, é designado por limitador de tipologia resistiva; caso a ligação estabelecida entre a linha e o material supercondutor seja magnética, então a tipologia é classificada de indutiva; por último, se a ligação é criada mediante a utilização de uma ponte rectificadora, o limitador é conhecido por rectificador. Por sua vez, estes três grupos dividem-se em subgrupos, conforme o aproveitamento ou não da transição entre o estado supercondutor e o estado normal<sup>16</sup>, ou o recurso a núcleos de ferro, entre outros factores e propriedades (Pina, 2010). Na Figura 3.3 encontra-se as possíveis classificações para os LCS.

---

<sup>16</sup> Fenómeno designado por amortecimento (e também conhecido por *quench*).



**Figura 3.3 – Classificação dos Limitadores de Corrente Supercondutores.**

Relativamente ao número de fases que constitui os LCS, estes podem ser classificados como monofásicos ou trifásicos. Atendendo ao facto de que uma rede eléctrica real, a qual é inerentemente desequilibrada, é trifásica, advém a importância de testar estes dispositivos em aplicações de energia prática numa rede trifásica (Rahman, Lie, & Prasad, 2010).

Importa referir as principais características de um limitador de tipologia indutiva, visto o que o objectivo da dissertação aborda a construção e ensaio de um LCST do tipo indutivo.

Para informações acerca das principais características e método de funcionamento dos LCS do tipo resistivo, sugere-se a consulta das referências (Bauml & Kaltenborn, 2011), (Kalsi, 2011), (Lamas, 2009) e (Pina, 2010).

### 3.2.1.1 Limitadores de Corrente Supercondutores do Tipo Indutivo

Os limitadores de tipologia indutiva comportam-se como um transformador em que o enrolamento secundário se encontra em CC em regime normal, sendo formado por material superconductor. Estes limitadores baseiam-se no princípio do diamagnetismo do superconductor, i.e., quando no estado superconductor, o campo magnético é expelido pelo material com essas propriedades (Bauml & Kaltenborn, 2011).

Em termos concisos sobre o seu funcionamento, verifica-se que a impedância do limitador em condições normais de funcionamento é próxima de zero, uma vez que a impedância nula do superconductor do secundário é reflectida no primário. Por outro lado, no caso de uma falha, a impedância originada na bobina do secundário, é transmitida para o circuito, limitando assim as correntes de falha (Janowski, et al., 2004).

Diversos estudos contribuíram para a demonstração da viabilidade dos limitadores de corrente do tipo indutivo e que empregam o uso de fita SAT na forma de cilindros ocos ou anéis empilhados (Majoroš, Janšak, Sello, & Zannella, 1997). Estes dispositivos comparativamente aos resistivos, e pelo facto de estarem ligados magneticamente com a linha, não apresentam os mesmos problemas de desgaste do material.

No que respeita às vantagens e desvantagens desta tipologia, numa perspectiva de aplicações de potência, e em comparação com as outras duas categorias de limitadores de corrente supercondutores, pode-se nomear as seguidamente citadas (Pina, 2010):

- Vantagens.
  - a. Na medida em que a ligação com a linha é realizada magneticamente, as pontas terminais de corrente são dispensáveis, excepto nos casos dos núcleos saturados.
  - b. Possibilidade de modificar a impedância do dispositivo mediante a variação do número de enrolamentos que compõem o primário.
  - c. Maior facilidade de suprimir os pontos quentes e ausência de questões de integridade física relativamente aos LCS do tipo resistivo, na medida em que estão ligados magneticamente com a linha.
  - d. Na topologia sem amortecimento com núcleos saturados, não ocorrem perdas AC e, não há necessidade do material recuperar o estado superconductor após a resolução da falha, pois encontra-se sempre neste estado.
- Desvantagens.
  - a. A existência de núcleos ferromagnéticos resulta em peso e volume consideráveis.
  - b. Inoperáveis em redes DC.
  - c. Dificuldades em integrar limitadores indutivos com supercondutores em blocos maciços em redes de alta tensão, devido ao facto de estes apresentarem propriedades anisotrópicas e também pelas dificuldades inerentes no fabrico de blocos homogéneos de grandes dimensões.

Atendendo aos factores exposto acerca dos LCS de tipologia indutiva, é natural o crescente interesse e desenvolvimento de projectos que abordam a construção de equipamentos desta tipologia para aplicações de potência. Contudo, existem dificuldades de comercialização devido à elevada quantidade de material, com propriedades magnéticas, que é necessária.

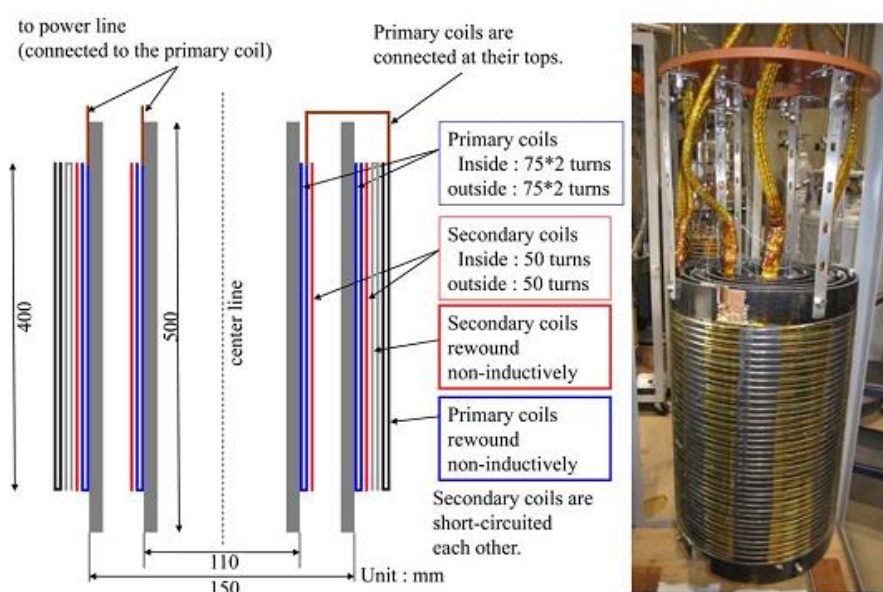
O primeiro projecto respeitante a um LCS do tipo indutivo teve lugar em 1997, por parte da ABB, tendo sido dimensionado para uma potência de 1,2 MVA, sendo a corrente e tensão nominais de 70 A e 10,5 kV, respectivamente. O limitador foi construído com base num núcleo de três colunas (arquitectura trifásica), em que os secundários são baseados em anéis SAT de Bi-2212 (38 cm de diâmetro, 8 cm de altura e 0,18 cm de espessura), sendo que se procedeu ao fortalecimento das suas propriedades eléctricas, mecânicas e térmicas, com recurso ao uso de faixas de aço e epoxy com fibra de vidro. Nos CC trifásicos ensaiados em laboratório, para uma corrente presumida de 60 kA, observou-se uma limitação de 700 A no primeiro meio ciclo, e a menos de 250 A depois de 50 ms. O dispositivo concebido, ilustrado na Figura 3.4, foi instalado na Suíça, mais precisamente na central hidroeléctrica Kraftwerk am Löntsch.



**Figura 3.4 – LCST produzido pela ABB. Retirado de (Paul, et al., 1997).**

A nível de projectos mais recentes, uma equipa de investigadores Japoneses divulgou em Dezembro de 2012, um relacionado com a construção e ensaio de um transformador limitador de corrente supercondutor trifásico do tipo indutivo, em que os enrolamentos do primário e secundário supercondutor do dispositivo apresentam uma estrutura concêntrica bobinada (Shirai, et al., 2013). As espiras do primário foram enroladas em dois cilindros de diferentes diâmetros, de modo a que o campo magnético, proveniente da área interna do cilindro de diâmetro, inferior fosse o menor possível, e a circulação de fluxo permanecesse entre os dois cilindros, sendo anulado pela acção do supercondutor no secundário. O primário é ligado à linha do circuito. Quanto ao secundário, este é construído da mesma forma e sobre a bobina do primário, e encontra-se em CC, sendo formado por menos espiras que o primário. Verifica-se esta geometria nos três transformadores que compõem o limitador trifásico.

O projecto foi dimensionado para operar de duas formas possíveis em operação de falha: para correntes de CC baixas, apenas o secundário transita para o estado normal; para correntes de CC elevadas, ambas as bobinas transitam para o estado normal, ocorrendo uma consequente adição de impedância resistiva ao circuito por parte do primário. O desempenho do protótipo construído foi imerso em azoto líquido e sujeito a curto-circuito desequilibrados<sup>17</sup>, à escala laboratorial. Por exemplo, na falha bifásica-terra, a corrente presumida, i.e., sem o LCST, de 550 A foi reduzida a 220 A. Na falha fase-terra, a corrente presumida de 500 A da fase afectada foi reduzida a 200 A, e no defeito fase-fase, a corrente sem LCST de 500 A foi reduzida a 200 A com o auxílio do dispositivo construído. Na Figura 3.5 encontra-se representado o protótipo construído do projecto em questão. As especificações de construção e os resultados pormenorizados encontram-se em (Shirai, et al., 2013).



**Figura 3.5 – Corte transversal da fase A do LCST (lado esquerdo). Estrutura completa do LCST construído (lado direito). Retirado de (Shirai, et al., 2013).**

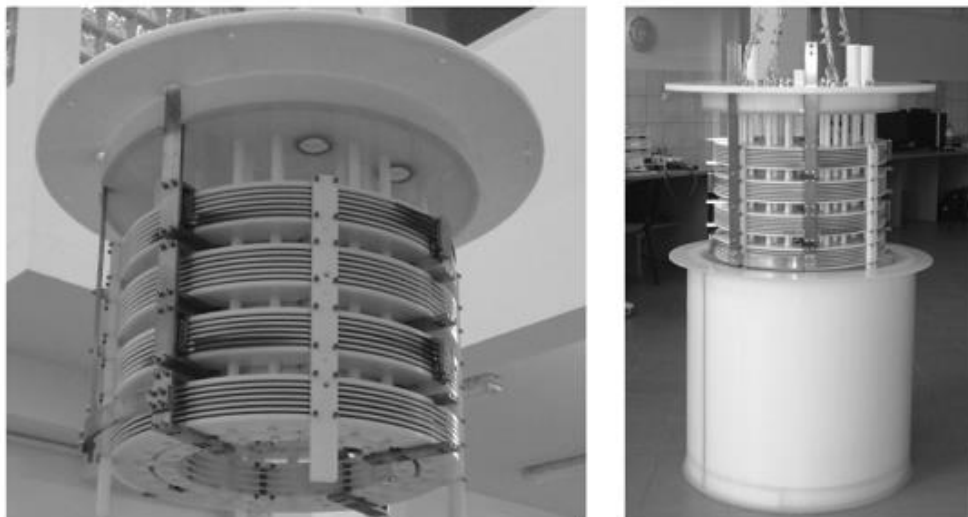
Recentemente, em (Kozak, Majka, Kozak, & Janowski, 2012), abordou-se a edificação e ensaio de um LCS do tipo indutivo sem núcleo de ferro, com 600 A de corrente nominal para sistemas de média tensão. O limitador é constituído por quatro unidades idênticas que se encontram imersas em azoto líquido. Cada unidade é formada por três bobinas, em que o enrolamento primário e secundário, compostos por fita SF12050<sup>18</sup> SAT de 2G<sup>19</sup>, são ligados magneticamente com o enrolamento primário de cobre. Com esta arquitectura é garantida uma queda de tensão baixa aos terminais do limitador em operação normal, devido ao acoplamento magnético considerável entre os enrolamentos supercondutores do primário e secundário. Esta solução permite reduzir o tamanho e peso do dispositivo.

<sup>17</sup> Falhas fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase.

<sup>18</sup> SF corresponde a supercondutores, onde as fases são constituídas por ferro, ao passe que 12050 indica uma largura de 12 mm e espessura de 0,5 mm.

<sup>19</sup> As fitas supercondutoras dizem-se de primeira (1G) ou segunda geração (2G), sendo constituídas respectivamente por material supercondutor BSCCO e Y-123. As fitas 2G apresentam campos, temperaturas e densidades de corrente superior do que as fitas 1G, e melhores características mecânicas.

O protótipo sem núcleo foi submetido a ensaios de 10 kV num laboratório de potência, sendo a falha activada passados 50 ms. Nestas condições de ensaio, a corrente presumida de 15,67 kA foi limitada para 4,94 kA, demonstrando a capacidade limitadora do dispositivo. Na Figura 3.6 observa-se o limitador do tipo indutivo sem núcleo. Consulta detalhada dos parâmetros dos enrolamentos e do limitador em (Kozak, Majka, Kozak, & Janowski, 2012).



**Figura 3.6 – LCST do tipo indutivo sem núcleo com enrolamentos supercondutores de fita SF12050 SAT de 2G. Retirado de (Kozak, Majka, Kozak, & Janowski, 2012).**

Em Outubro de 2008, a Zenergy Power procedeu ao fabrico de um segundo<sup>20</sup> protótipo de LCST do tipo indutivo com núcleo de ferro saturado, de 1200 A de corrente nominal e 15 kV, o qual foi ensaio nos laboratórios da PowerTech. Os ensaios executados foram eficazes a limitar em cerca de 30% a corrente originada pela falha. Devido ao sucesso alcançado, o limitador foi instalado, em Março de 2009, numa rede eléctrica “inteligente”, destinada às tecnologias inovadoras, intitulada “Circuit of the Future” e localizada numa subestação no sul da Califórnia. Com este feito, o dispositivo produzido pela Zenergy Power tornou-se no primeiro limitador de corrente constituído por material SAT a integrar e a operar, deste então, na rede eléctrica dos Estados Unidos da América, tendo o aspecto evidenciado na Figura 3.7 (Kalsi, 2011).

---

<sup>20</sup> O primeiro protótipo foi construído e ensaiado em 2007.



**Figura 3.7 - LCS produzido pela Zenergy Power, instalado na subestação "The Circuit of the Future" da rede elétrica dos Estados Unidos da América. Fonte: <http://www.zenergypower.com/>. Último acesso em Agosto de 2013.**

Na Universidade de Braunschweig, Alemanha, em Outubro de 2009, foi construído e ensaído, à escala laboratorial, um LCS monofásico do tipo indutivo, de 13 MVA (6,4 kV/2000 A), baseado em fita SAT 2G YBCO, e designado por iSFCL (Bauml & Kaltenborn, 2011). Os mais de 100 curto-circuitos efectuados permitiram validar o sucesso da arquitectura concebida e capacidade limitadora, verificando-se a redução de correntes presumidas de 68 kA para 9 kA de amplitude num período inferior aos 5 ms. O dispositivo exibiu um tempo de reacção à falha de 0,3 ms e 0,2 s de recuperação ao estado supercondutor após a resolução da mesma (Klein, 2010).

Devido aos resultados promissores verificados, resultou um projecto intitulado por "iSFCL Project Augsburg", que envolve uma parceria entre a Schneider Electric Energy Business, Bruker High Temperature Superconductors e Stadewerke Augsburg, e que consiste na construção e instalação de um iSFCL trifásico, de 10 kV/15 MVA na rede eléctrica de Augsburg, Alemanha, até finais 2013 (Klein, H.; Energy, B.; Technologies, S., 2012). Na Figura 3.8 ilustra-se o modelo do iSFCL, ensaiado em laboratório e um dos componentes do respectivo protótipo trifásico.



Protótipo monofásico à escala laboratorial.



Protótipo trifásico. Crióstato GRFP de uma fase.

**Figura 3.8 – Projecto do LCST do tipo indutivo, intitulado “iSFCL Project Augsburg”. Retirado de (Klein, H.; Energy, B.; Technologies, S., 2012).**

No que respeita a projectos relacionados com LCS resistivos, destaca-se o projecto europeu em curso, denominado ECCOFLOW. Este projecto envolve a cooperação de 15 parceiros, entre as quais a Nexans, e baseia-se num limitador trifásico concebido com fita REBCO<sup>21</sup> e que foi projectado para dois tipos de aplicação: como barramento numa subestação; e na saída de um posto de transformação de AT/MT. Este limitador de 1 kA e 24 kV, e com capacidade de limitar correntes presumidas de 25,57 kA em cerca de 10,8 kA, para falhas até 1000 ms, vai. Este projecto apresenta é considerado pioneiro, na medida em que consiste na construção e ensaio do LCS e do sistema, e também na análise dos aspectos técnicos e económicos determinantes para a normalização destes dispositivos em aplicações de MT (Hobl, et al., 2013). Em Janeiro de 2013, finalizou-se a construção do dispositivo, que será primeiramente ensaiado num sistema energético em Milão, Itália. Após os testes necessários, o limitador será instalado numa subestação em Espanha, e na Eslováquia será aplicado à saída de um posto de transformação. Na Figura 3.9 é possível observar o aspecto do limitador originado por esta cooperação.

<sup>21</sup> Material SAT que se encontra no estado supercondutor acima da temperatura de ebulição do azoto líquido (77 k). Este material caracteriza-se pela resistência nula que apresenta à passagem de corrente.



Crióstato no interior do LCS construído



Visão global do LCS construído

**Figura 3.9 - LCS construído pelo projecto ECCOFLOW. Fonte: <http://eccoflow.org>. Último acesso em Agosto de 2013.**

Referência também a um projecto de um limitador, que apesar de apresentar tipologia indutiva, não utiliza material supercondutor. Este projecto encontra-se em fase experimental e está a ser liderado por uma equipa de investigadores da Delft University of Technology, situada na Holanda. O protótipo consiste num limitador trifásico do tipo indutivo, de 10 kV/6,8 MVA, com um núcleo comum e enrolamentos trifilares, sendo estes enrolamentos formados pelo enrolamento simultâneo de três cabos de média tensão. O desenho e construção deste dispositivo foram concebidos com o objectivo de reduzir a quantidade de material magnético, e consequente diminuição do seu custo. Assim, ao ter sido usado apenas um núcleo magnético

para as três fases, foi possível reduzir a quantidade de material magnético em cerca de 66%. Na Figura 3.10 encontra-se o limitador em questão.

De modo a comprovar a sua capacidade em proteger uma rede energética, o protótipo é submetido a duas etapas de ensaio: aos 400 V e aos 10 kV. Até à data, foram divulgados os resultados dos ensaios realizados aos 400 V, que permitiram concluir que o protótipo é eficiente a limitar falhas fase-terra, que correspondem a 95% de ocorrência de falhas, tendo-se registado uma limitação de uma corrente presumida de 2,9 kA para 113,6 A. Para defeitos que envolvem múltiplas fases, o protótipo não reagiu. (Cvoric, De Haan, Ferreira, Van Riet, & Bozelie, 2010).



**Figura 3.10 - Perspectiva frontal (lado esquerdo) e perspectiva traseira (lado direito) do limitador de corrente, de 10 kV, do tipo indutivo construído na Delft University of Technology (Holanda). Retirado de (Cvoric, De Haan, Ferreira, Van Riet, & Bozelie, 2010).**

### 3.3 Síntese

Neste capítulo procedeu-se à exposição das tecnologias que têm a função de limitar as correntes de CC. Descreveu-se as principais características que um limitador de corrente deve possuir, com análise individual às soluções convencionais e aos métodos que requerem material supercondutor, e suas comparações. Analisa-se também as diferentes classificações atribuídas aos LCS, com especial ênfase aos do tipo indutivo, visto a dissertação abordar a construção de um limitador indutivo, e por último, apresenta-se alguns projectos encontrados na literatura associados a esta tipologia.

## 4 Aspectos Construtivos do Limitador de Corrente

Neste capítulo descreve-se os aspectos construtivos dos componentes que constituem o protótipo do LCST do tipo indutivo de blindagem magnética desenvolvido na presente dissertação. Aborda-se também as características pretendidas para o seu funcionamento e outros dispositivos utilizados.

Com o intuito de solucionar o problema relacionado com o aumento do consumo de energia que se traduz no aumento de correntes de CC, surge o conceito de limitadores supercondutores. Por meio desta tecnologia pretende-se dotar as redes de maior capacidade de bloqueio às correntes de falha e conseqüentemente elevar a sua competência e fiabilidade.

Os limitadores supercondutores, em relação aos limitadores convencionais, beneficiam de atributos importantes que contribuem para um funcionamento mais seguro do sistema eléctrico. Tais atributos são: diminuição da impedância do dispositivo em regime de exercício normal e também das perdas por dissipação de energia, que resulta no aumento da sua corrente crítica<sup>22</sup> (Sokolovsky V. , Meerovich, Chubraeva, & Vajda, 2010); sob condições de falha insere uma impedância adicional ao circuito, contribuindo para uma maior limitação da corrente de CC e conseqüente redução dos malefícios materiais; maior rapidez de acção perante o aparecimento de um defeito; não afectam as estruturas metálicas próximas com indução electromagnética e ampliam a estabilidade da rede eléctrica (Sokolovsky V. , Meerovich, Vajda, & Beilin, 2004).

Assim, o modelo do LCST implementado tem como finalidade ser um dispositivo potencialmente adequado à protecção de redes de distribuição e transporte de energia, tendo a capacidade de reduzir os níveis de correntes de falha impostas por CC.

Por último, na medida em que os supercondutores em blocos maciços apresentam propriedades anisotrópicas, o que em algumas situações pode constituir um problema, e também devido às dificuldades inerentes no fabrico de blocos de grandes dimensões (Arsénio, 2012), o uso de fitas supercondutoras têm vindo a ser cada mais intensificado em mecanismos de energia, independentemente das proporções<sup>23</sup> do supercondutor. Por este motivo, o LCST foi construído com recurso a fita supercondutora.

### 4.1 Princípio de Funcionamento do Limitador

O circuito implementado no laboratório consiste num sistema trifásico, em que cada uma das fases do circuito está ligada a uma das fases do LCST. Em cada fase do sistema, encontra-se presente uma resistência de linha,  $R_L$  e uma resistência de carga,  $R_C$ , antes e depois do LCST construído, respectivamente.

Após a implementação do circuito, provocar-se-ão de quatro diferentes CC (trifásico, fase-fase, fase-terra e fase-fase-terra), variando em cada tipo o número de fitas

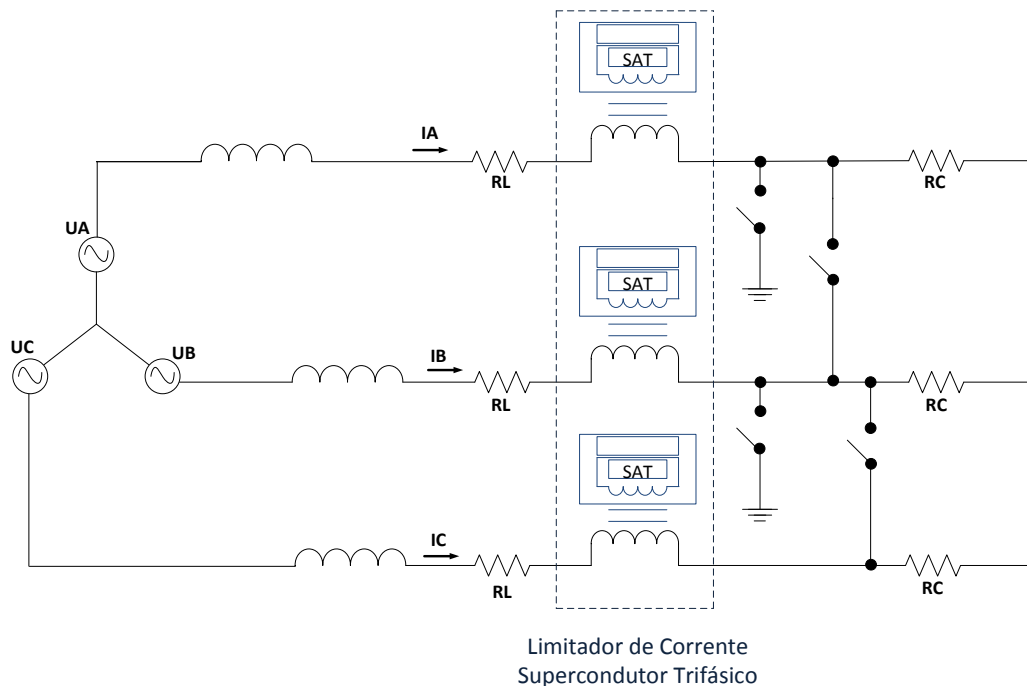
---

<sup>22</sup> Corrente dos supercondutores que quando ultrapassada induz à transição do estado supercondutor para o estado normal.

<sup>23</sup> Nos supercondutores de reduzidas proporções, i.e., com um raio de curvatura reduzido, o uso de fita supercondutora não é adequado pois as suas características são susceptíveis a sofrer danos.

supercondutoras no secundário do LCST, de forma a examinar o desempenho do mesmo em regime de operação normal e de falha.

No que respeito ao funcionamento do LCST de tipologia indutiva, este dispositivo liga-se à linha eléctrica através de um núcleo ferromagnético, funcionando 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, verificando-se esta geometria para cada fase. Observe-se na Figura 4.1 o esquema projectado para o ensaio do LCST.



**Figura 4.1 - Esquema de princípio do LCST.**

- Regime de operação normal

Em situações de operação normal, a corrente de cada fase  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$ , deverá ser gerada somente pela fonte de tensão e pela respectiva resistência de linha,  $R_L$  e a de carga,  $R_C$ . O bloco do limitador deve apresentar um comportamento “invisível” à rede, ou seja, estorvar o aparecimento de impedância e assim possibilitar a diminuição de perdas. Com isto, pretende-se que o dispositivo permita a blindagem magnética, garantida pela não variação de fluxo magnético no núcleo ferromagnético. Este propósito é atingido pelos anéis de fita supercondutora, que são um material naturalmente diamagnético, e que se encontram em CC no secundário do protótipo. Pelo facto das fitas estarem em CC, a FMM criada pelo primário é anulada pela FMM do secundário.

- Regime de operação após ser detectada uma falha

No que toca aos momentos de falha, provocadas pelo fecho de um ou múltiplos interruptores presentes na Figura 4.1 e, que origina o conseqüente aumento abrupto de corrente da fase onde se provoca o CC, fruto da inexistência de carga, o LCST deve exibir elevada impedância, no menor instante de tempo possível, de maneira a que as correntes originadas pela falha sejam limitadas para valores que não sejam suficientemente grandes para o dano dos componentes existentes na rede. Este objectivo ocorre quando o material superconductor, presente no secundário do protótipo, transita do estado superconductor para o estado normal, devido à corrente induzida no superconductor exceder o seu valor crítico. Esta transição leva à perda das propriedades superconductoras do material, levando-o a exibir um comportamento resistivo, admitindo assim a variação de fluxo no núcleo e conseqüente adição de impedância ao circuito.

Apresenta-se na Figura 4.2 o circuito trifásico implementado, seguido das descrições individuais dos elementos que o constituem, devidamente assinalados:

- Três transformadores monofásicos<sup>24</sup> ligados em estrela.
- Três resistências de linha.
- Limitador de corrente superconductor trifásico do tipo indutivo de blindagem magnética.
- Três Resistências de carga.
- Sistema de aquisição de dados.
- Leitura dos dados experimentais provenientes da placa de aquisição de dados, via USB, através do software “LabView SignalExpress”.

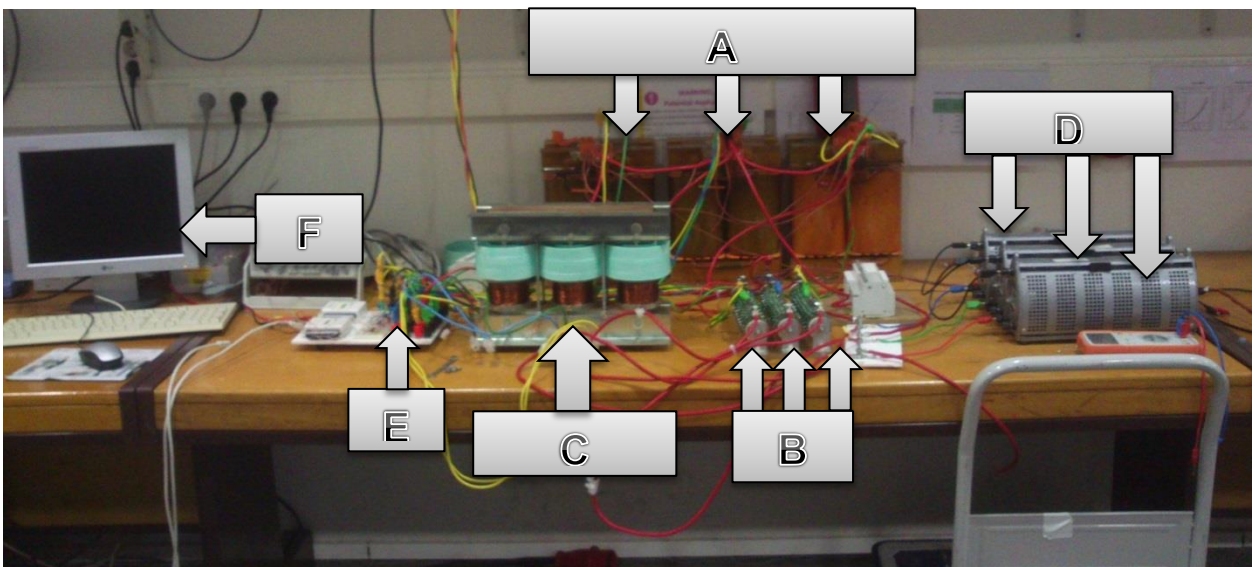


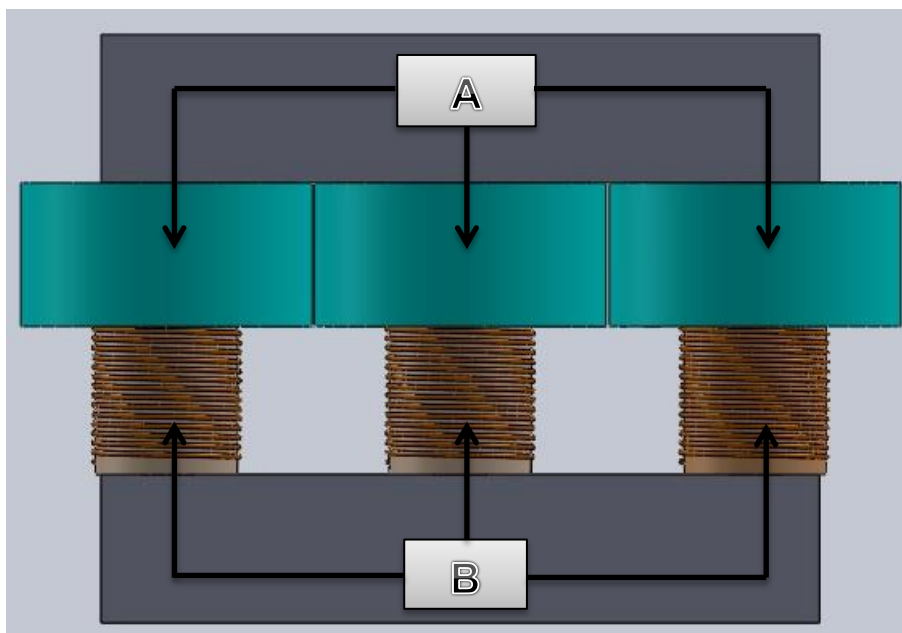
Figura 4.2 – Circuito laboratorial de ensaio com o LCST.

<sup>24</sup> Cada transformador monofásico com as seguintes características:  $U_p=400$  V,  $U_s=120$  V e  $I_s=41,7$  A

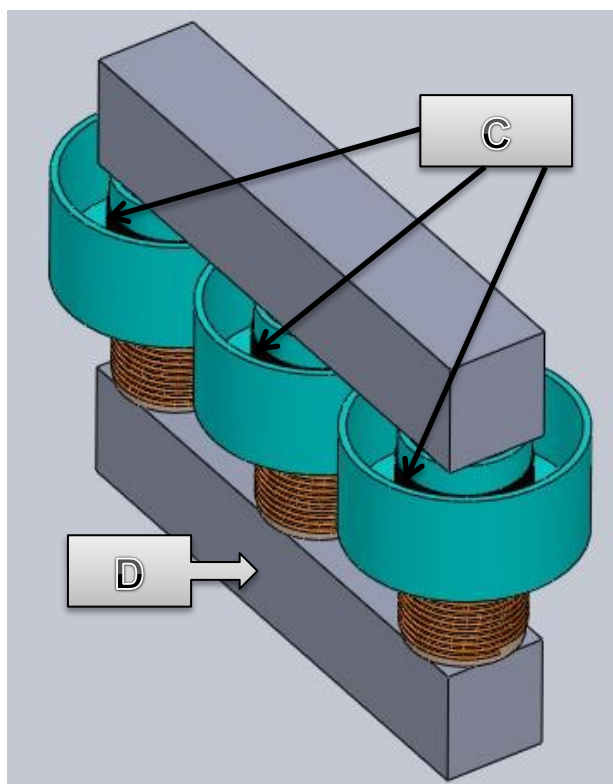
## 4.2 Construção do Limitador de Corrente

O LCST do tipo indutivo criado pode ser descrito como um transformador de corrente, pois caracteriza-se pela ligação magnética entre um enrolamento primário de fio de cobre e um enrolamento secundário de material supercondutor, em que o primário se encontra em série com a linha, e o secundário é formado por enrolamentos de material SAT que se encontram em CC. Em cada fase do circuito verifica-se esta geometria. A ligação entre o dispositivo e a linha eléctrica é feita com recurso a um núcleo ferromagnético.

Na Figura 4.3 apresentam-se duas perspectivas do LCST, concebido inicialmente com recurso à ferramenta informática “SolidWorks”. É perceptível a existência do núcleo trifásico de ferro, sendo que cada fase suporta a coexistência de um enrolamento primário e um secundário. Na metade inferior está representado os enrolamentos de fio de cobre que perfazem a bobina do primário. Relativamente à metade superior, verifica-se a existência do depósito do banho criogénico, e dos enrolamentos de fita SAT no seu interior.



Perspectiva frontal do LCST.



Perspectiva lateral do LCST.

**Figura 4.3 – Perspectivas do bloco do LCST.**

Os elementos integrantes da estrutura do LCST, que se encontram assinalados na Figura 4.3 são:

- A. Dewars para o banho criogénico.
- B. Bobina do primário formado por enrolamentos de fio de cobre.
- C. Bobina do secundário formada por material supercondutor.
- D. Núcleo trifásico ferromagnético.

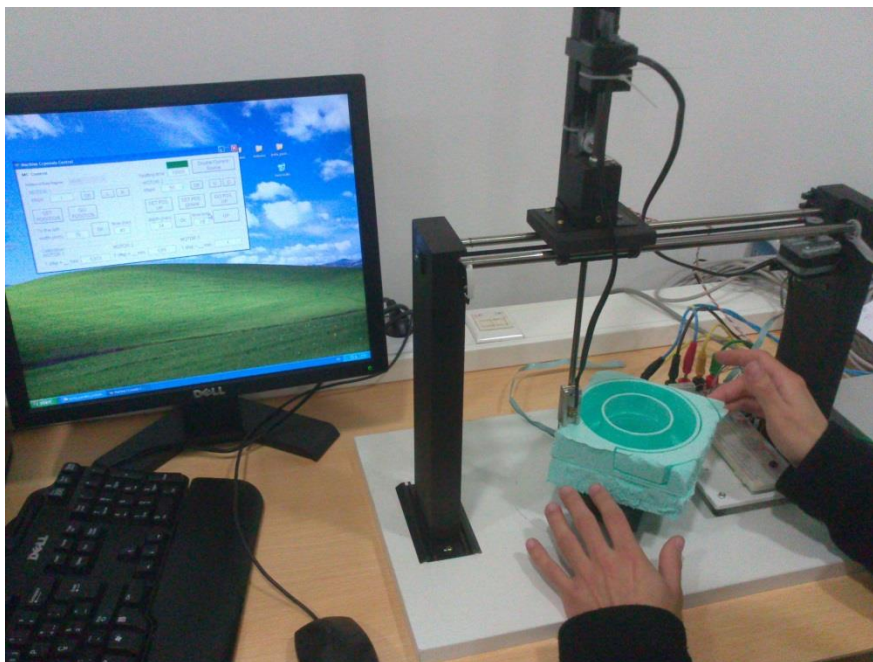
#### 4.2.1 Banho Criogénico

O secundário do LCST é composto por uma bobina em CC, produzida a partir de enrolamentos de material supercondutor. Estes anéis são colocados no interior de depósitos designados Dewars, que tem como função armazenar banho criogénico, tendo-se neste caso em concreto, recorrido ao azoto líquido<sup>25</sup> para tal propósito. Assim, ao se mergulhar o material supercondutor em banho criogénico, garante-se que o material constituinte da bobina do secundário não atinga e/ou exceda o seu valor de temperatura crítica.

Atendendo às dimensões do núcleo ferromagnético e à quantidade de fita supercondutora disponível, procedeu-se à construção dos depósitos de modo a adoptá-los de forma compacta a cada fase do LCST e, com a possibilidade de inserção de um até três espiras de fita supercondutora no secundário. A construção foi concretizada mediante a

<sup>25</sup> O azoto, neste estado físico, apresenta uma temperatura crítica de 77 K.

utilização de uma máquina específica desenvolvida no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade Nova de Lisboa. O instrumento caracteriza-se pela possibilidade de moldar objectos em formas cilíndricas, através do contacto destes com um condutor eléctrico, ao qual é aplicada uma corrente que provoca aquecimento no condutor por efeito de Joule. Consequentemente, ao se estabelecer o contacto entre o objecto e o condutor eléctrico, permite-se a moldagem deste por efeito do calor. Por sua vez, através de um computador que se encontra ligado a esta máquina, indica-se numa plataforma os parâmetros dimensionais desejados para os depósitos. Na Figura 4.4 encontra-se ilustrado o processo de construção de um dos depósitos.



**Figura 4.4 – Construção dos depósitos para a implementação em banho criogénico.**

De referir que os depósitos produzidos para fins de implementação em banho criogénico foram concebidos a partir de blocos de XPS. No Apêndice 4 encontra-se descrito as suas dimensões. Na Figura 4.5 é possível observar os objectos resultantes do procedimento explicado. No interior dos mesmos encontra-se os suportes da fita SAT.



Figura 4.5 – Depósitos do banho criogénico.

#### 4.2.2 Bobina do Primário

A elaboração de cada bobina do primário consiste em três enrolamentos independentes entre si. Dois dos enrolamentos são feitos com fio de cobre cuja secção é de  $1,5 \text{ mm}^2$ , sendo um formado por 20 espiras e outro por 60 espiras, possibilitando assim três opções no que respeita ao número de espiras que constituem o primário do LCST. Estes enrolamentos concebidos a partir de fio de cobre de  $1,5 \text{ mm}^2$  são os destinados a ficarem em série com cada linha do circuito trifásico.

Quanto ao terceiro enrolamento, este é formado por 60 espiras de fio de cobre cuja secção vale  $0,5 \text{ mm}^2$ . Este enrolamento destina-se à leitura de fluxo magnético ligado com a respectiva fase.

Por último, refira-se o facto dos três enrolamentos serem envoltos numa base de vidro acrílico, cujas dimensões encontram-se descritas no Apêndice 2. Observam-se na Figura 4.6 as bobinas construídas.



Figura 4.6 – Bobinas do primário do LCST.

### 4.2.3 Bobina do Secundário

A bobina do secundário, tal como já referido, é composta por material supercondutor em CC. Os enrolamentos foram concebidos a partir de fita Bi-2223 comercializadas pela empresa Innost<sup>26</sup>, sendo o enrolamento concluído com recurso a solda de estanho, e consequente CC da espira desenvolvida. De referir que, para situações de ensaio do LCST, antes de se submergir as espiras do secundário em banho criogénico, estas são colocadas em suportes de Celeron<sup>27</sup>, cujas dimensões estão referidas no Apêndice 3.

Na Figura 4.7 mostram-se os enrolamentos de fita supercondutora usados para a composição do secundário do LCST e, na Tabela 4.1, encontram-se expostos os dados técnicos da fita supercondutora Bi-2223, utilizada no secundário do LCST construído.



Figura 4.7 – Bobinas do secundário colocadas em suportes de Celeron.

Grandeza	Valor
Corrente crítica	90 A
Densidade crítica de corrente de engenharia	93 A/mm <sup>2</sup>
Largura	4,2 (±0,2) mm
Espessura	0,23 (±0,02) mm
Raio mínimo de curvatura	30 mm (5% de degradação em $I_{CR}$ )

Tabela 4.1– Detalhes técnicos da fita supercondutora Bi-2223 comercializada pela empresa Innost.

<sup>26</sup> Innovative Semiconductor Technology - <http://www.dwinnost.com/>.

<sup>27</sup> As propriedades mecânicas, eléctricas e térmicas deste material, garantem elevada resistência à flexibilidade e, consequentemente óptima estabilidade dimensional.

#### 4.2.4 Protótipo Desenvolvido

De acordo com os procedimentos descritos nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 e com a geometria descrita no ponto 4.2, a integração dos elementos desenvolvidos em conjunto com o núcleo de ferro, finaliza a construção do LCST.

Na Figura 4.8 é possível observar o LCST implementado. É perceptível que se trata de um núcleo trifásico, cujas dimensões estão indicadas no Apêndice 1, sendo cada fase composta pela coexistência de um enrolamento primário com um enrolamento secundário, ligados magneticamente entre si. A bobina supercondutora do secundário encontra-se no interior do depósito concebido para implementação em banho criogénico.

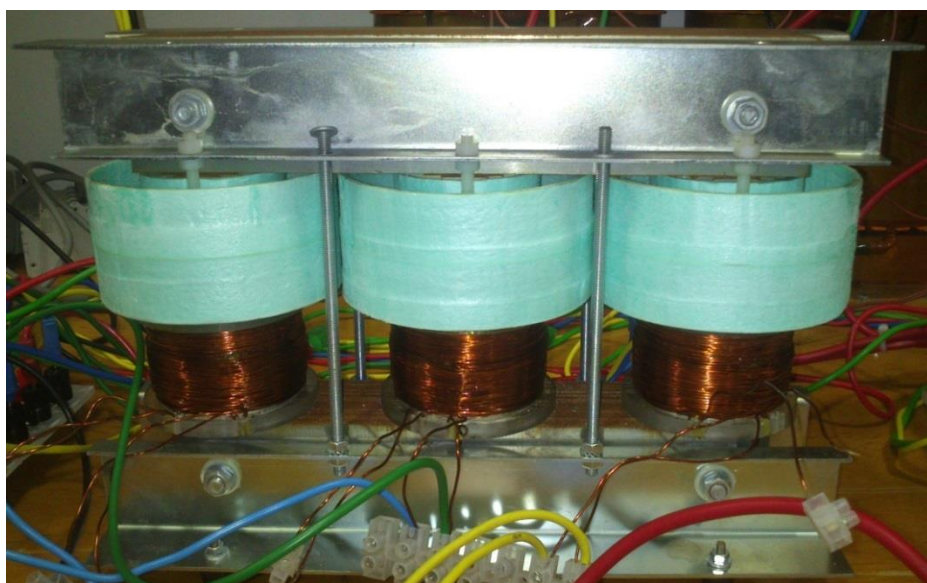


Figura 4.8 – LCST construído.

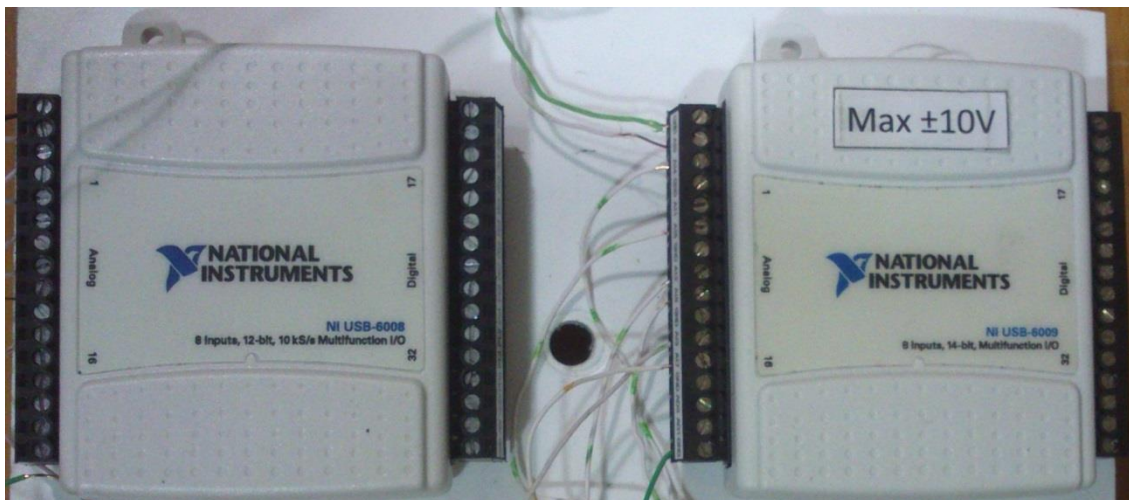
#### 4.3 Aquisição de Sinais

De modo a analisar os resultados provenientes dos ensaios de CC que se irá efectuar, torna-se necessário recorrer a um dispositivo que permita a leitura dos dados associados aos ensaios.

Visto tratar-se de um sistema trifásico, e sabendo que as grandezas que se deseja avaliar são a tensão, corrente e fluxo, conclui-se ser necessário a aquisição dos sinais de tensão nos seguintes pontos, indicados anteriormente na Figura 4.2: nas três fontes monofásicas e nos terminais de cada fase do LCST, de modo a comparar estas tensões, entre si, em situações de operação normal e de falha; nos terminais das três resistências de linha, de forma a se aceder às correntes registadas, em situação normal e de falha; e nos terminais dos enrolamentos reservados à leitura de fluxo, concebidos no primário tal como citado no item 4.2.2. Assim contabiliza-se ser necessário a recolha de doze dados, de modo a efectuar a avaliação pretendida ao LCST.

A recolha dos dados referidos foi realizada com recurso a duas placas de aquisição de sinais, nomeadamente a NI-6008 e a NI-6009, cujas características estão indicadas na Tabela

4.2. De referir que os dados das placas são disponibilizados ao utilizador via USB, através do software “LabView SignalExpress”.



NI USB-6008		NI USB-6009
8	<b>Entradas Analógicas</b>	8
12 bits	<b>Resolução Entradas Analógicas</b>	14 bits
10 kS/s	<b>Taxa de Amostragem</b>	48 kS/s

Tabela 4.2 – Dados técnicos das placas NI-6008 e NI-6009.

Atendendo ao facto de que as placas de aquisição de dados dispõem da capacidade de leitura de tensão até aos  $\pm 10$  V, e de que os ensaios experimentais são realizados a tensões mais elevadas, implementa-se um circuito auxiliar à leitura das tensões, que permita diminuir a amplitude do sinal aos 10 V, no mínimo. Assim, e com recurso aos amplificadores operacionais RC4136N, procede-se à montagem de circuitos substractores. Na Figura 4.9 encontra-se representado o esquema da montagem.

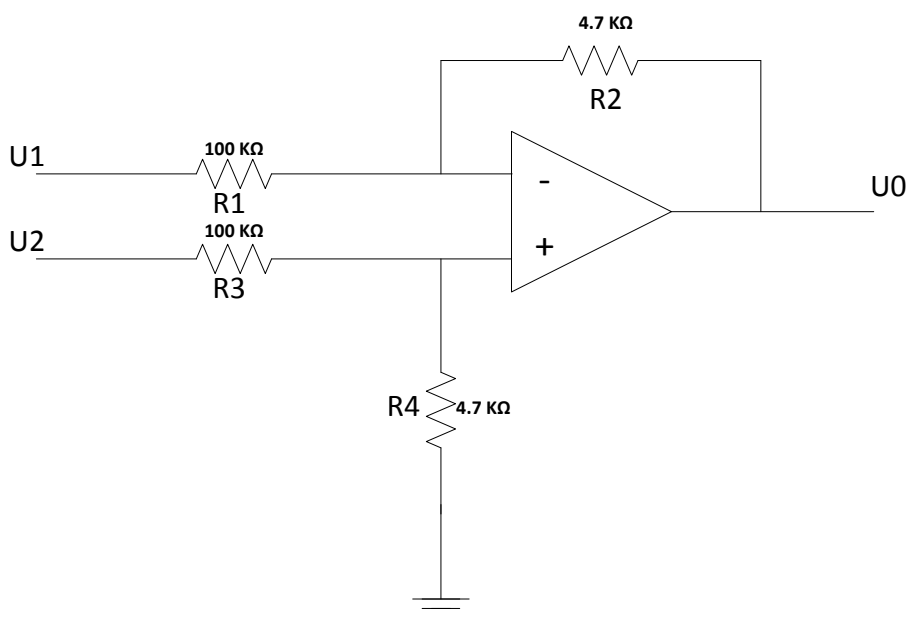
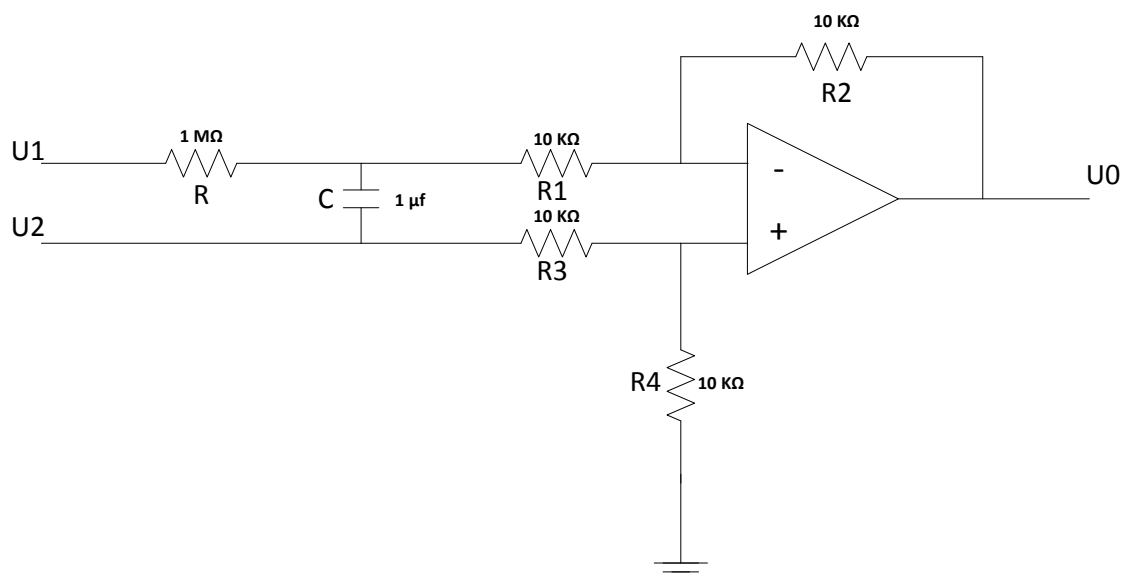


Figura 4.9 – Esquemático da montagem substractora implementada.

Visto que  $R1=R3$  e  $R2=R4$ , resulta no ganho,  $G = \frac{R2}{R1}$ , logo, para uma dada tensão de entrada, verificar-se-á à saída a tensão definida na expressão (4.1):

$$u_0 = G \cdot u_i \Leftrightarrow u_0 = G \cdot (u_1 - u_2) \quad (4.1)$$

Por último, aos circuitos substractores destinados à leitura das tensões recolhidas aos terminais dos enrolamentos do fluxo, adiciona-se um integrador, de modo a se obter o fluxo pela integração temporal da tensão. O integrador é dimensionado por uma resistência de 1 M $\Omega$  e um condensador de 1  $\mu$ F, tal como exposto na Figura 4.10. Verificou-se que os sinais adquiridos aos terminais dos enrolamentos do fluxo têm amplitude inferior a 10 V, logo não foi necessário efectuar o condicionamento destes sinais adquiridos. Assim, para esta montagem substractora verifica-se que  $R1=R2=R3=R4$ , o que resulta num ganho de  $G = \frac{R2}{R1} = 1$ .



**Figura 4.10 – Esquemático da montagem substractora, com integrador, implementada.**

Por último, na Figura 4.11, observa-se o esquema global do sistema, destinado à aquisição de dados. Na placa NI-6009 associaram-se as tensões provenientes dos enrolamentos do fluxo e dos terminais das resistências de linha, e na placa NI-6008, utilizaram-se os canais analógicos para a leitura das tensões na fonte e nos terminais do LCST.

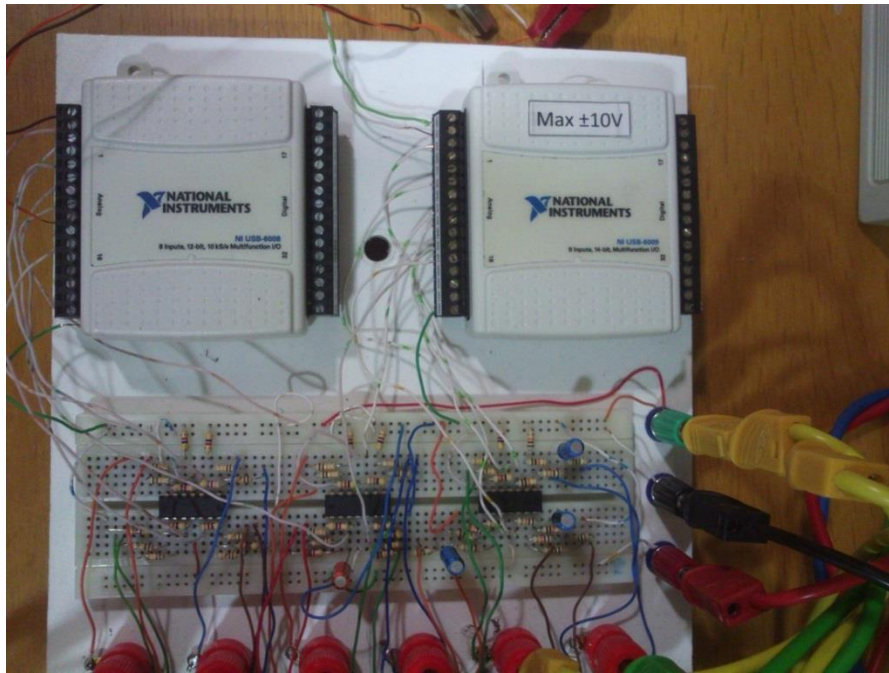


Figura 4.11 – Placas de aquisição de dados e circuitos substractores implementados.

#### 4.4 Tratamento de dados

Relativamente ao tratamento de dados, este é efectuado através dos sinais que são adquiridos pelo sistema indicado no sub-capítulo 4.3. Verifique-se a Figura 4.12 que ilustra a montagem experimental implementada de modo a avaliar o comportamento do limitador, e com referência aos locais onde se efectua a aquisição de sinais.

Pela Figura 4.12 é possível observar que a aquisição de sinais é efectuada por intermédio de dois sistemas, sendo que cada um corresponde a uma placa de aquisição de sinais e, em cada um dos seus canais, encontra-se associada uma montagem substractora, de modo a tornar possível a aquisição dos sinais por parte das placas, que tal como referido anteriormente dispõem de uma capacidade de leitura de tensão até aos  $\pm 10$  V.

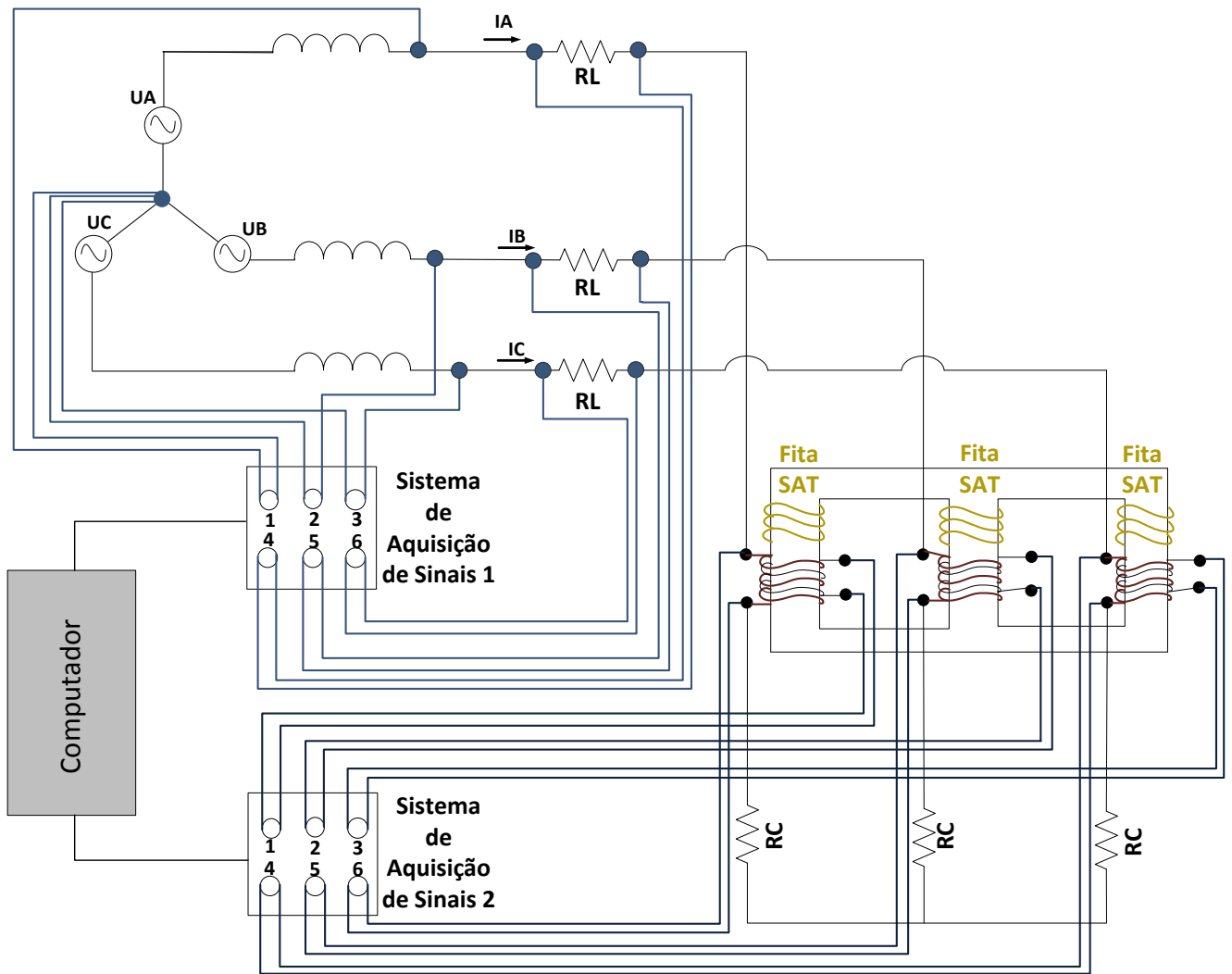


Figura 4.12 – Montagem experimental para determinação do desempenho do limitador.

#### 4.4.1 Sistema de Aquisição de Sinais 1

No “Sistema de Aquisição de Sinais 1”, efectua-se a leitura das tensões em cada transformador monofásico presente no circuito através dos canais 1, 2 e 3. Nestes canais encontra-se à entrada o circuito subtrator representado na Figura 4.9. Neste caso, os sinais adquiridos são utilizados para obter a característica de tensão da fonte em cada fase do circuito, tal como referido na expressão (4.2).

$$u_{leitura\_fonte} = u_0 \quad (4.2)$$

De forma a se obter o valor real da tensão da fonte em cada fase, multiplica-se o seu valor pelo inverso do ganho da montagem substractora, tal como indicado na expressão (4.3).

$$u_{fonte} = u_{leitura\_fonte} \cdot \frac{1}{G} \quad (4.3)$$

Quanto aos canais, 4, 5 e 6, encontra-se à sua entrada a montagem substractora ilustrada na Figura 4.9. Por estes canais efectua-se a aquisição das tensões,  $u_L$ , aos terminais de cada resistência de linha,  $R_L$ , que se encontram em cada uma das fases do circuito, tal como referido na expressão (4.4).

$$u_{leitura\_L} = u_0 \quad (4.4)$$

De modo a se adquirir o valor real da tensão aos terminais de cada resistência de linha, multiplica-se o seu valor pelo inverso do ganho da montagem substractora, como expresso na equação (4.5).

$$u_L = u_{leitura\_L} \cdot \frac{1}{G} \quad (4.5)$$

Através do cálculo indicado na expressão (4.6), obtém-se a corrente que circula em cada fase do circuito, e respectiva característica da corrente em função do tempo.

$$i_L = \frac{u_L}{R_L} \quad (4.6)$$

#### 4.4.2 Sistema de Aquisição de Sinais 2

No que respeita ao “Sistema de Aquisição de Sinais 2”, pelos canais 1, 2 e 3, procede-se à leitura das tensões recolhidas aos terminais dos enrolamentos, construídos no primário do limitador, para a leitura do fluxo. Em cada um destes canais encontra-se à sua entrada o circuito substractor com integrador, referido na Figura 4.10, de forma a se obter o fluxo magnético,  $\psi$ , pela integração temporal da tensão. Sabendo que a tensão lida à saída da montagem substractora com integrador é dada pela equação (4.7), resulta a relação entre o fluxo simples e a tensão, tal como indicado na expressão (4.8).

$$u_0 = \frac{1}{\zeta} \int u_i dt \Leftrightarrow u_0 = \frac{1}{\zeta} \int (N \frac{d\phi}{dt}) dt \quad (4.7)$$

$$u_0 = \frac{1}{\zeta} \cdot N \cdot \phi \Leftrightarrow \phi = \frac{1}{N} \cdot u_0 \cdot \zeta \quad (4.8)$$

Com o fluxo simples procede-se ao cálculo do fluxo ligado com o primário, de acordo com o mostrado na expressão (4.9), sendo assim possível obter a sua respectiva característica temporal.

$$\psi = N_1 \cdot \phi \Leftrightarrow \psi = \frac{N_1}{N_2} \cdot u_0 \cdot \zeta \quad (4.9)$$

Por outro lado, pelos canais 4, 5 e 6, efectua-se a leitura da tensão aos terminais do protótipo construído, em cada uma das suas fases. Na entrada destes canais encontra-se associado um circuitado subtractor tal como o ilustrado na Figura 4.9. A tensão aos terminais do limitador é obtida pela expressão (4.10).

$$u_{leitura\_LCST} = u_0 \quad (4.10)$$

Por último, de modo a se adquirir o valor real da tensão da fonte em cada fase, multiplica-se o valor resultante da expressão (4.10) pelo inverso do ganho da montagem subtratora associada a estes canais, tal como indicado na expressão (4.11), sendo assim possível obter a característica temporal da tensão aos terminais do limitador.

$$u_{LCST} = u_{leitura\_LCST} \cdot \frac{1}{G} \quad (4.11)$$

## 4.5 Síntese

Neste capítulo procedeu-se, numa primeira etapa, à exposição das principais características dos LCS, e principais diferenças com os limitadores convencionais. Com base nas características citadas, explicaram-se as propriedades operacionais pretendidas para o LCST do tipo indutivo de blindagem magnética, quer em regime de operação normal, quer de falha, tendo-se também indicado a composição global do circuito de ensaio implementado.

Numa segunda etapa, e no que diz respeito aos aspectos construtivos do protótipo, projectou-se inicialmente uma representação virtual do LCST a construir, com a sinalização dos elementos integrantes. Com base nessa representação, expôs-se, individualmente, as etapas de construção dos respectivos elementos constituintes. No final, indica-se o equipamento sujeito à aquisição de dados, a sua montagem e respectivas propriedades e o processo relativo ao tratamento de dados.



## 5 Procedimento Experimental, Resultados e Análise

Neste capítulo procede-se à exposição dos resultados obtidos experimentalmente, com a presença do protótipo desenvolvido no circuito implementado.

Submeteu-se o LCST a ensaios laboratoriais em que se provocou os tipos de CC possíveis de ocorrerem em sistemas trifásicos presentes nas redes de transporte e distribuição de energia.

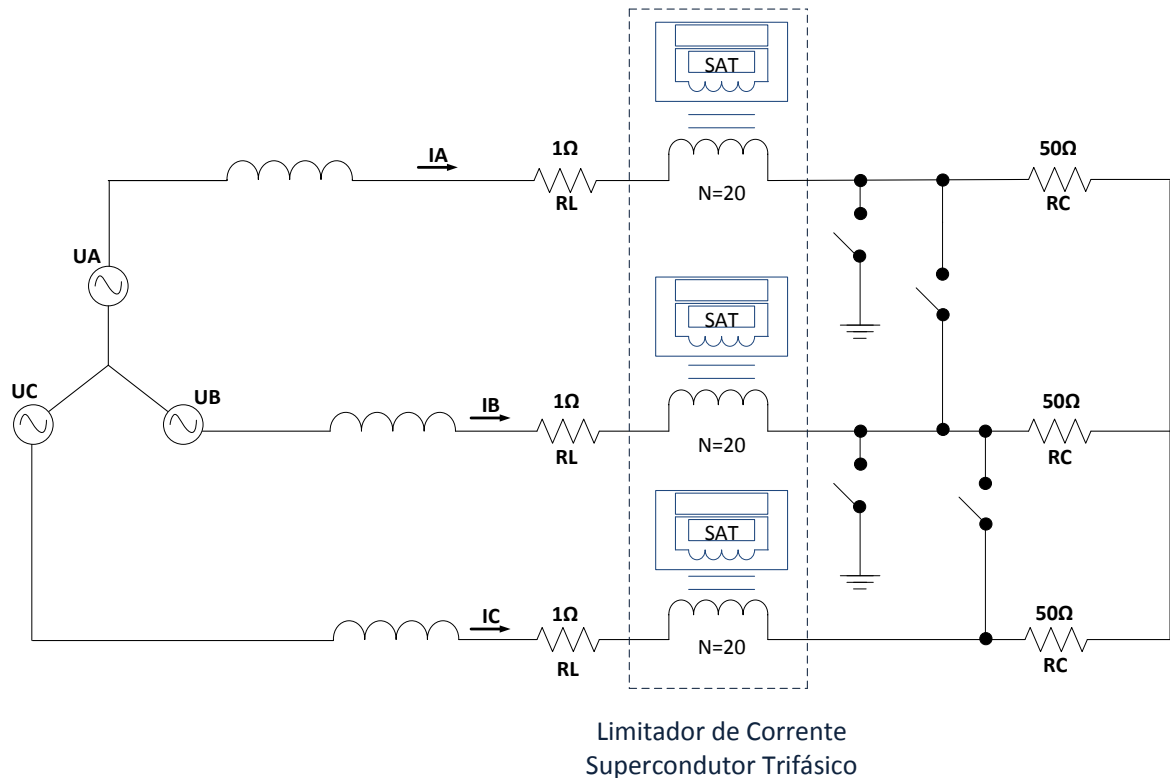
Os quatro CC incitados de modo a analisar o poder de limitação do protótipo criado foram os seguintes:

- Trifásico.
- Fase-Fase.
- Fase-Terra.
- Fase-Fase-Terra ou Bifásico-Terra.

No sistema trifásico de ensaio concebido, encontram-se presentes em cada fase duas resistências, designadas de resistência de linha e de carga, cujo valor da impedância é respectivamente de  $1 \Omega$  e  $50 \Omega$ . A resistência de linha inserida permite a medição indirecta da corrente no circuito, na medida em que a corrente será a imagem dos valores de tensão registados pela placa de aquisição de dados. Quanto às resistências de carga, estão situadas após o bloco do LCST, para que quando se provoque o CC propositadamente, a carga seja anulada e conseqüentemente a corrente na linha aumente repentinamente, de forma a examinar o poder de limitação do modelo criado em situação de falha.

No que concerne às especificações do limitador trifásico do tipo indutivo criado, o modelo caracteriza-se pela ligação magnética entre um enrolamento primário e um enrolamento secundário, compostos respectivamente por 20 espiras de fio de cobre (com secção de  $1,5 \text{ mm}^2$ ) e material supercondutor, neste caso fita Bi-2223. Esta geometria repete-se para cada fase. De referir que para efeitos de leitura de fluxo, construiu-se também no primário um enrolamento de 60 espiras de fio de cobre (com secção de  $0,5 \text{ mm}^2$ ).

Por último, os anéis de fita supercondutora que constituem o secundário do dispositivo, são embutidos no interior de crióstatos, produzidos e adaptados à tipologia do limitador desenvolvido. Os depósitos criados com o intuito de armazenar azoto líquido (77 K de temperatura), garantem que o material supercondutor do secundário não atinja e/ou ultrapasse o seu valor de temperatura crítica. Na Figura 5.1 é possível observar o circuito de teste.



**Figura 5.1 – Esquema eléctrico de ensaio do LCST.**

Nota: Na Figura 5.1 a terra corresponde ao neutro do transformador.

As particularidades comuns de todos os ensaios, os quais o sistema foi submetido, são as seguintes:

- Frequência de 50 Hz em regime alternado sinusoidal.
- 90 V de tensão máxima de alimentação<sup>28</sup> (63 V de tensão eficaz).
- 1  $\Omega$  de impedância nas resistências de linha,  $R_L$ .
- 50  $\Omega$  de impedância nas resistências de carga,  $R_C$ .
- 20 espiras no enrolamento primário do LCST.
- 60 espiras no enrolamento reservado para a leitura de fluxo, montados no primário do LCST.
- Enrolamento secundário do LCST formado por anéis de fita supercondutora Bi-2223.

Pelo facto da corrente crítica do material supercondutor vir definida em 90 A, como visto na Tabela 4.1, teve-se que garantir que ao realizar os ensaios, a corrente em regime de operação normal não excedesse os 4,5 A, de modo a que as espiras SAT não perdessem as

<sup>28</sup> Inicialmente os ensaios foram realizados com tensões de 120 V de tensão máxima, contudo para este valor verificou-se que, em alguns ensaios, o LCST perde a capacidade de limitar as correntes de falha. Por esta razão usa-se 90 V de tensão máxima para todos os ensaios de modo a que todos os resultados sejam analisados nas mesmas condições.

suas propriedades supercondutoras, pois como o primário é constituído por 20 espiras, resulta a seguinte força magnetomotriz:

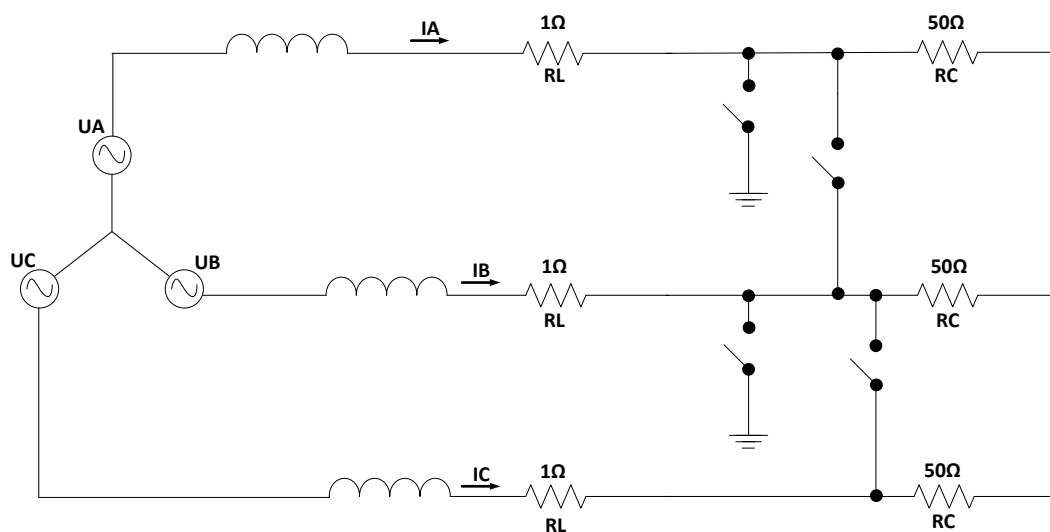
$$\text{FMM} = \text{Corrente} \times n^{\circ} \text{ espiras} = 4,5 \text{ A} \times 20 \text{ espiras} = 90 \text{ A.e} \quad (5.1)$$

Uma nota a ter em conta na análise aos resultados, é que em todos eles aplicou-se uma média deslizante, que permite alisar os resultados das correntes e fluxos de cada fase do LCST, i.e., permite suprimir alguns pontos resultantes das variações bruscas dos sinais, provocados pelos CC. Neste caso, o filtro usado com recurso à média deslizante, consiste em aplicar a média das últimas três amostras temporais ao instante actual, ou seja:

$$i_{(k)} = \frac{i_{(k-2)} + i_{(k-1)} + i_{(k)}}{3} \quad (5.2)$$

De referir que, o passo temporal entre cada amostra da equação anterior, vale 1 milissegundo.

Importa também fazer alusão ao método de obtenção das correntes de CC sem a existência do LCST, denominadas correntes presumidas. Devido ao facto de não se ter acesso aos valores das componentes directa, inversa e homopolar das correntes, necessárias para os cálculos das correntes de CC, optou-se por medir os valores das correntes  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  sem a presença do LCST no circuito implementado. Estes ensaios foram efectuados nas mesmas condições que os efectuados na presença do limitador. Assim, foi possível obter os valores das correntes nas três fases, aquando do surgimento do CC, e sem o auxílio do limitador na diminuição das correntes de falha. Verifique-se a Figura 5.2 para o mencionado.



**Figura 5.2 – Esquema eléctrico de ensaio sem o LCST.**

Nota: Na Figura 5.2 a terra corresponde ao neutro do transformador.

Pelo facto dos CC não serem controlados, i.e., o tempo de activação do interruptor que origina a falha é susceptível de variar de ensaio para ensaio, torna-se impraticável a análise ao primeiro instante temporal das grandezas após o surgimento do CC. Assim, em situações de defeito, ignora-se o pico inicial do sinal para efeitos de avaliação do comportamento do limitador.

Para os ensaios experimentais realizados há que considerar que causas como variações térmicas, de pressão e de humidade; existência de campos eléctricos/magnéticos; envelhecimento do material; assim como imprecisões de leitura dos instrumentos utilizados podem influenciar os mesmos resultados.

De seguida, no ponto 5.1, e de acordo com o circuito discriminado na Figura 5.2, expõem-se os resultados obtidos para as correntes de falha quando os diferentes tipos de CC são provocados sem a utilização do LCST. Estas correntes, designadas correntes presumidas, serão adiante comparadas com as correntes de defeito obtidas com a presença do LCST, de modo a averiguar o poder de limitação do dispositivo.

Posteriormente, procede-se à exposição dos resultados obtidos experimentalmente pelo dispositivo concebido e respectiva avaliação do desempenho e competência de limitação do mesmo face às correntes resultantes dos diferentes tipos de CC impulsionados. De salientar que para cada tipo de CC, varia-se também o número de espiras da fita supercondutora do secundário do limitador, nomeadamente com uma, duas e três fitas.

## **5.1 Correntes Presumidas de Curto-Circuito**

Nesta secção procede-se à análise dos resultados experimentais adquiridos, respeitantes aos quatro diferentes tipos de CC, sem a utilização do LCST no circuito implementado.

Tal como ilustrado na Figura 5.2, o sistema trifásico de ensaio é submetido aos vários tipos de CC, sem a existência do LCST, de modo a se obter os valores das correntes de defeito originadas. Estas correntes são designadas por correntes presumidas, e que adiante serão utilizadas para efeitos de comparação com as correntes limitadas pela acção do LCST. Os ensaios foram realizados durante períodos de tempo bastante reduzidos, onde não resultaram danos nos equipamentos presentes no circuito eléctrico.

### **5.1.1 Curto-Circuito Trifásico**

Ao se fechar os interruptores localizados entre as fases A-B e B-C, na Figura 5.2, activa-se o CC trifásico, i.e., o CC que anula as impedâncias de carga das três fases. Nesta situação verifica-se um aumento abrupto de corrente de falha para aproximadamente 83 A em cada fase. Tal como já referido, esta corrente é considerada a corrente presumida, neste caso para o CC trifásico.

Estes resultados demonstram que o CC é simétrico, uma vez que a impedância do defeito é idêntica nas três fases do circuito. Pela Figura 5.3, é possível observar a característica temporal do CC trifásico ensaiado sem o LCST.

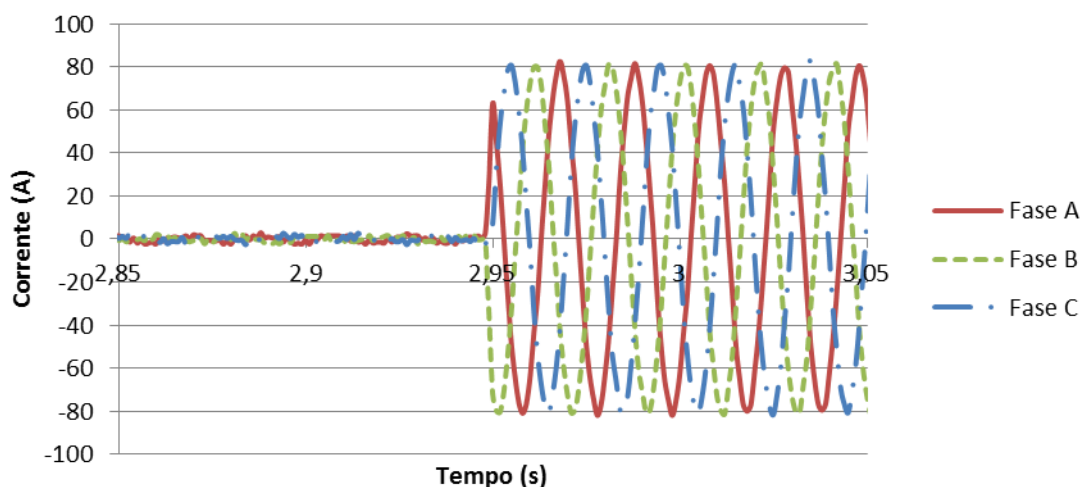


Figura 5.3 – CC trifásico: corrente em função do tempo sem LCST.

### 5.1.2 Curto-Circuito Fase-Fase

No que toca às correntes de falha do CC fase-fase, neste caso accionado ao fechar o interruptor localizado entre as fases B e C do circuito de ensaio da Figura 5.2, obtêm-se os resultados ilustrados na Figura 5.4.

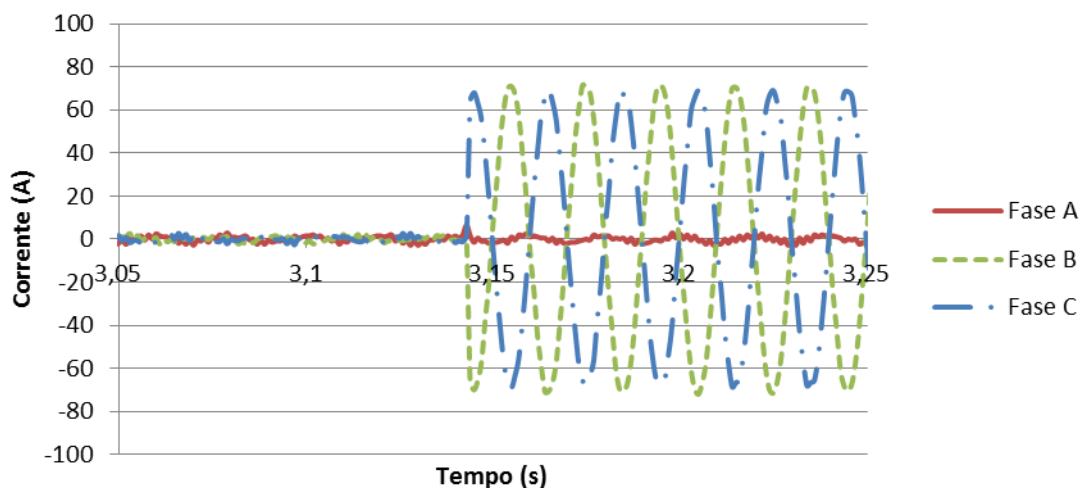


Figura 5.4 – CC fase-fase: corrente em função do tempo sem LCST.

Verifica-se que nesta situação, a corrente temporal da fase não curto-circuitada (fase A) mantém a mesma amplitude ao longo do ensaio. No entanto, as correntes de falha das fases B e C, consideradas as correntes presumidas que se menciona nos ensaios fase-fase posteriores, disparam para valores a rondar os 71 A de valor máximo.

### 5.1.3 Curto-Circuito Fase-Terra

De modo a se efectuar um CC fase-terra, neste caso fase B-terra, fecha-se o interruptor presente na fase B com ligação à terra (Figura 5.2). Decorrente desta acção, resulta o que se verifica na Figura 5.5.

No período de ensaio, na fase em que se efectua o CC, a corrente considerada presumida apresenta 84 A de amplitude máxima. Nas outras duas fases (fase A e C) não se verificam variações da amplitude da corrente.

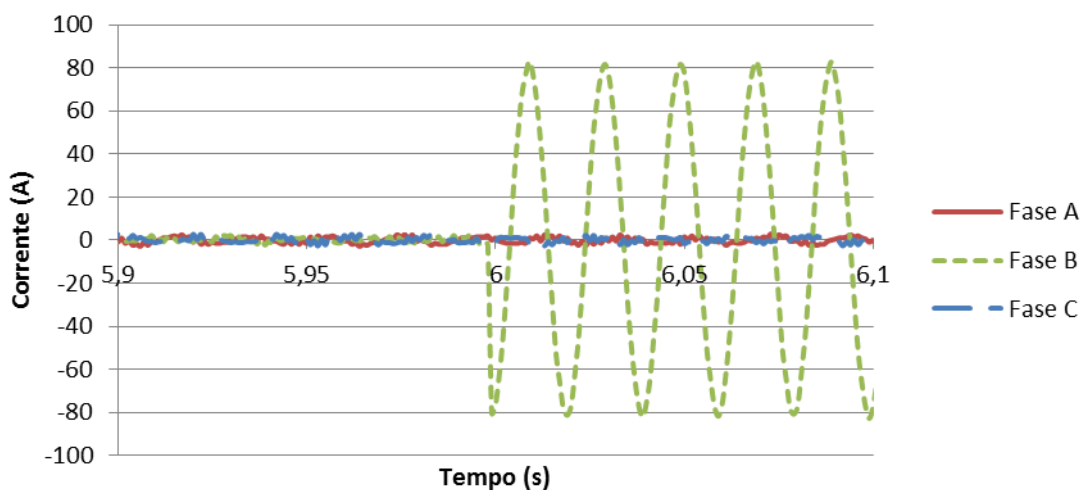
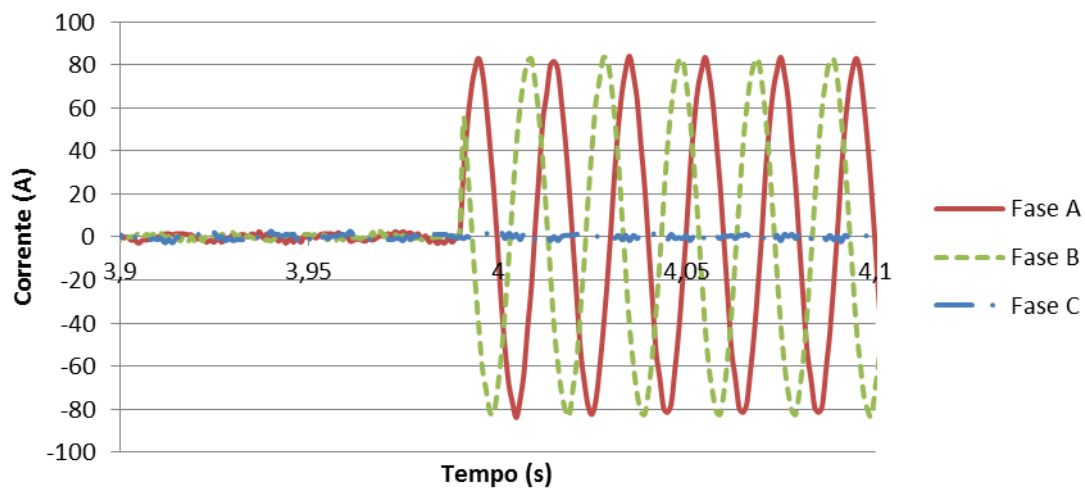


Figura 5.5 – CC fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST.

### 5.1.4 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

Por último, realizou-se o CC bifásico-terra, realizado neste caso entre a fase A-fase B-terra, ou seja, quando se fecha simultaneamente os interruptores com ligação à terra existentes nas fases A e B, tal como ilustrado na Figura 5.2.

Tal como nos três ensaios realizados anteriormente, a corrente da fase não afectada pelo CC não sofre alterações ao longo do período de ensaio. Relativamente às fases curto-circuitadas, observa-se que as respectivas correntes passam para valores a rondar os 84 A de valor máximo após a execução do defeito. Na Figura 5.6, demonstra-se o referido.



**Figura 5.6 – CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST.**

Após a realização dos ensaios de CC, sem a presença do LCST no circuito trifásico, conclui-se que das correntes presumidas adquiridas, as mais elevadas são as provenientes do CC fase-terra e bifásico-terra, onde se atingiram 84 A de amplitude nas fases defeituosas. Ligeiramente abaixo, registaram-se correntes máximas de linha de 83 A na situação de falha trifásica. A corrente presumida com valor máximo inferior que se alcançou foi a do CC fase-fase, nomeadamente 71,1 A em ambas as fases afectadas.

## 5.2 Desempenho do Limitador de Corrente em Situações de Curto-Circuito

Analise-se agora os resultados obtidos quando se executa os CC com a existência do LCST no circuito de ensaio implementado, tal como anteriormente ilustrado na Figura 5.1.

### 5.2.1 Curto-Circuito Trifásico

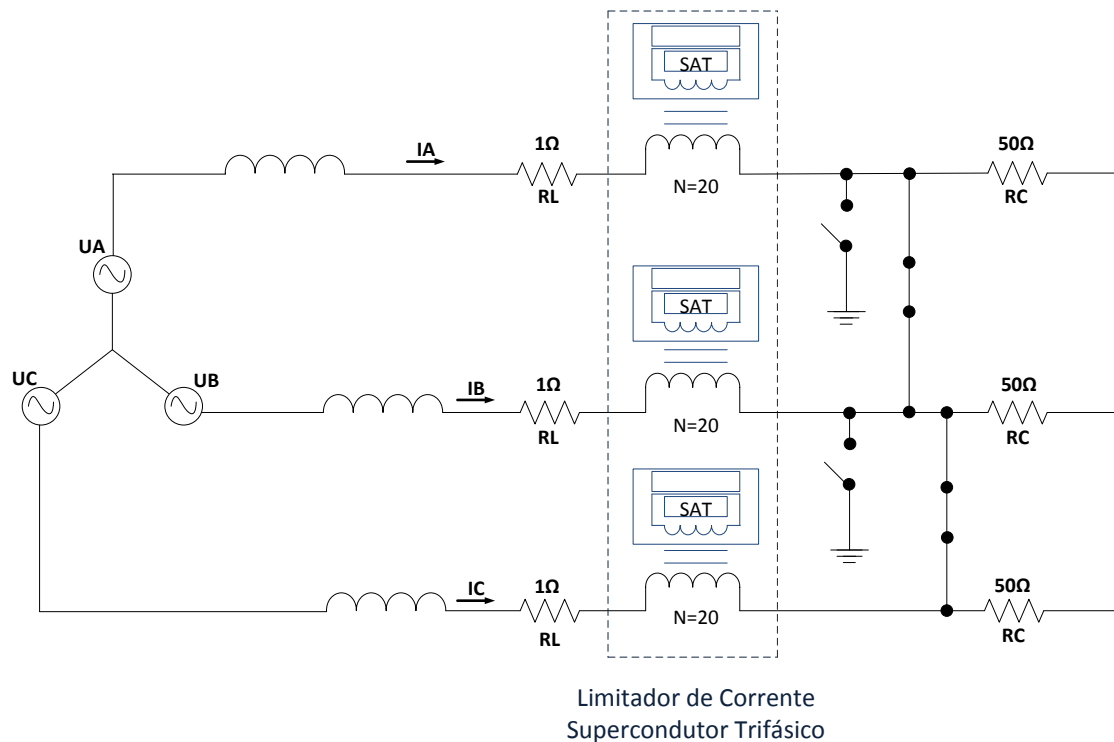


Figura 5.7 – Esquema elétrico de ensaio do LCST com uma falha trifásica.

Nota: Na Figura 5.7 a terra corresponde ao neutro do transformador.

Na Figura 5.7 verifica-se que os interruptores que estão ligados entre as fases A e B, e B e C são fechados. Com esta acção consegue-se anular simultaneamente a  $R_C$  de cada fase do circuito, ou seja, obtém-se um CC que afecta as três fases existentes. Na Figura 5.8 mostram-se as correntes obtidas no item 5.1.1, sem o dispositivo limitador para este tipo de falha.

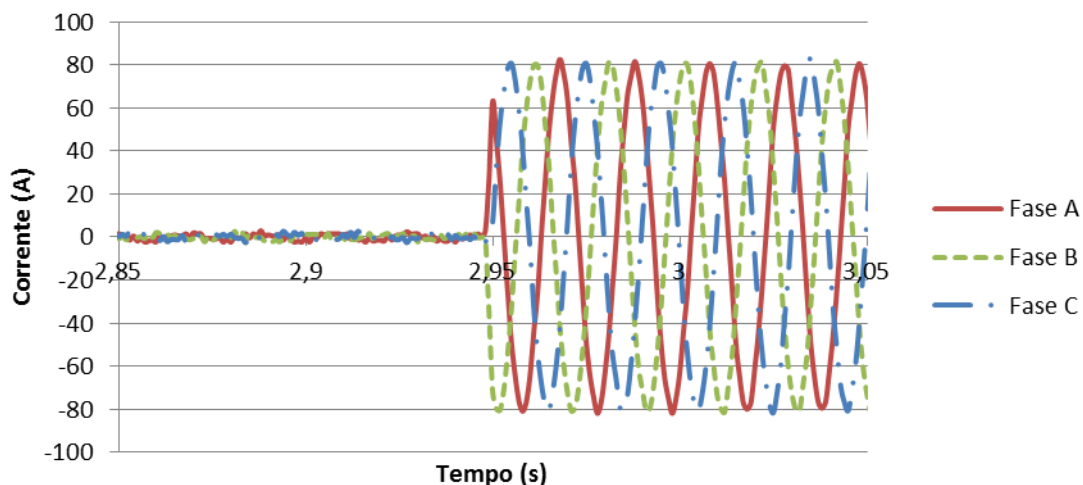


Figura 5.8 - CC trifásico: corrente em função do tempo sem LCST (idêntico à Figura 5.3).

### 5.2.1.1 Curto-Circuito Trifásico: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário

Na Figura 5.9, expõe-se o comportamento temporal das correntes de linha das fases A, B e C com a presença do LCST aquando do surgimento de um CC trifásico.

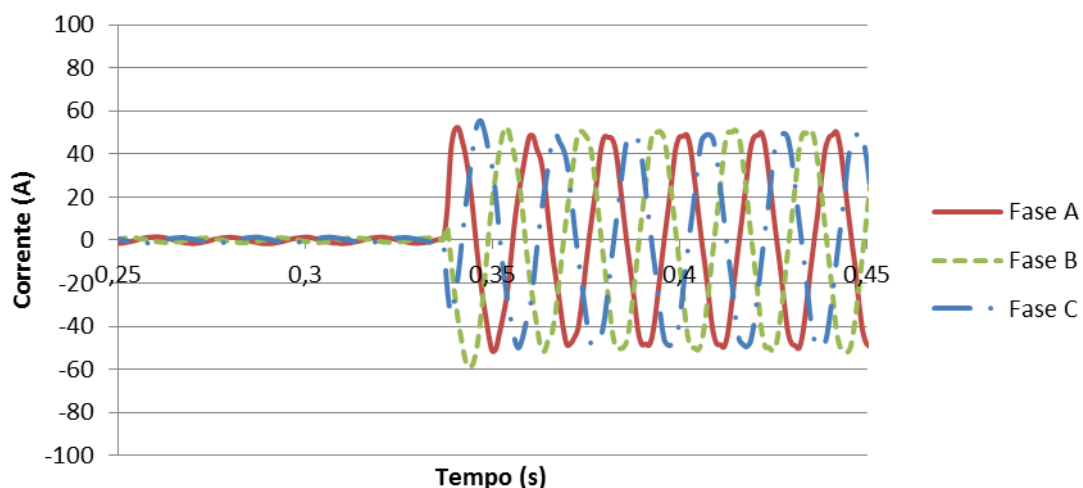
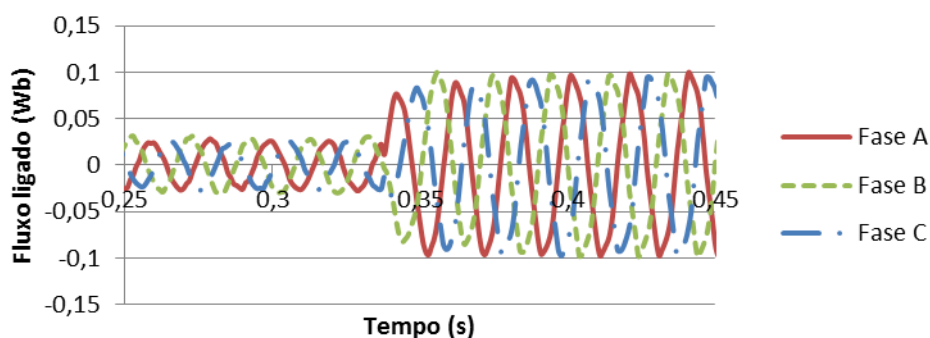


Figura 5.9 - CC trifásico: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.

Verifica-se que o comportamento temporal da grandeza é idêntico nas diferentes fases, tanto antes como após o momento do CC, o que comprova que este CC é simétrico, ou seja, a impedância do defeito é igual em todas as fases.

Em todas as fases, e antes dos 0,35 segundos, a corrente máxima é de aproximadamente 1,5 A. Após o instante em que o CC é provocado, e no primeiro pico do sinal, regista-se 51 A de corrente de falha. Depois deste pico, os valores estabilizam para valores próximos de 48 A de amplitude, ou seja, o LCST limita em 41% a corrente presumida, que como visto no ponto 5.1.1, vale 83 A.

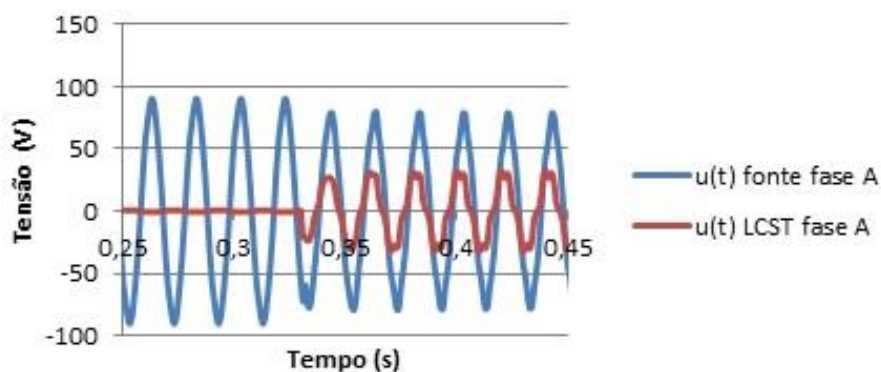
Relativamente ao fluxo magnético, observa-se pela Figura 5.10, que quer em regime de funcionamento normal, quer de falha, este também apresenta um comportamento semelhante nas três fases.



**Figura 5.10 - CC trifásico: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.**

Assim, antes da ocorrência da falha, o fluxo ligado com o primário apresenta cerca de 29 mWb de amplitude máxima. Atingido o instante da falha, o fluxo cresce para valores vizinhos dos 101 mWb.

Quanto às características da tensão, e durante o intervalo temporal pré-falha, o LCST apresenta um comportamento praticamente invisível à rede, na medida em que ocorre uma queda de tensão<sup>29</sup>  $u$  aos terminais do limitador na ordem dos 0,57 V, causada pela existência de fluxo no mesmo intervalo temporal. Este valor corresponde a 0,67% da tensão da fonte, 91 V. Por outro lado, a partir do aparecimento da falha, regista-se uma queda de tensão de 35 V aos terminais do LCST e 80 V da fonte de alimentação, ou seja, 44% da tensão de alimentação. De seguida, na Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13, representa-se o indicado quanto ao comportamento da tensão.



**Figura 5.11 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário.**

<sup>29</sup> A impedância de outros elementos presentes no sistema, tais como os mecanismos de contacto eléctrico ou condutores de cobre, também podem afectar os valores da queda de tensão aos terminais do LCST.

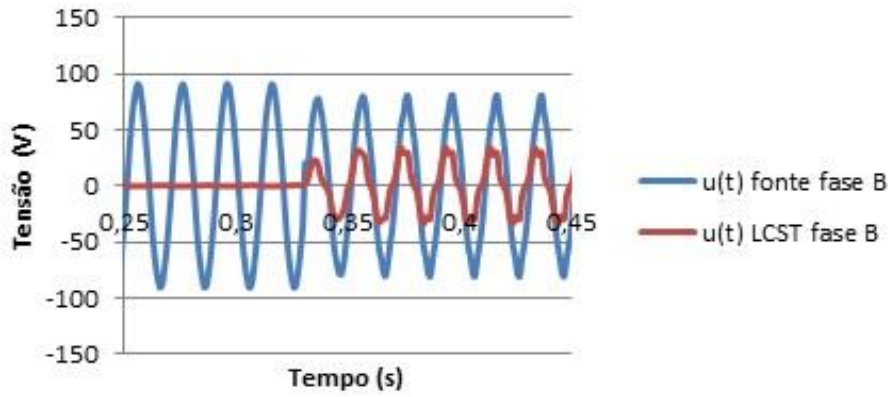


Figura 5.12 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário.

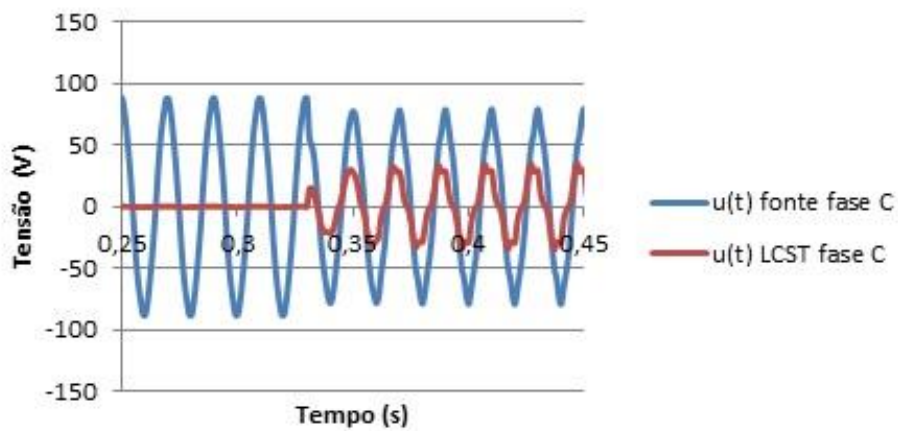


Figura 5.13 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário.

Por fim, pela Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16, analisa-se os ciclos de histerese das três bobinas obtidos neste ensaio.

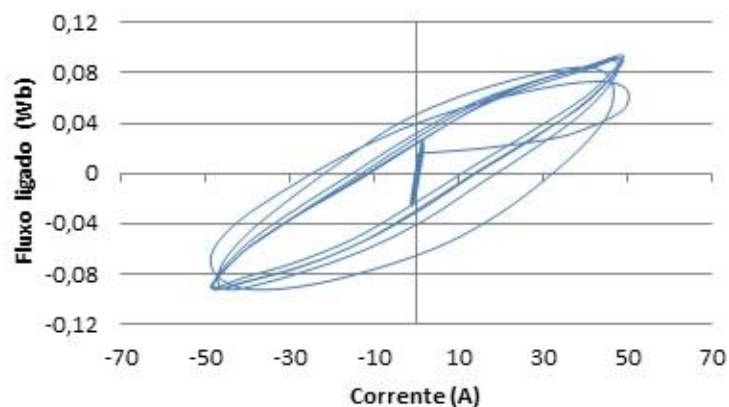


Figura 5.14 - CC trifásico: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário.

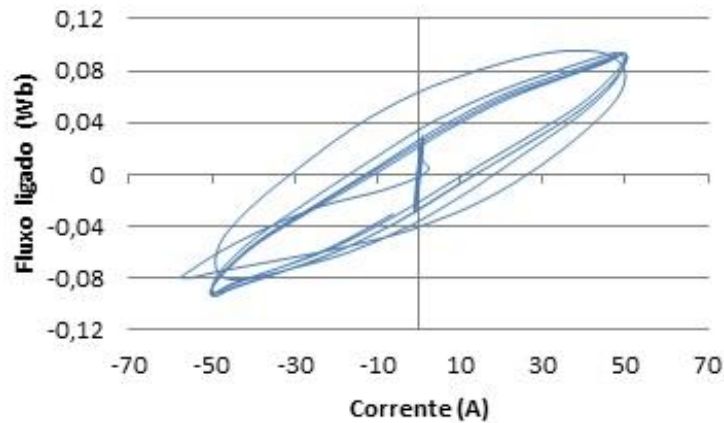


Figura 5.15 - CC trifásico: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário.

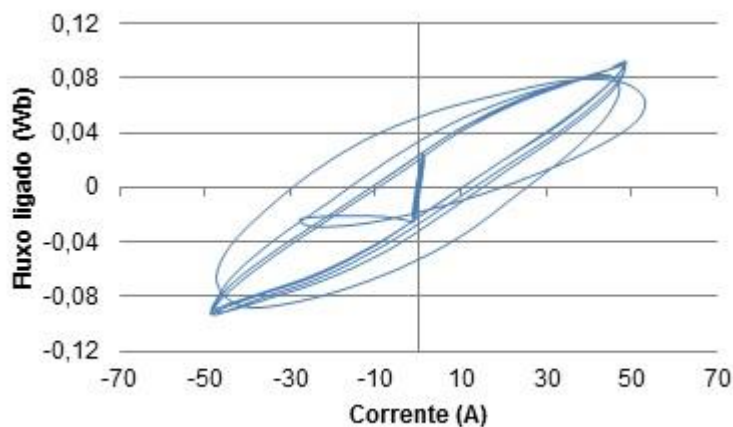
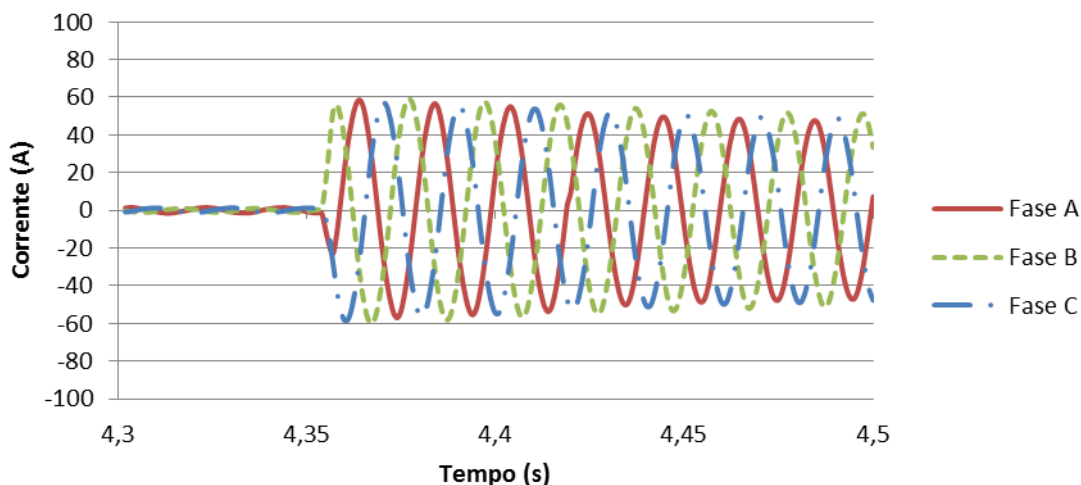


Figura 5.16 - CC trifásico: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário.

Em funcionamento normal, verifica-se que o limitador permite alguma circulação de fluxo, na medida em que antes da falha, e tal como visto previamente, o fluxo ligado com o primário apresenta valores de cerca de 29 mWb. Por outro lado, depois de causada a falha e consequente aumento abrupto da corrente de CC ( $\cong 51$  A), as variações de fluxo resultantes da transição do secundário, do estado supercondutor para o estado normal, disparam para 100 mWb de amplitude.

#### 5.2.1.2 Curto-Circuito Trifásico: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

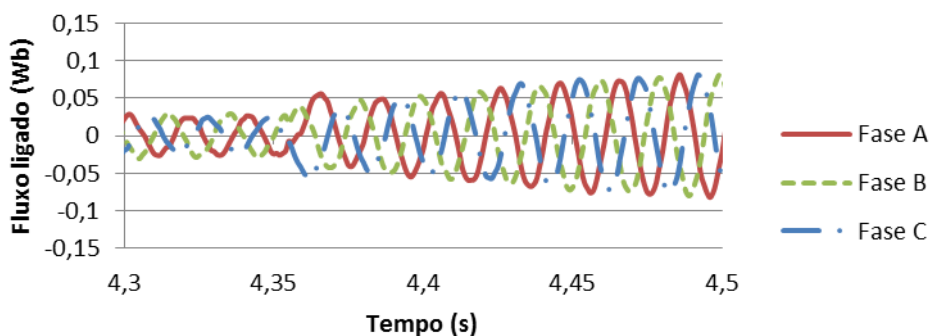
Para o mesmo CC, e quando provocado com dois anéis de fita SAT no enrolamento secundário do LCST, verifica-se valores máximos de corrente de falha superiores do que com um anel de fita supercondutora, tal como indicado na seguinte figura.



**Figura 5.17 - CC trifásico: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

Pela análise da Figura 5.17, nota-se que a característica temporal da corrente apresenta um comportamento idêntico em todas as fases, tal como no item 5.2.1.1. Em operação pré-falha obtém-se 1,2 A de amplitude. Quando sucede o CC, verifica-se um crescimento da corrente de linha para 58 A de amplitude. Depois do primeiro pico detectado após o começo do defeito, a corrente estabiliza para valores próximos dos 50 A, o que revela que a corrente presumida indicada no ponto 5.1.1 é limitada em 39%.

Analisa-se agora o fluxo magnético, com duas fitas SAT, da fase A, B e C, respectivamente Figura 5.18.



**Figura 5.18 - CC trifásico: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

Em regime de operação normal, verifica-se que o fluxo ligado com o primário atinge valores de cerca de 29 mWb e em regime de falha apresenta 92 mWb. Em comparação com os resultados obtidos no ponto 5.2.1.1, constata-se que com duas espiras SAT no secundário, a blindagem magnética do núcleo antes do CC mantém-se dentro dos mesmos parâmetros. Quando o CC é activado, nota-se que, o secundário quando composto por dois anéis SAT constitui um maior obstáculo à circulação de fluxo magnético no ferro, pois os valores de fluxo são menores do que os obtidos no ponto.

No que concerne à queda de tensão, registou-se, antes de provocado o defeito, 0,6 V de valor máximo aos terminais do LCST e 91 V na fonte de alimentação. Quando o defeito desponta, passa-se a registar 30 V de amplitude nos terminais do limitador e 79 V na fonte. Assim, antes da falha resulta que a queda de tensão aos terminais do LCST corresponde a 0,66% do valor da fonte, ou seja, igual ao obtido no item 5.2.1.1. Em situação pós-falha, resulta 38,4% de queda de tensão aos terminais do limitador relativamente à tensão fornecida pela fonte, sendo esta queda de tensão inferior à obtida no ensaio anterior.

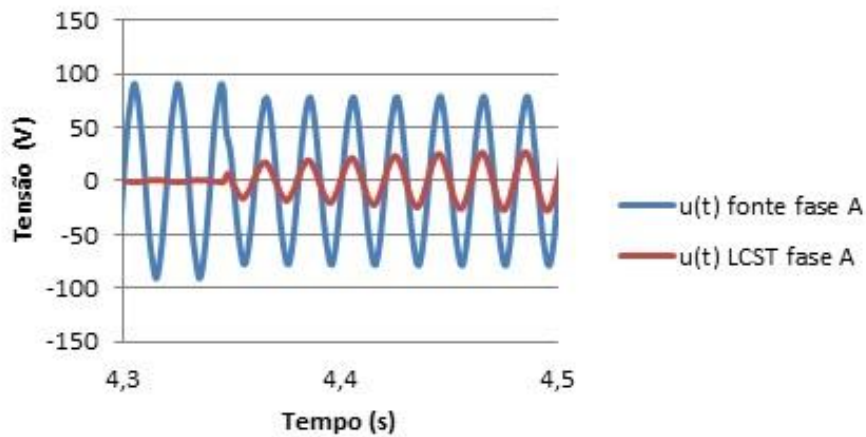


Figura 5.19 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.

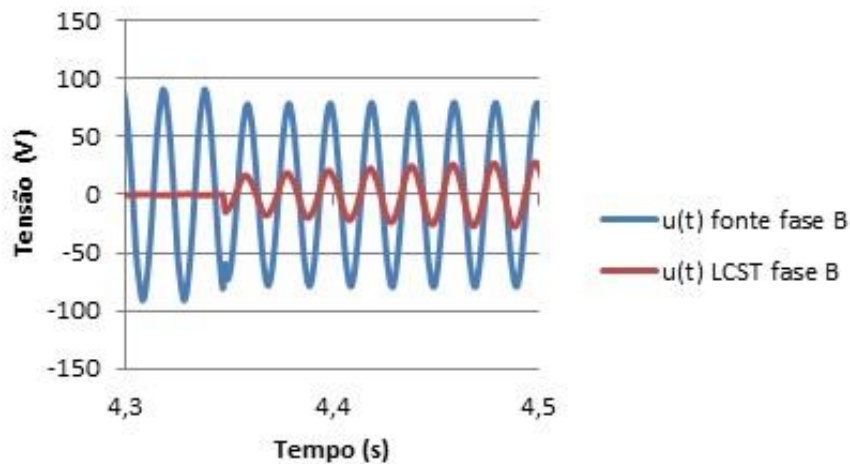
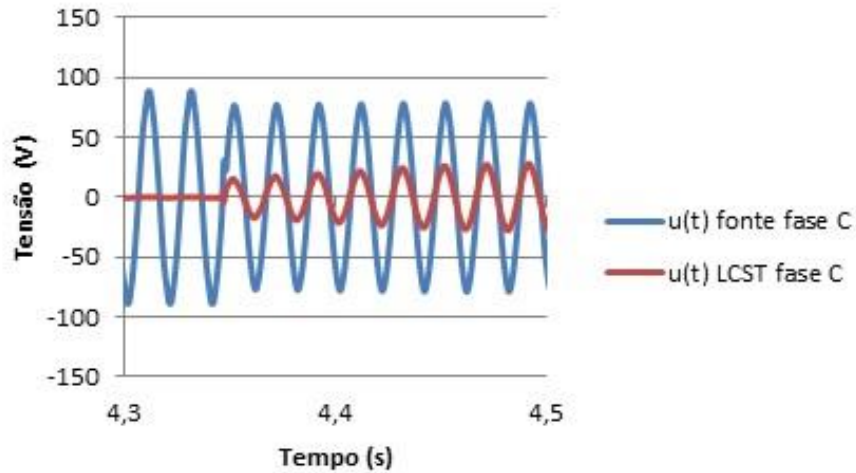
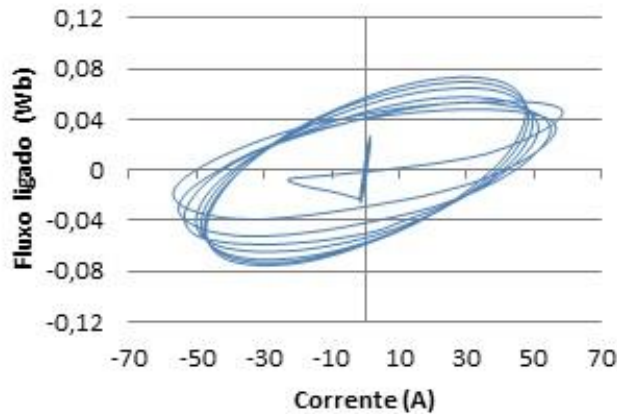


Figura 5.20 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.



**Figura 5.21 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.**

Por último, pela Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24, observa-se os ciclos de histerese resultantes do ensaio praticado. Nas três fases, é possível constatar que antes do defeito ser impulsionado, ocorre circulação de fluxo ligado com o primário na ordem dos 29 mWb. Quando sucede o incremento repentino da corrente de falha para 58 A, o fluxo magnético que circula no ferro ronda os 92 mWb.



**Figura 5.22 - CC trifásico: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.**

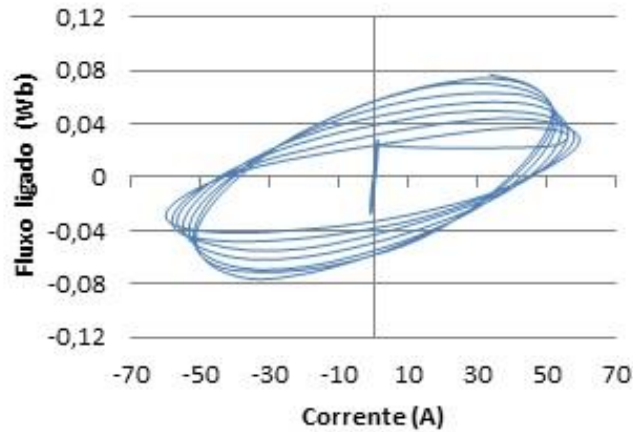


Figura 5.23 - CC trifásico: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.

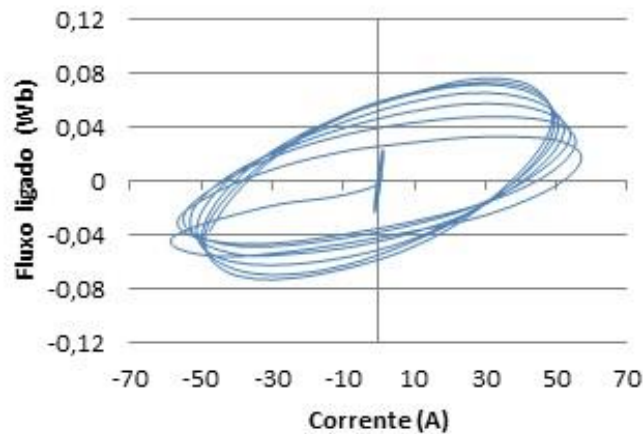
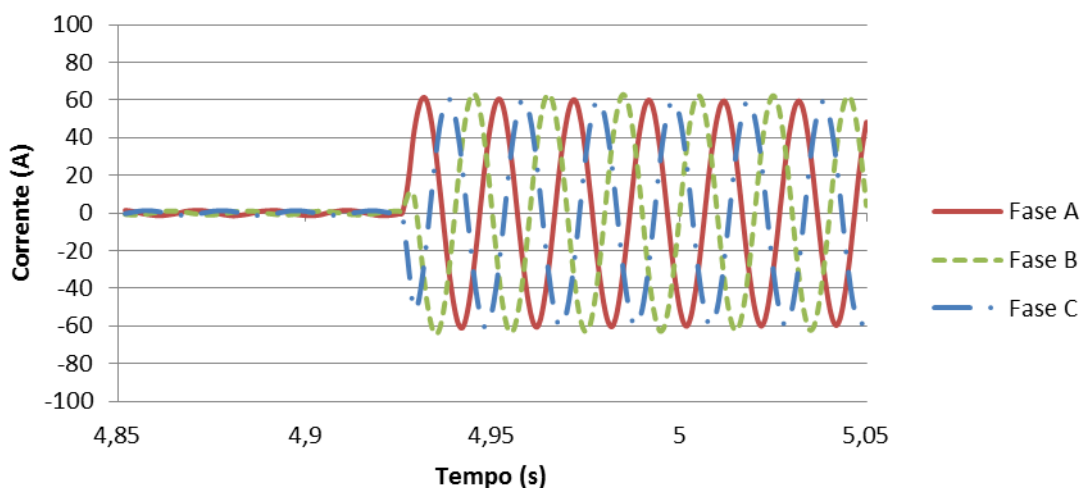


Figura 5.24 - CC trifásico: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.

### 5.2.1.3 Curto-Circuito Trifásico: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

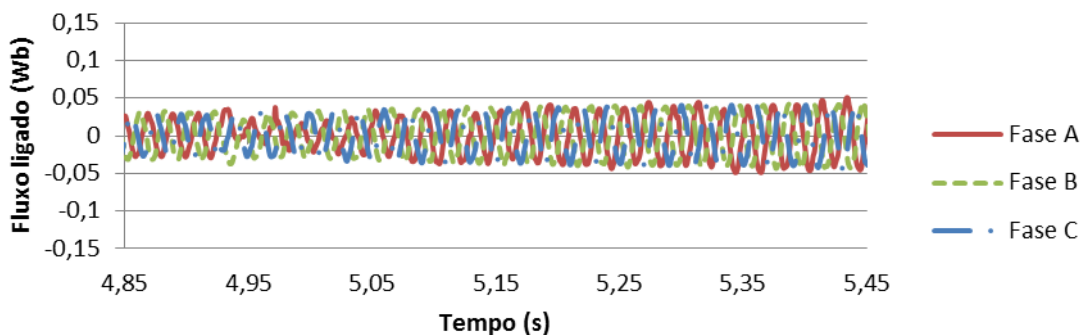
Procede-se por último à análise das mesmas grandezas para o ensaio do CC trifásico, sendo o secundário formado por três espiras SAT.

Pela análise da Figura 5.25, verifica-se que durante o regime de operação normal, a corrente de linha das três fases apresenta 1,3 A de amplitude. Na presença de uma corrente de CC, observa-se que a corrente máxima na linha tende para 62 A de valor máximo. Após o primeiro pico, ocorre uma ligeira estabilização da corrente limitada para os 60 A. Esta quando comparado com a corrente presumida do item 5.1.1 (83 A), indica que a corrente de CC é limitada em cerca de 28 %. Com este resultado deduz-se que a presença de mais uma espira SAT no secundário do LCST minimiza a quantidade de corrente presumida que é limitada, na medida em que a limitação alcançada é inferior à analisada nos pontos 5.2.1.1 e 5.2.1.2.



**Figura 5.25 - CC trifásico: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.**

Relativamente à característica do fluxo magnético em função do tempo, verifica-se pela Figura 5.26, que quando o CC trifásico é causado, há uma maior oposição à circulação de fluxo no núcleo ferromagnético devido à adição de uma terceira espira SAT em cada fase do secundário do limitador. Antes do CC, a blindagem magnética do núcleo encontra-se dentro da mesma gama de valores que nos itens 5.2.1.1 e 5.2.1.2, neste caso na ordem dos 33 mWb. Em regime de funcionamento de falha, o fluxo ligado máximo é de 49 mWb, o que demonstra que a presença de mais uma espira supercondutora no LCST proporciona um acréscimo significativo na oposição à circulação de fluxo no ferro, relativamente aos resultados adquiridos no ponto 5.2.1.1 e 5.2.1.2.



**Figura 5.26 - CC trifásico: fluxo magnético em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.**

Com a adição de uma terceira fita SAT ao secundário do LCST, observa-se pela Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29, que a queda de tensão aos terminais do limitador, aquando de um CC, é inferior quando comparada com a tensão obtida no secundário formado por um e dois anéis supercondutores. Em regime de operação normal, o resultado é idêntico ao do ponto 5.2.1.1 e 5.2.1.2. No período do sinal antes do defeito, a tensão  $u$  medida aos terminais do limitador apresenta 0,64 V de amplitude, face aos 90 V da fonte. Quando ocorre a falha, passa-se a registar cerca de 19 V de tensão na presença do LCST e 77 V na fonte de alimentação.

Assim, antes do CC, a tensão observada aos terminais do limitador vale 0,7% da tensão proveniente da fonte, e quando surge a falha vale 24,5%.

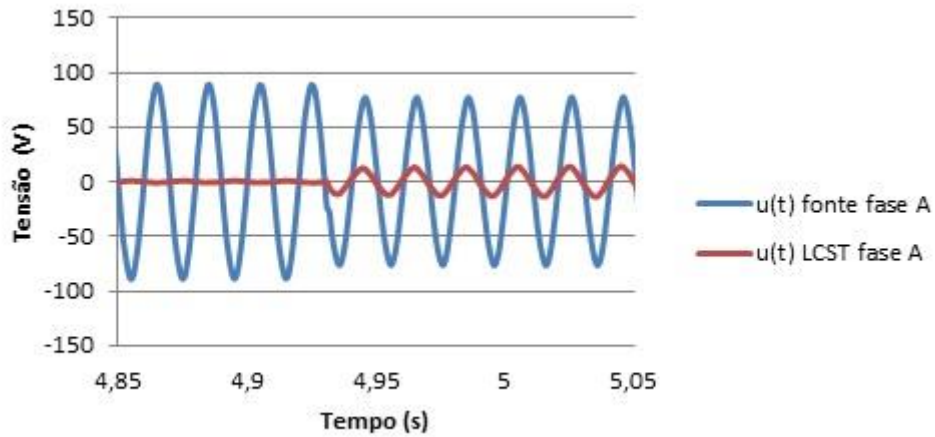


Figura 5.27 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.

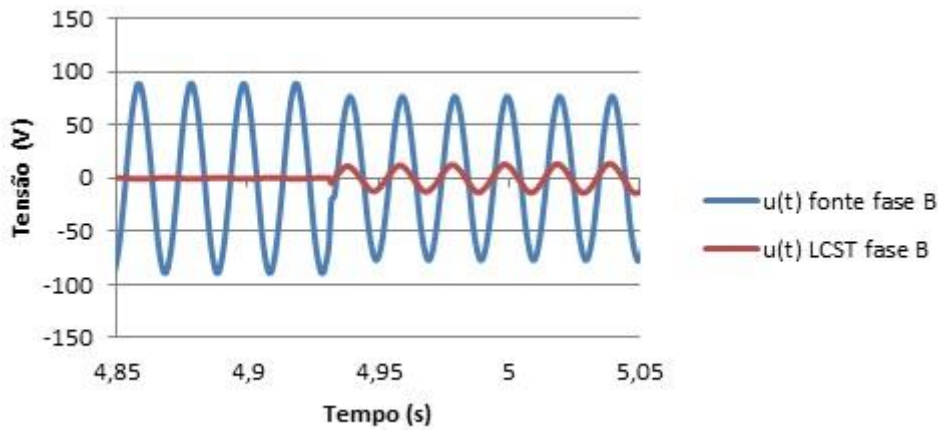


Figura 5.28 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.

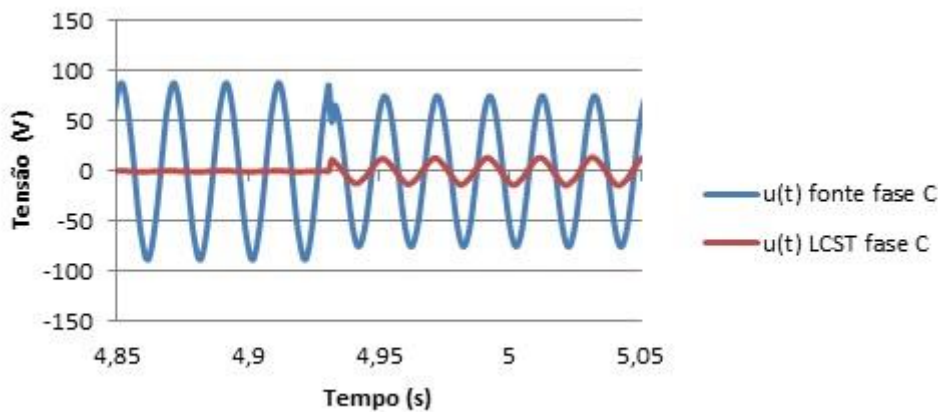


Figura 5.29 - CC trifásico: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.

Tal como visto previamente, para as características das correntes e dos fluxos de cada fase deste ensaio, o limitador exibe inicialmente uma blindagem magnética do núcleo a rondar os 33 mWb. A partir do instante em que se aplica o CC ao sistema, o fluxo ligado tem o valor máximo de aproximadamente 49 mWb, surgindo uma corrente máxima na linha de 82 A. Na Figura 5.30, Figura 5.31 e Figura 5.32, expõe-se o referido acerca das histereses das bobinas do dispositivo.

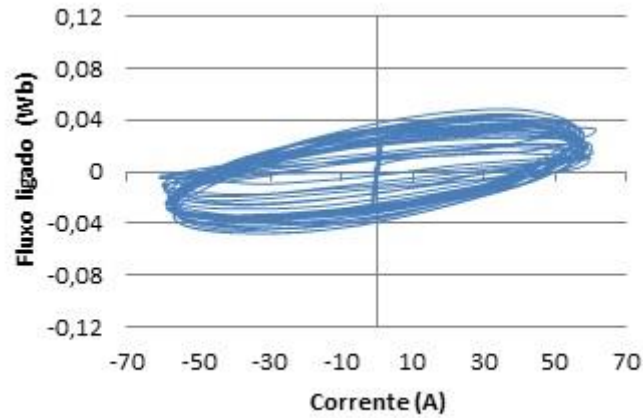


Figura 5.30 - CC trifásico: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.

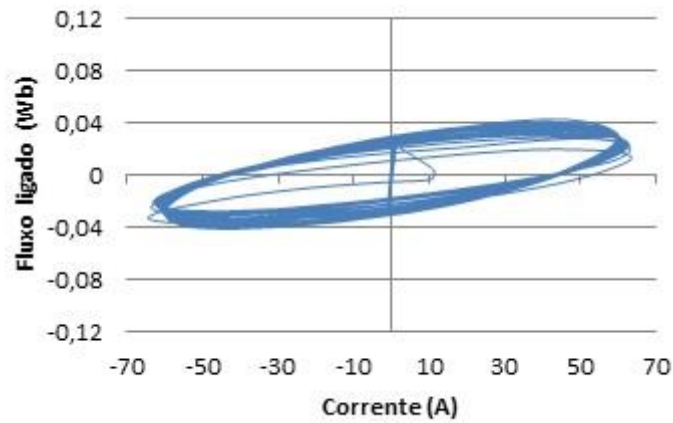


Figura 5.31 - CC trifásico: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.

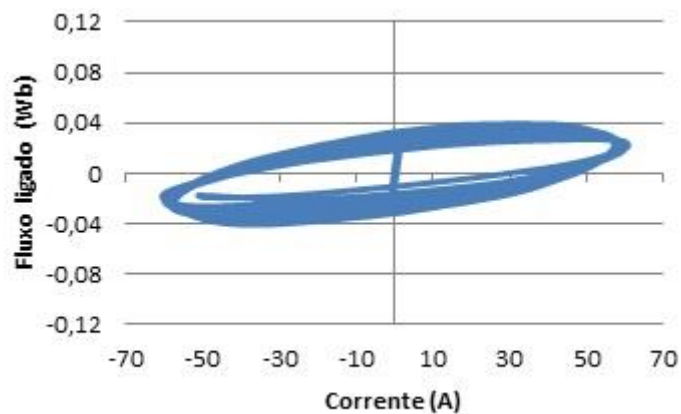


Figura 5.32 - CC trifásico: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.

### 5.2.2 Curto-Circuito Fase-Fase

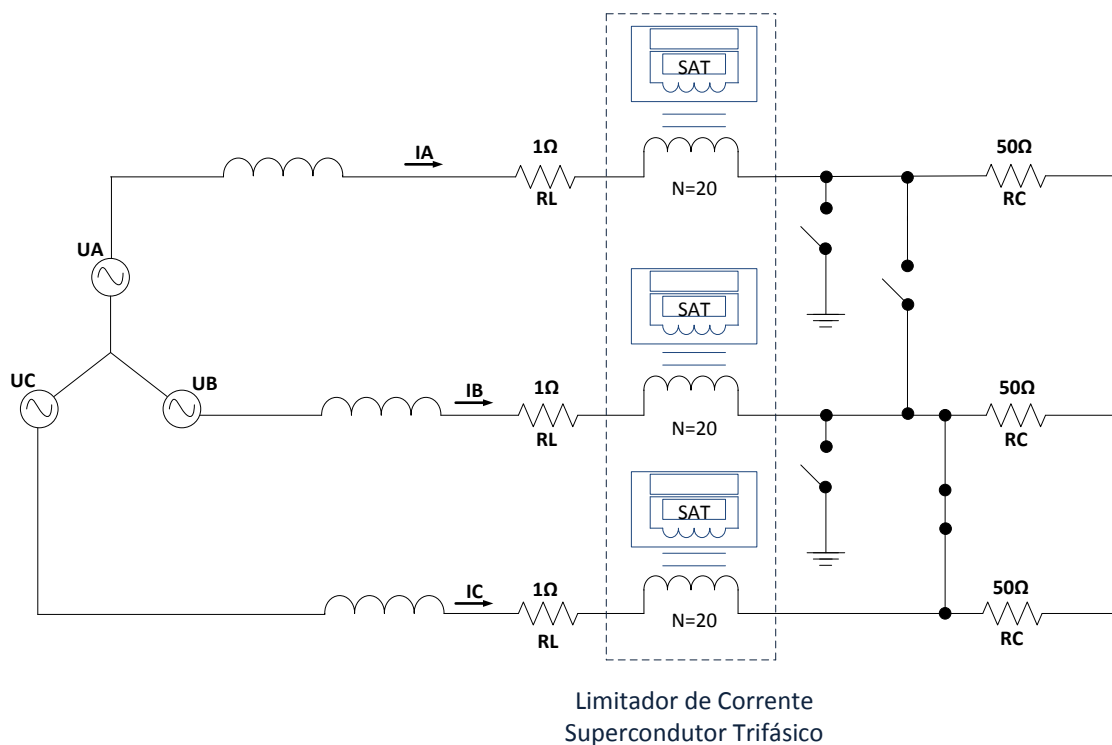


Figura 5.33 - Esquema elétrico de ensaio do LCST com uma falha fase-fase (idêntico à Figura 5.4).

Nota: Na Figura 5.33 a terra corresponde ao neutro do transformador.

Considere-se agora o defeito entre duas fases. Para realizar este CC, acciona-se o interruptor localizado entre as fases B e C do circuito de ensaio, tal como se demonstra pela Figura 5.33. Considere-se as correntes presumidas para este tipo de defeito, ensaiadas no item 5.1.2, tal como indicado na Figura 5.34.

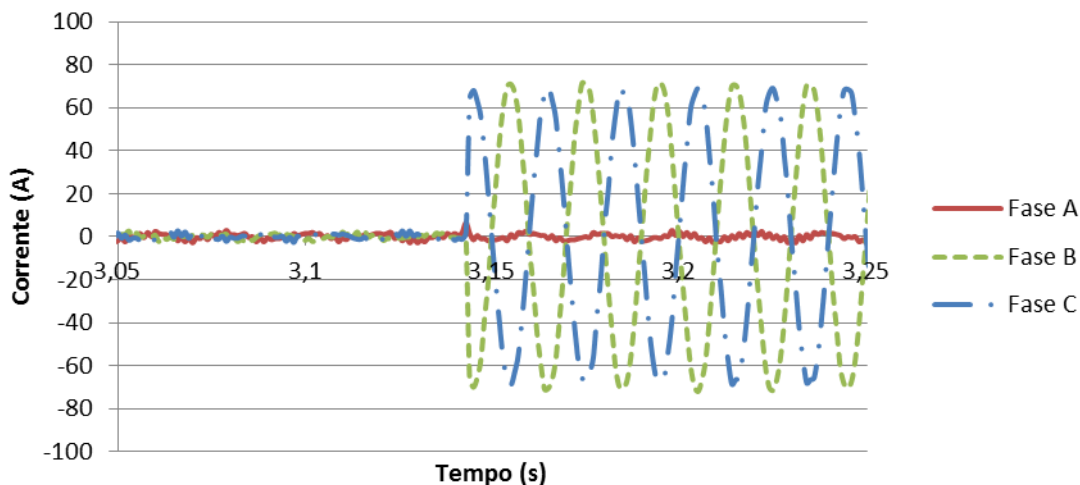


Figura 5.34 - CC fase-fase: corrente em função do tempo sem LCST.

#### 5.2.2.1 Curto-Circuito Fase-Fase: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário

Durante o período de funcionamento normal, a corrente presente nas três fases do limitador são uniformes entre si, com um valor máximo de 1,3 A. A partir do instante em que se impulsiona a falha fase-fase, verifica-se um aumento da corrente, em igual porção, nas fases afectadas, passando-se a registar cerca de 41 A de corrente máxima no primeiro pico e 38 A após este. Na fase não curto-circuitada, a característica não se altera. Na Figura 5.35 traduz-se o mencionado. De notar a evolução não sinusoidal em alguns picos do sinal da corrente na fase B e C, presumindo-se o princípio do fenómeno da saturação magnética.

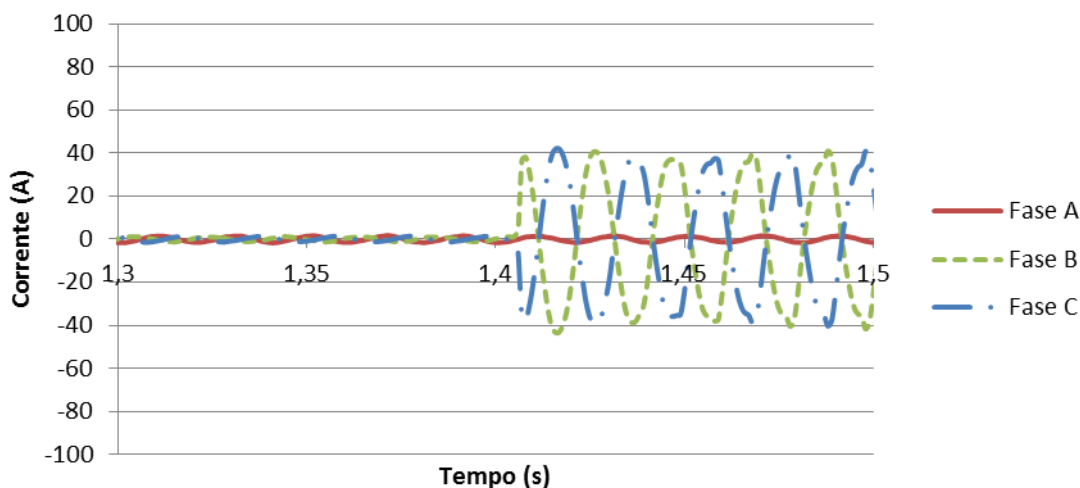
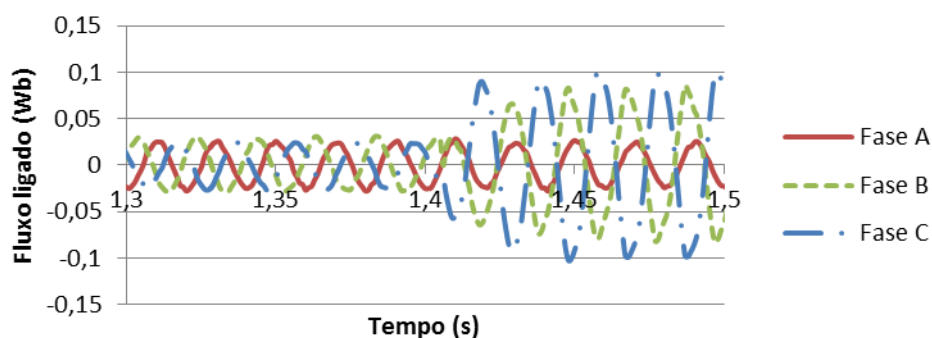


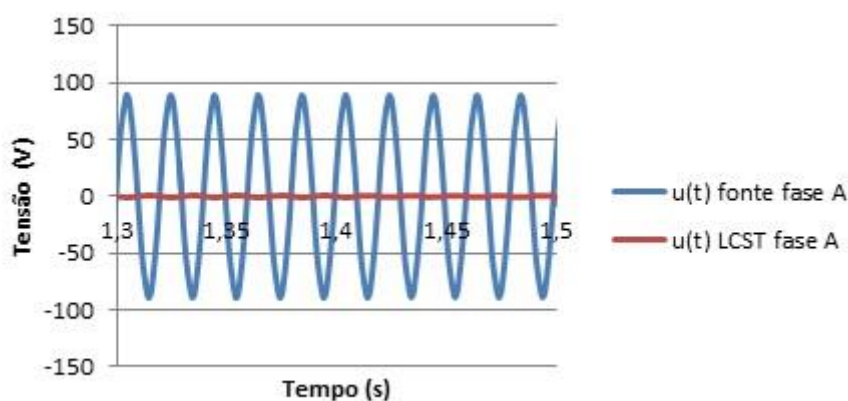
Figura 5.35 - CC fase-fase: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.

Antes do CC, o fluxo máximo ligado é próximo dos 30 mWb nas três fases. Quando se causa o defeito, a fase A mantém o mesmo valor de fluxo, enquanto na fase B e C os valores incrementam respectivamente, para 80 mWb e 97 mWb de amplitude, devido à transição das espiras do secundário do estado supercondutor para o estado normal. Durante a falha, o fluxo da fase central,  $\psi_B$ , é inferior ao da fase C, o que indica que a quantidade de volume de ferro envolvido na circulação do fluxo ligado da fase B é diferente do da fase C, ou seja, há desequilíbrios na circulação do fluxo magnético de cada fase.



**Figura 5.36 - CC fase-fase: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.**

Ao longo do período normal de operação, o LCST exhibe cerca de 0,6% da queda de tensão da fonte (90 V) aos seus terminais, o que equivale a dizer que é transparente ao circuito. Após a execução do CC, a queda de tensão aos terminais da fase A permanece igual. Na fase B e C, mede-se aos terminais do limitador 36 V de tensão máxima, face aos 78 V na fase B e 83 V na fase C da fonte, correspondendo portanto a uma queda de tensão aos terminais do LCST na ordem dos 46% e 44%, respectivamente.



**Figura 5.37 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário.**

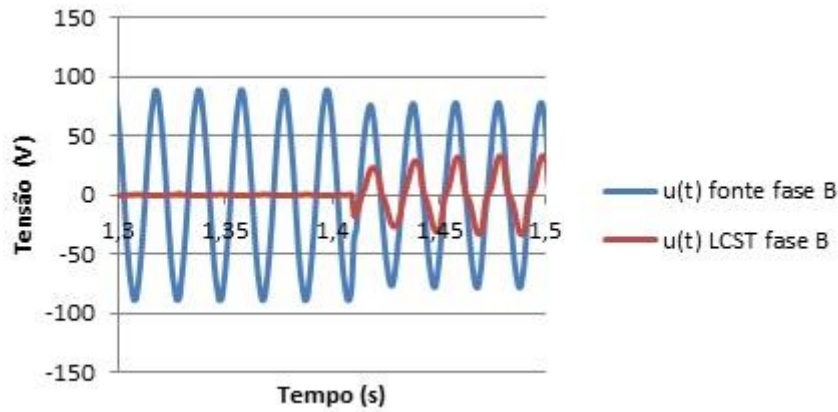


Figura 5.38 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário.

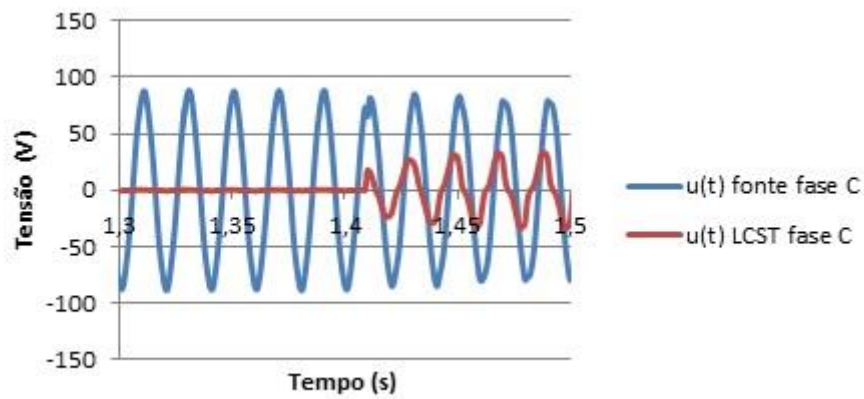


Figura 5.39 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário.

Na Figura 5.40, Figura 5.41 e Figura 5.42, observa-se o ciclo de histerese em cada bobina do LCST. Os ciclos correspondem ao citado antes sobre as características temporais das correntes e fluxos neste ensaio. Pela análise do ciclo de histerese na fase B e C, pressupõe-se que estas fases do núcleo estejam no limiar de atingir a saturação magnética.

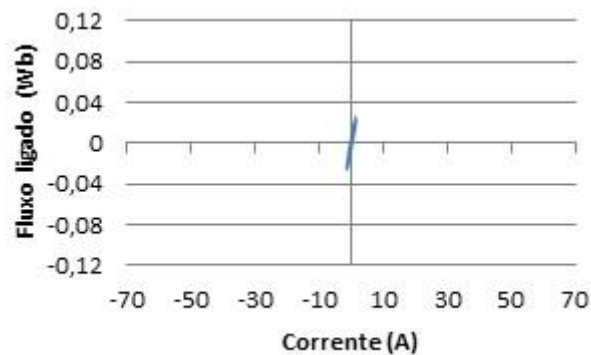


Figura 5.40 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário.

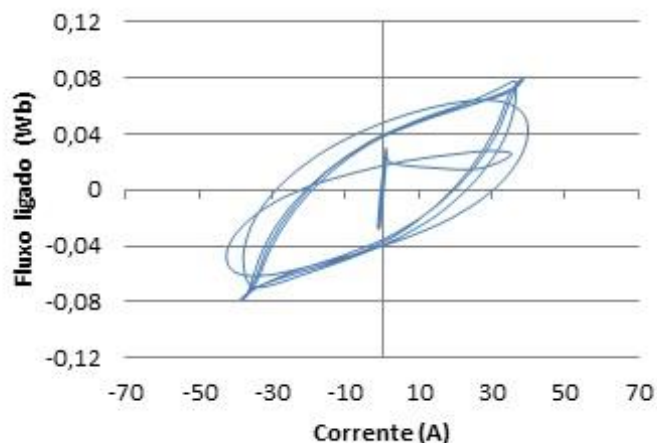


Figura 5.41 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário.

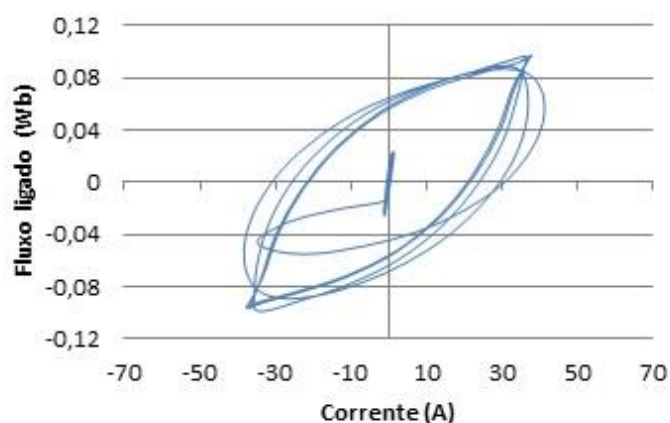
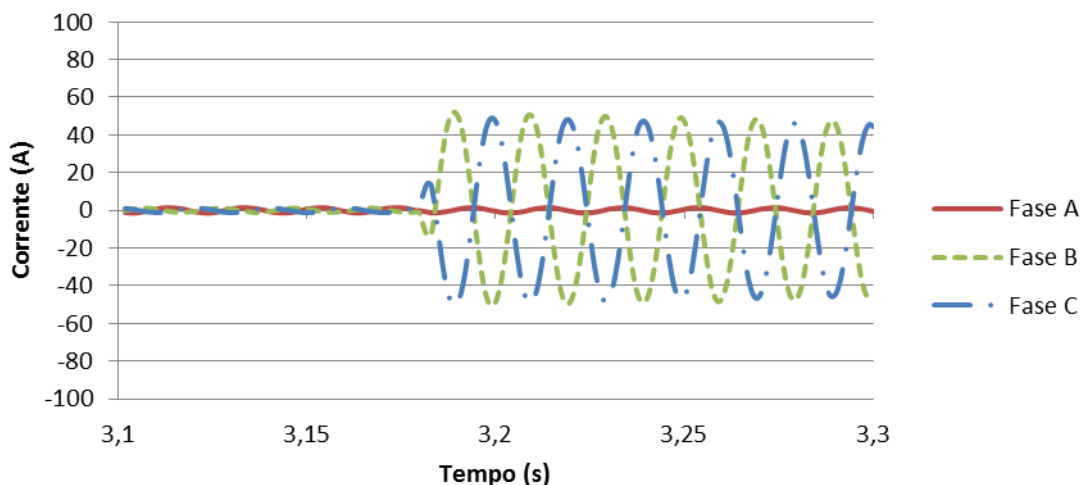


Figura 5.42 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário.

#### 5.2.2.2 Curto-Circuito Fase-Fase: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

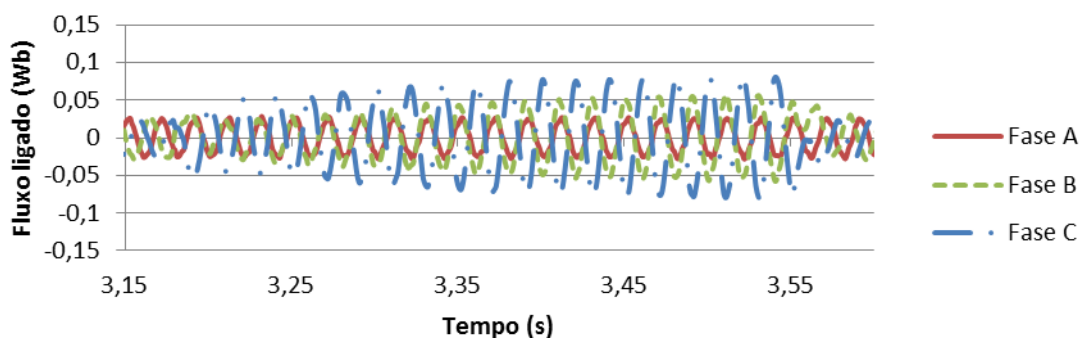
Analise-se agora os valores experimentais do ensaio de CC fase-fase, com recurso a um secundário formado por duas espiras SAT.

Comparativamente ao ensaio anterior, verifica-se que em regime de falha, a corrente do primeiro pico da fase B e C atingem valores de maior amplitude, neste caso  $i_B = 52$  e  $i_C = 49$  A. Após o primeiro período do sinal, estes valores tendem para 48 A e 47 A respectivamente. Antes da falha, regista-se 1,3 A de corrente na linha em todas as fases. Face às correntes presumidas evidenciadas em 5.1.2, verifica-se uma limitação de 32% na fase B e 34% na fase C.



**Figura 5.43 - CC fase-fase: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

A blindagem magnética do núcleo antes da falha encontra-se dentro dos mesmos patamares do que quando o secundário é constituído por uma única espira SAT, ou seja, na ordem dos 30 mWb de amplitude. Como ocorrido no item 5.2.2.1, o fluxo da fase A,  $\psi_A$ , mantém-se inalterado ao longo do ensaio. Por outro lado, com a adição de mais espira SAT, observa-se maior oposição à circulação de fluxo no núcleo, na medida em que os fluxos ligados das fases afectadas pelo defeito,  $\psi_B$  e  $\psi_C$ , são inferiores aos apurados com um anel supercondutor. Para este ensaio, resulta fluxos com amplitude de  $\psi_B = 54$  e  $\psi_C = 79$ .



**Figura 5.44 - CC fase-fase: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

Observa-se que o CC não influencia a característica da tensão em função do tempo na fase A, na medida que  $u_A$  apresenta 0,9 V de amplitude ao longo do ensaio. No entanto, aquando da falha fase-fase, mede-se 76 V e 85 V nas tensões da fase B e C da fonte e cerca de 23 V aos terminais do LCST nas mesmas fases, o que equivale a 30% da tensão da fonte, sendo este valor menor que o adquirido no ensaio com uma fita SAT. De salientar a invisibilidade do dispositivo em operação normal, confirmada pela percentagem de tensão aos terminais do limitador, que ronda os 0,6%.

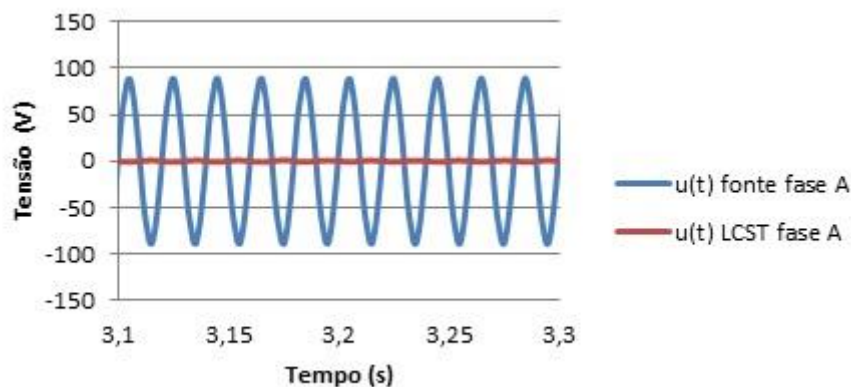


Figura 5.45 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.

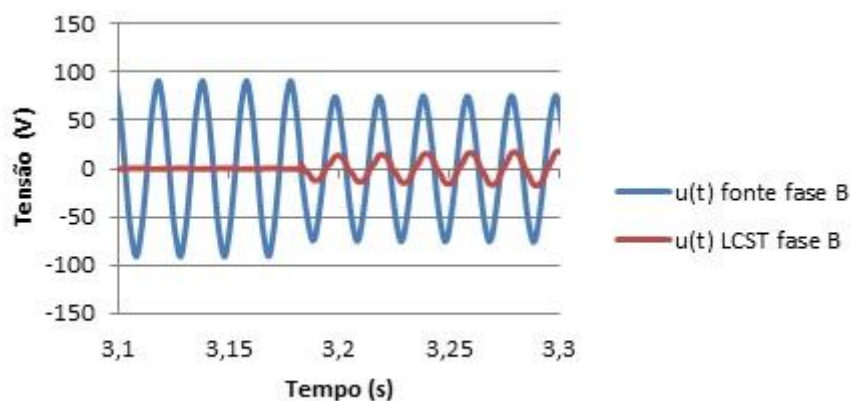


Figura 5.46 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.

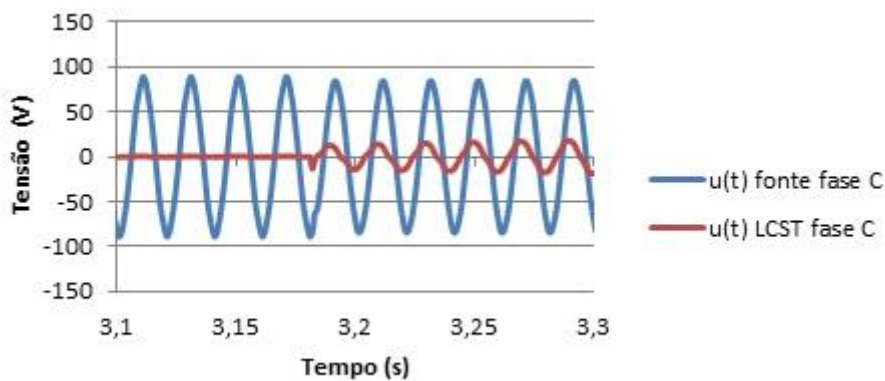


Figura 5.47 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.

Na Figura 5.48, Figura 5.49 e Figura 5.50, encontra-se ilustrado o ciclo de histerese de cada bobina do limitador. Repara-se que nas fases atingidas pelo CC, a corrente dispara para valores semelhantes, sendo o fluxo da fase C superior ao da fase B.

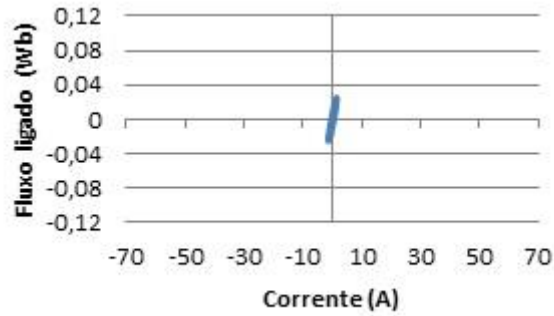


Figura 5.48 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.

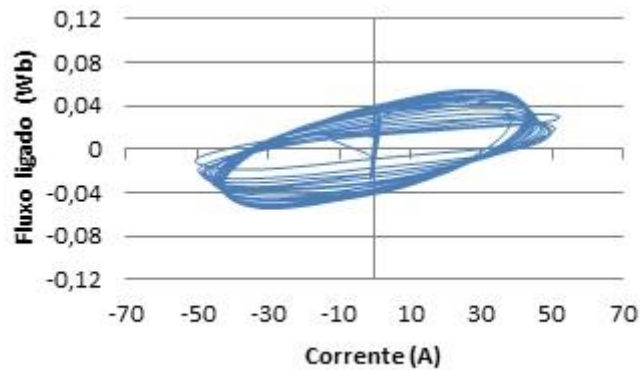


Figura 5.49 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.

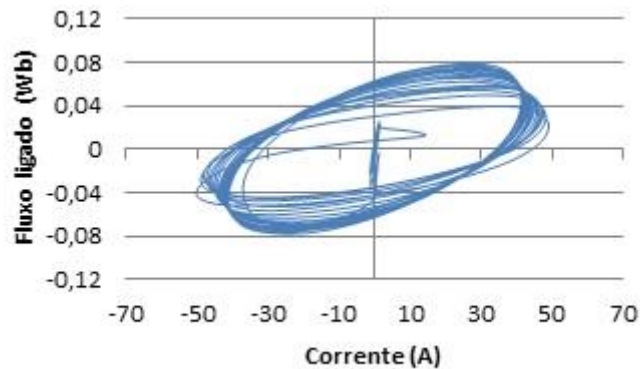
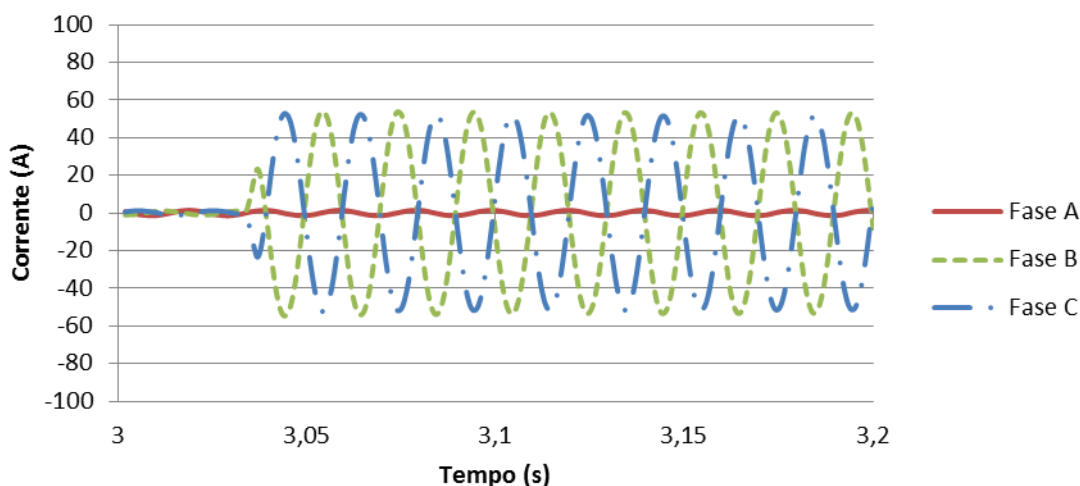


Figura 5.50 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.

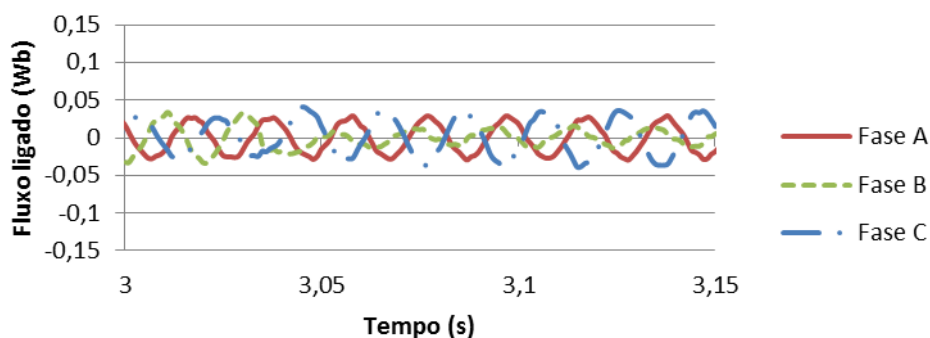
### 5.2.2.3 Curto-Circuito Fase-Fase: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

Por último, para este CC, realizou-se um novo ensaio, adicionando uma terceira fita supercondutora a cada uma das fases. No período pré-falha, a corrente de linha das três fases apresenta os mesmos valores que nas duas situações anteriores, aproximadamente 1,3 A de amplitude. Na presença de uma corrente de CC, a corrente máxima da fase B e C têm o valor máximo de 54 A e 53 A. Após o primeiro pico associado ao regime de falha, as correntes de linha estabilizam para  $i_B = 52 A$  e  $i_C = 51 A$ , inferindo-se que a adição de mais um anel supercondutor inferioriza a limitação da corrente presumida.



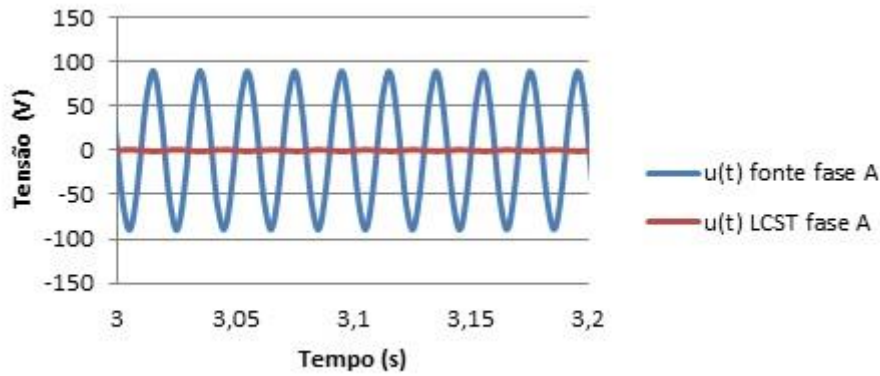
**Figura 5.51 - CC fase-fase: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.**

Relativamente ao fluxo ligado com o primário, os valores em funcionamento normal mantêm-se dentro da média dos dois ensaios anteriores, por volta dos 30 mWb de amplitude. Aquando da falha fase-fase, o fluxo máximo da fase A mantêm-se inalterado, observando-se um grande crescimento na oposição à circulação de fluxo no ferro nas fases B e C, em comparação com os realizados com uma e duas fitas SAT. Nesta situação regista-se um fluxo ligado com o primário de 15 mWb na fase B e 36 mWb na fase C, observando-se que  $\psi_B$  é menor em falha do que em regime normal, confirmando a maior oposição à circulação de fluxo no núcleo.

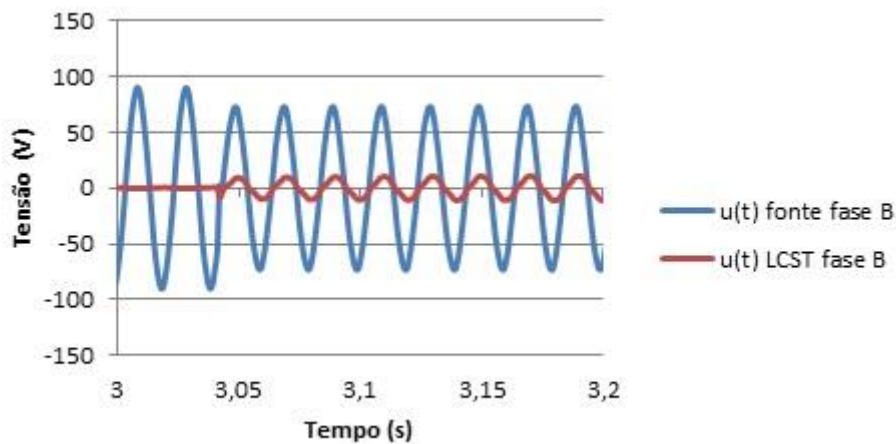


**Figura 5.52 - CC fase-fase: fluxo magnético em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.**

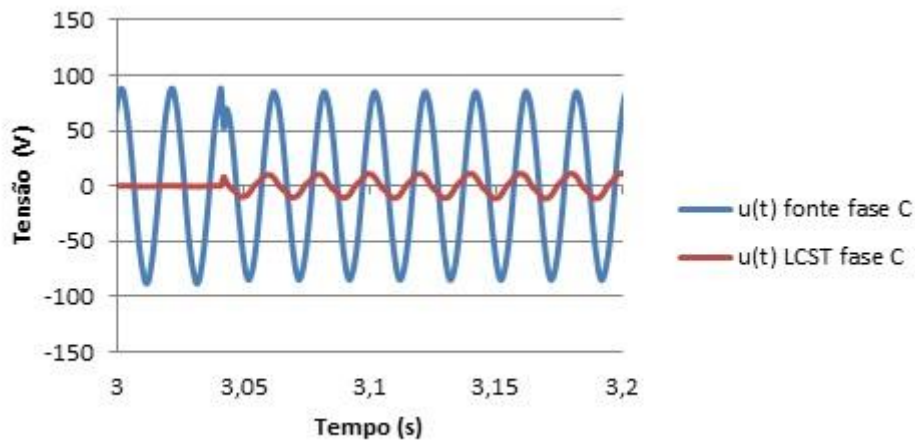
Na Figura 5.53, Figura 5.54 e Figura 5.55 constata-se que em funcionamento normal a queda de tensão aos terminais do LCST é praticamente desprezável face à da fonte, confirmando a transparência do dispositivo. Na presença do CC, a queda da tensão aos terminais do limitador, nas fases defeituosas, assinala uma tensão máxima próxima dos 12 V, atestando que a percentagem da queda de tensão aos terminais do limitador em relação à tensão da fonte é tanto menor quanto mais espiras SAT constituírem o secundário.



**Figura 5.53 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.**



**Figura 5.54 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.**



**Figura 5.55 - CC fase-fase: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.**

Por fim, no que toca ao ensaio do CC fase-fase com três anéis supercondutores em cada fase do secundário, representa-se os ciclos de histerese de cada bobina na Figura 5.56, Figura 5.57 e Figura 5.58. Comprova-se as correntes de CC mais elevadas e o acréscimo significativo de oposição à circulação do fluxo ligado nas fases B e C, verificando-se a discrepância de valores nos fluxos da fase B e C, e que é justificado pelas diferentes

quantidades de volume de ferro envolvidas na circulação dos dois fluxos, originado assim diferentes perdas magnéticas nas duas fases.

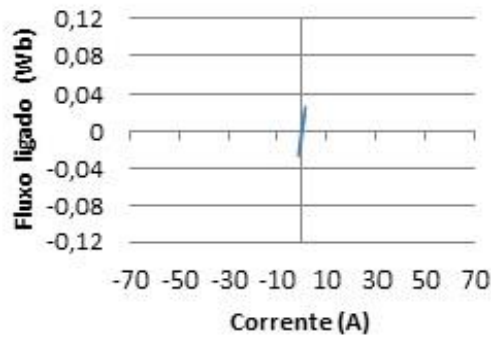


Figura 5.56 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.

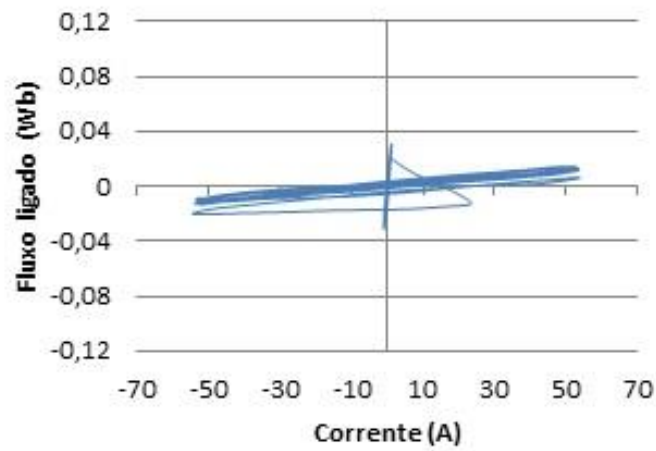


Figura 5.57 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.

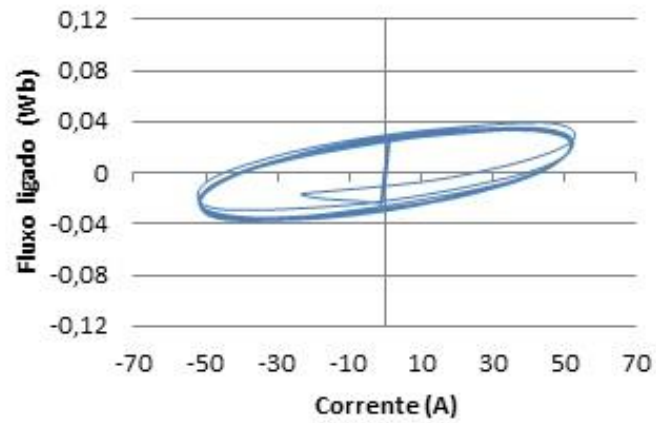


Figura 5.58 - CC fase-fase: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.

### 5.2.3 Curto-Circuito Fase-Terra

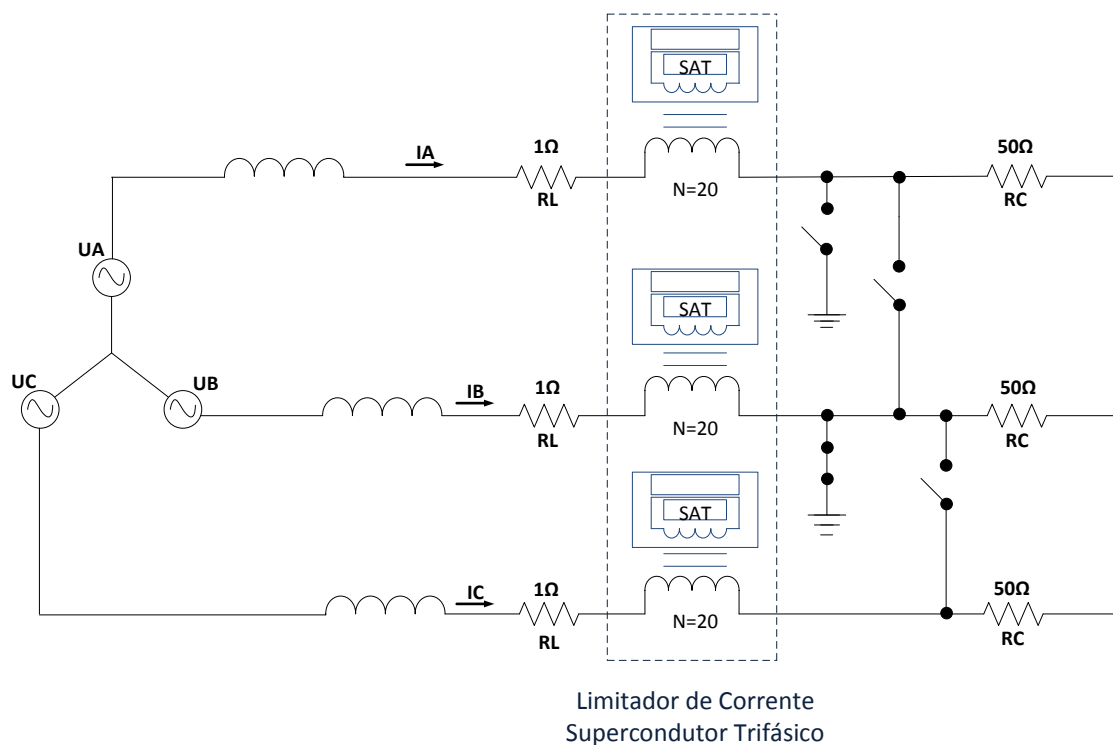


Figura 5.59 - Esquema eléctrico de ensaio do LCST com uma falha fase-terra.

Nota: Na Figura 5.59 a terra corresponde ao neutro do transformador.

Nesta situação, pretende-se causar uma falha fase-terra. Esta intenção é provocada mediante o accionamento do interruptor presente na fase B do circuito, que se encontra localizado entre os terminais da fase B do LCST e a terra. Na Figura 5.59 representa-se o referido. Para efeitos de comparação com as correntes limitadas, considere-se as correntes presumidas obtidas sem a presença do LCST, tal como ensaiado no item 5.1.3, e registado novamente na Figura 5.60.

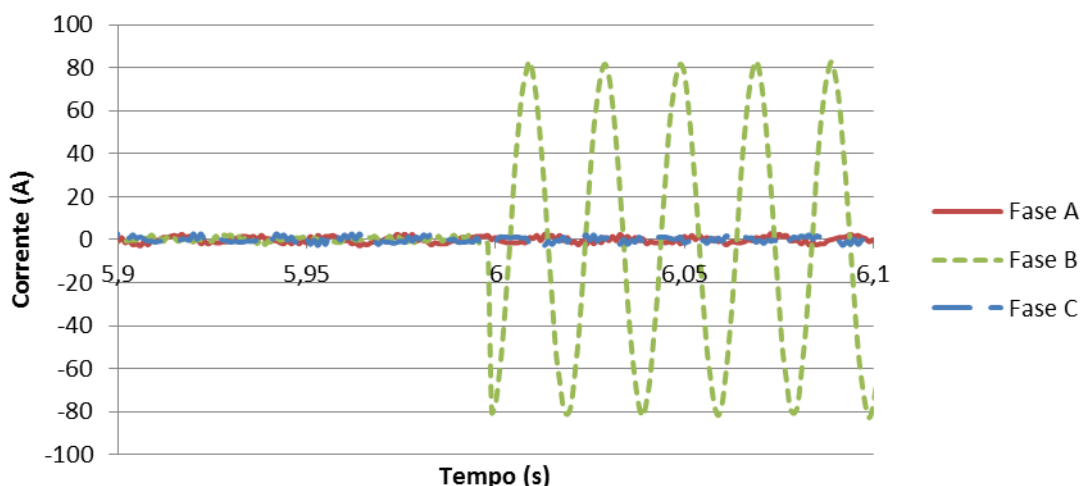


Figura 5.60 – CC fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST (idêntico à Figura 5.5).

### 5.2.3.1 Curto-Circuito Fase-Terra: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário

É possível observar pela Figura 5.61 que a fase curto-circuitada neste ensaio é a B. Ao se activar o interruptor para a execução do defeito fase-terra, a fase B tem o valor máximo de cerca de 60 A no primeiro pico do sinal, ocorrendo uma estabilização posterior para 52 A. Em regime de funcionamento normal, as correntes de linhas não excedem os 1,3 A de amplitude, permanecendo os mesmos valores para as fases A e C em ocorrência de CC. Face à corrente presumida exposta no item 5.1.3, verifica-se que há uma limitação de corrente de aproximadamente 40%.

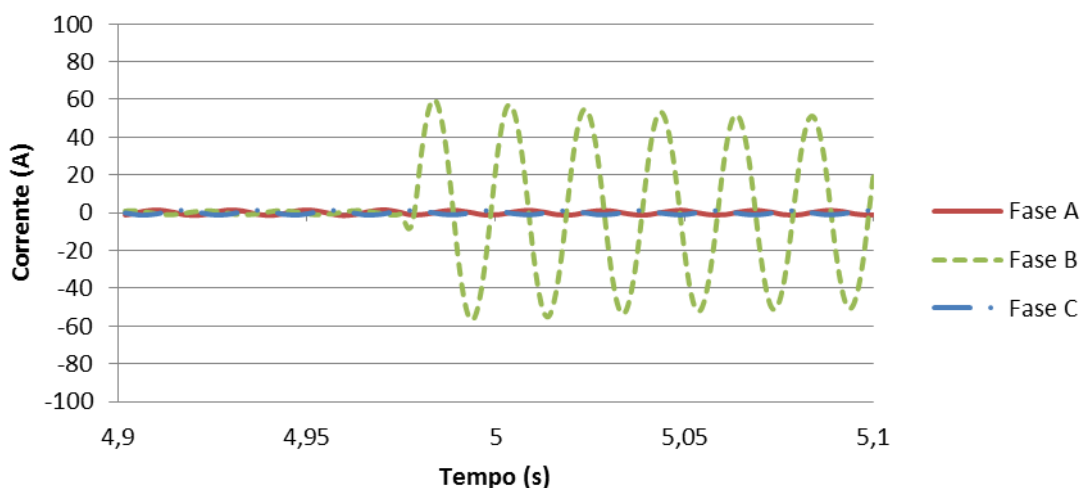
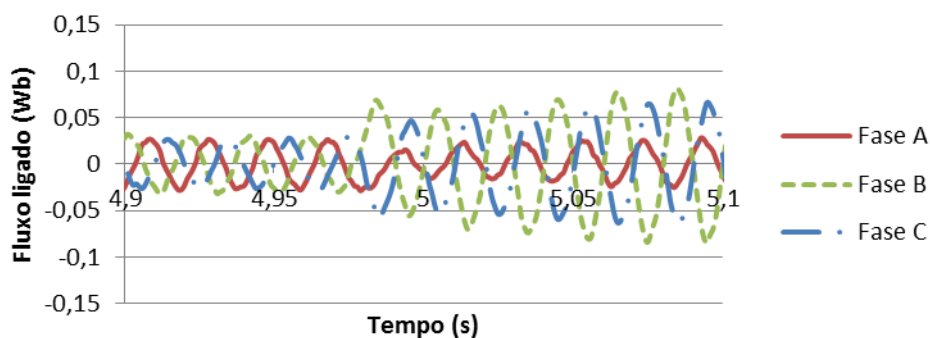


Figura 5.61 - CC fase-terra: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.

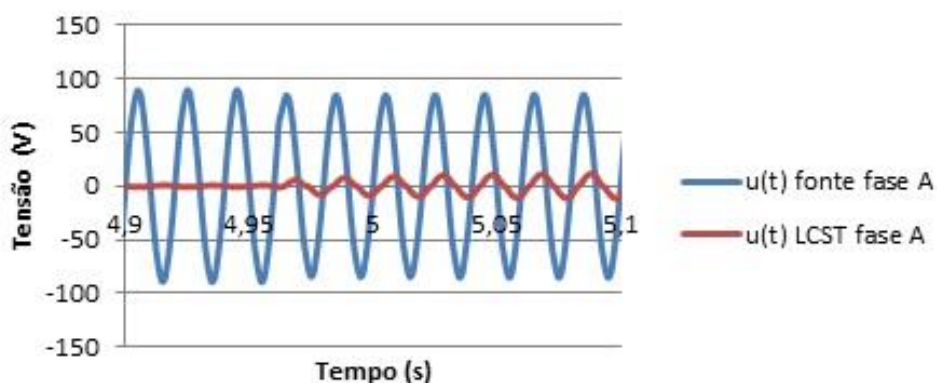
No que se refere ao comportamento do fluxo ligado com o primário, deste ensaio, constata-se pela Figura 5.62 que em operação normal o seu valor máximo encontra-se próximo dos 30 mWb nas três fases. Em situação de CC, e como expectável, verifica-se um acréscimo de circulação de fluxo no ferro na fase afectada, na ordem dos 79 mWb de amplitude. De referir

que o fluxo da fase C também aumenta, nomeadamente para 62 mWb de valor máximo. Estes resultados traduzem-se pelos desequilíbrios existentes na circulação do fluxo magnético em cada fase, que diferem devido às distintas quantidades de ferro envolvidas em cada fase. Relativamente à fase A, verifica-se uma ligeira diminuição de fluxo máximo no momento do CC, retornando aos 30 mWb após o primeiro pico.



**Figura 5.62 - CC fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.**

Quanto à característica da tensão, pela Figura 5.63, Figura 5.64 e Figura 5.65, certifica-se uma vez mais que antes da surgimento do CC, o LCST não influencia o funcionamento do circuito, na medida em que a tensão aos terminais do mesmo é no máximo 0,8% da tensão fornecida pela fonte que vale 90 V. Aquando do CC fase-terra, observa-se na fase B, uma queda de tensão aos terminais do LCST de 38%, resultante dos cerca de 31 V de amplitude medidos aos terminais da respectiva fase do limitador, face aos 81 V da tensão na fonte. Nos terminais do limitador nas fases A e C regista-se uma queda de tensão menor, 13 V, que corresponde a cerca 15% da tensão da fonte nas mesmas fases, 85 V em A e 90 V em C.



**Figura 5.63 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário.**

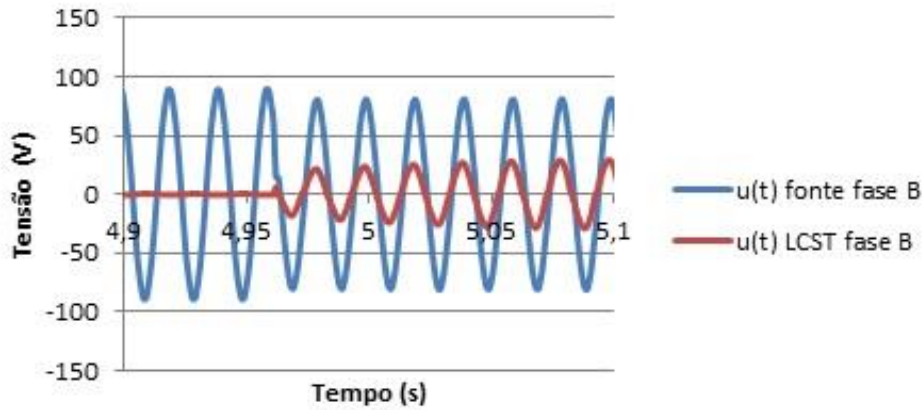


Figura 5.64 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário.

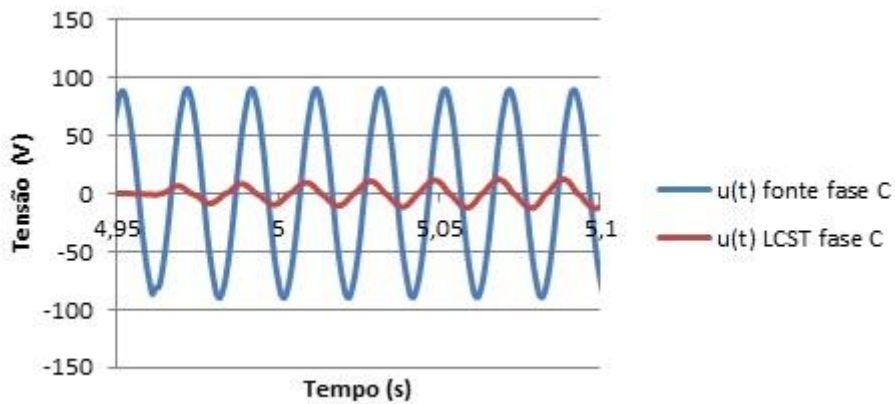


Figura 5.65 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário.

Pelos ciclos de histerese das bobinas da fase A, B e C, confirma-se o mencionado sobre os valores de correntes e fluxos registados nas três fases. Observa-se que a corrente de CC mais elevada sucede na fase B, assim como o fluxo. Na fase C, comprova-se também o incremento de circulação de fluxo no núcleo, apesar de a fase não ser atingida por nenhuma corrente de CC.

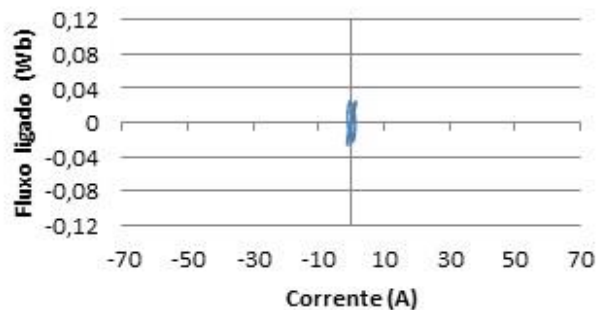


Figura 5.66 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário.

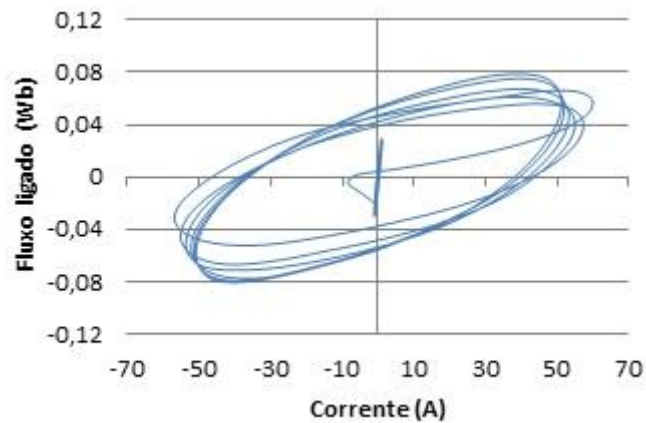


Figura 5.67 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário.

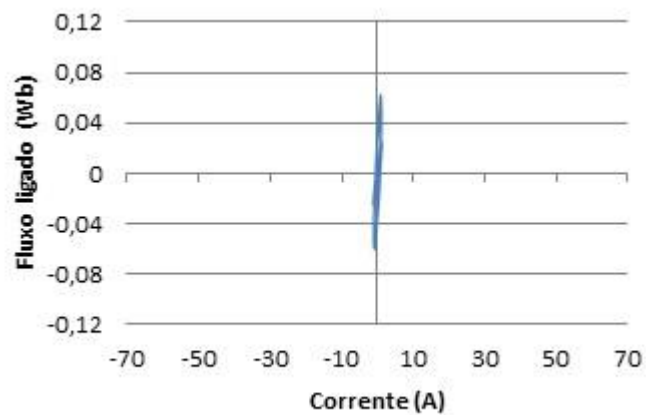
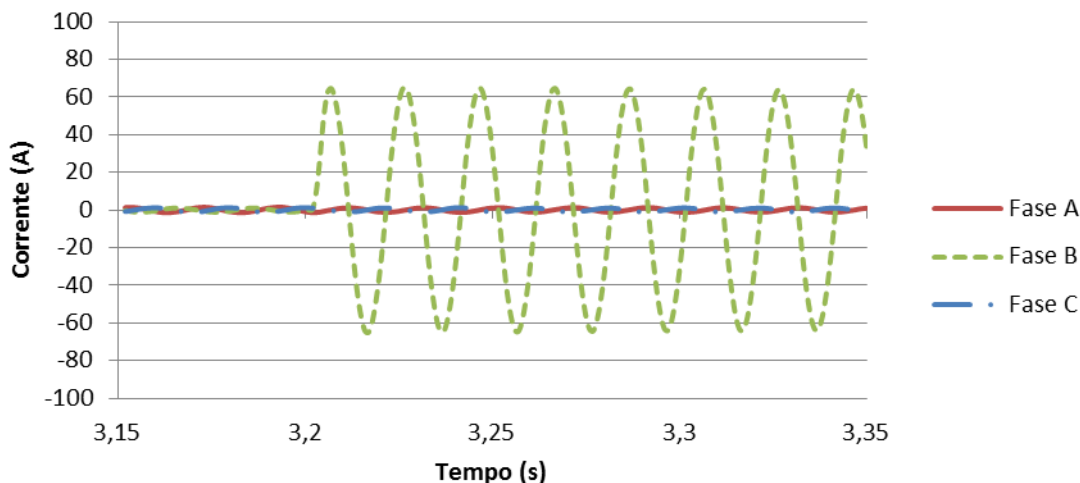


Figura 5.68 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário.

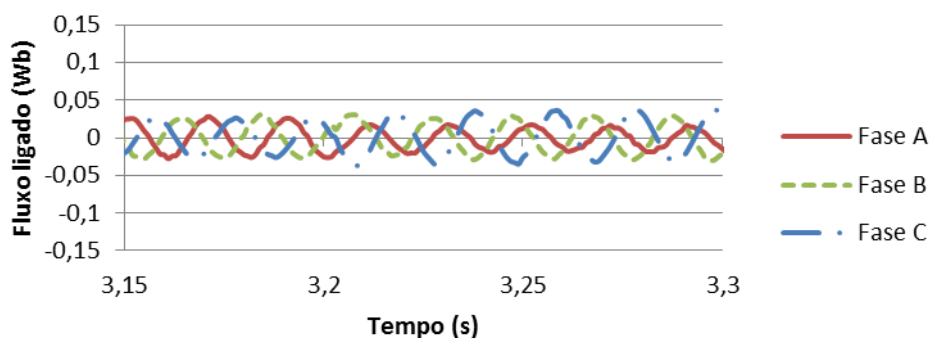
#### 5.2.3.2 Curto-Circuito Fase-Terra: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

Quando o secundário do LCST é composto por duas fitas SAT, observa-se pela Figura 5.69 que comparativamente ao ensaio realizado com um anel no secundário, a corrente de CC da fase B atinge um valor máximo superior. Neste ensaio, quando surge a falha, a corrente do primeiro pico é de 65 A de amplitude, valendo 64 A após este, conduzindo a uma menor limitação de corrente presumida. Atesta-se também que, durante o ensaio, a corrente da fase A e C mantém-se inalterada durante o ensaio, tal como acontecido no ponto 5.2.3.1.



**Figura 5.69 - CC fase-terra: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

As características do fluxo magnético da Figura 5.70 demonstram que antes de causado o defeito no circuito, os valores de fluxo ligado permanecem próximos dos referidos no ponto 5.2.3.1, sendo portanto a blindagem magnética do núcleo semelhante a dos ensaios anteriores. Quando se origina o CC, verifica-se que ocorre uma redução significativa na variação de fluxo máximo ligado com o primário na fase curto-circuitada à terra, designadamente para 30 mWb. Verifica-se igualmente um decréscimo acentuado do fluxo na fase C para 37 mWb, que tal como visto no ensaio anterior, é justificada pelos desequilíbrios no núcleo ferromagnético. De notar que o fluxo da fase A depois do CC é ligeiramente inferior ao que antecede o defeito. Assim, infere-se que com a adição de uma segunda fita supercondutora em cada fase do LCST, advém um aumento considerável de oposição à circulação de fluxo magnético no núcleo, resultando uma variação de fluxo ligado praticamente similar antes e após a falha.



**Figura 5.70 - CC fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

A partir da Figura 5.71, Figura 5.72 e Figura 5.73, assevera-se a invisibilidade do limitador antes de se activar a falha fase-terra ao sistema trifásico. A tensão aos terminais do dispositivo nas três fases mantém-se na mesma gama de valores que nos ensaios anteriores, ou seja, cerca de 0,8% dos 90 V da tensão na fonte. Em regime de falha, constata-se uma

menor queda de tensão aos terminais do limitador face à tensão fornecida pela fonte, em relação ao resultado alcançado com um anel SAT. Neste caso, mede-se 14 V de amplitude aos terminais do dispositivo na fase B e 80 V na fonte, o que equivale a uma relação de 17%. Quanto às fases não curto-circuitadas regista-se 4 V aos seus terminais, que representam cerca de 5% da tensão na fonte.

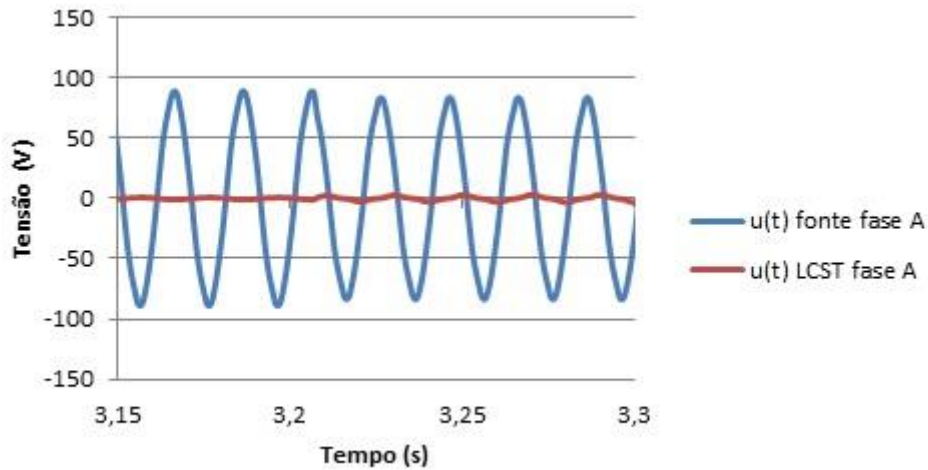


Figura 5.71 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.

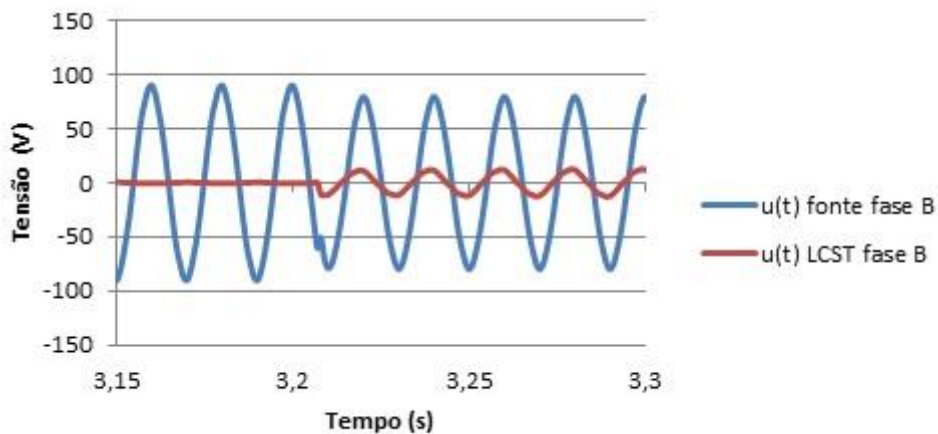
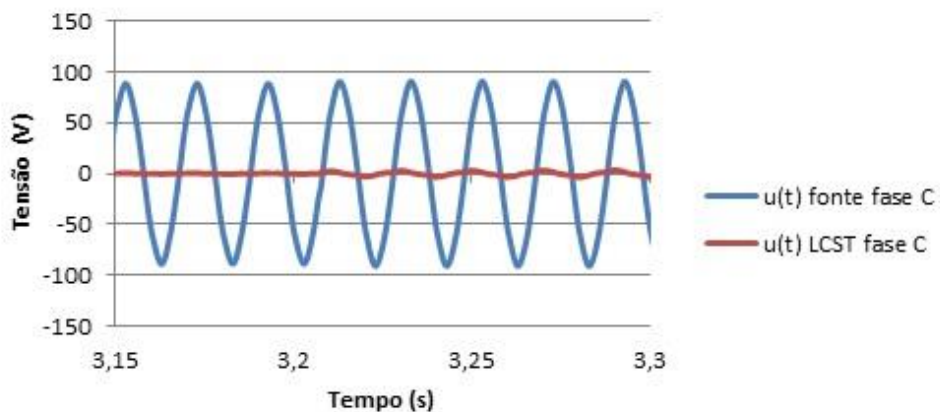
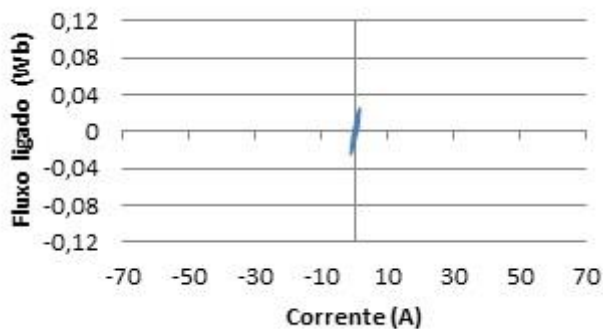


Figura 5.72 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.

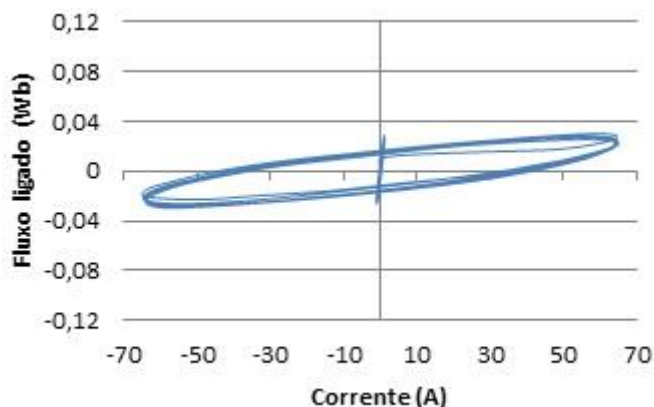


**Figura 5.73 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.**

É possível observar pelos ciclos de histerese ilustrados na Figura 5.74, Figura 5.75 e Figura 5.76, o mencionado acerca da característica temporal do fluxo e da corrente deste ensaio. Aquando do CC, o aumento abrupto de corrente provém da fase B, sendo na fase C que se detecta maior circulação de fluxo ligado com o primário.



**Figura 5.74 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.**



**Figura 5.75 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.**

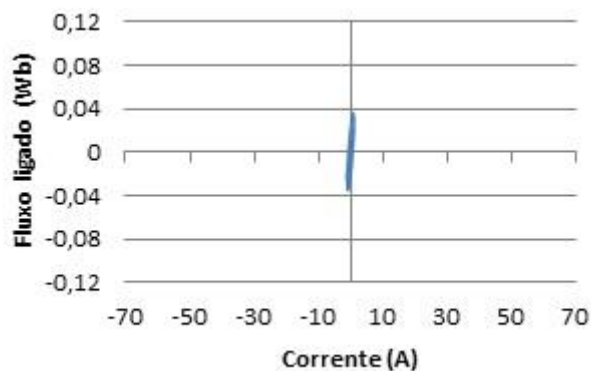


Figura 5.76 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.

### 5.2.3.3 Curto-Circuito Fase-Terra: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

A partir da Figura 5.77, verifica-se que a corrente de CC da fase B atinge um valor máximo muito próximo do atingido no ensaio com duas espiras SAT, neste caso 67 A no primeiro pico, e excluindo este pico, observa-se uma corrente máxima de linha de 65 A. Portanto, a quantidade de corrente presumida que é limitada é praticamente a mesma quer o secundário seja composto por dois ou três anéis supercondutores, ou seja, 23%. Quanto às correntes  $i_A$  e  $i_C$ , mantém-se inalteradas, tal como no item 5.2.3.1 e 5.2.3.2.

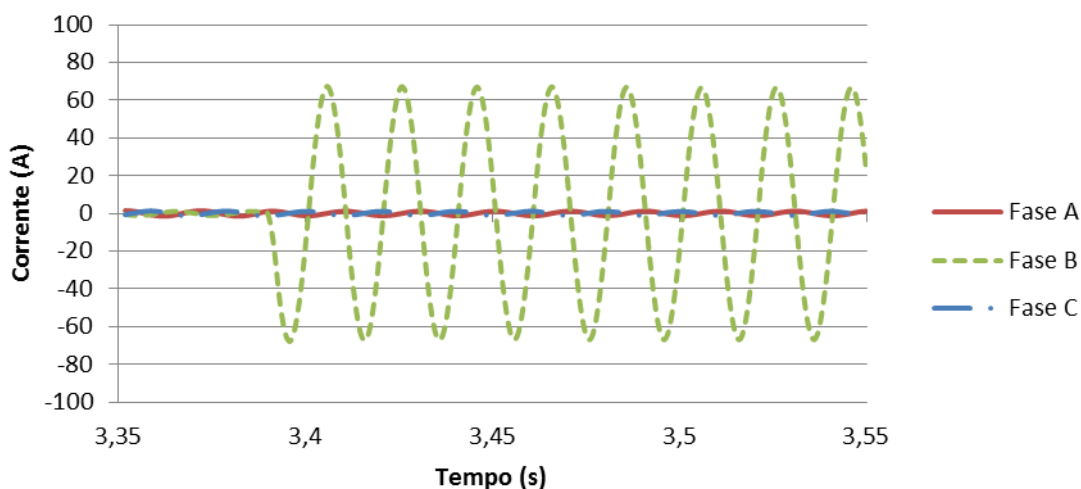
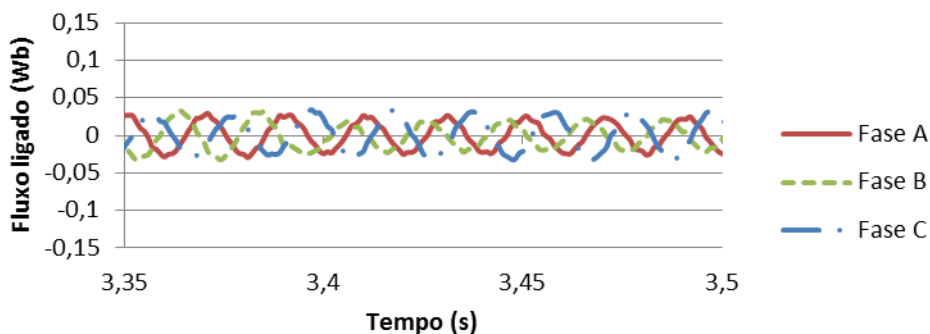


Figura 5.77 - CC fase-terra: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.

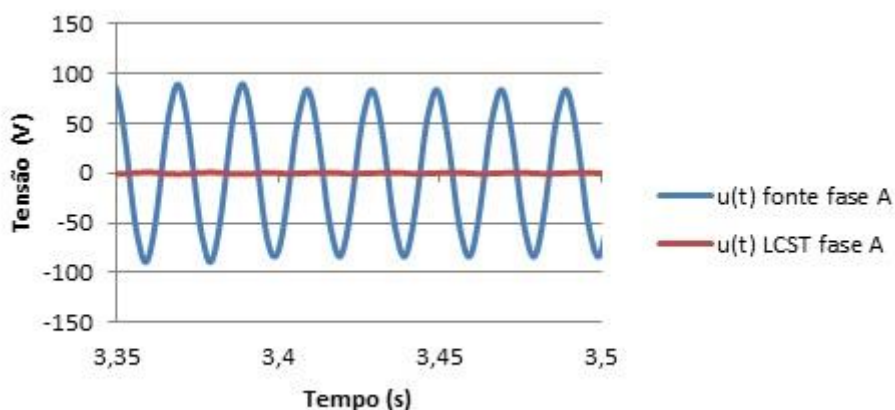
Em funcionamento normal, o fluxo magnético ligado com o primário das três fases encontra-se dentro da mesma gama de valores que os verificados nos ensaios antecedentes, ou seja, 30 mWb no máximo. Aquando da ocorrência de uma falha, e em concordância com o que se apurou no ensaio com duas fitas supercondutoras, a variação do fluxo magnético nas três fases do núcleo é reduzida. Pela Figura 5.78 observa-se um acréscimo de dificuldade à circulação do fluxo, na medida em que os fluxos máximos  $\psi_B$  e  $\psi_C$  são inferiores aos do ensaio realizado com duas espiras SAT, sendo o fluxo magnético da fase B em CC inferior ao

registado em operação normal. Na fase B regista-se 21 mWb de fluxo ligado com o primário e 31 mWb em C. O fluxo da fase A permanece constante.

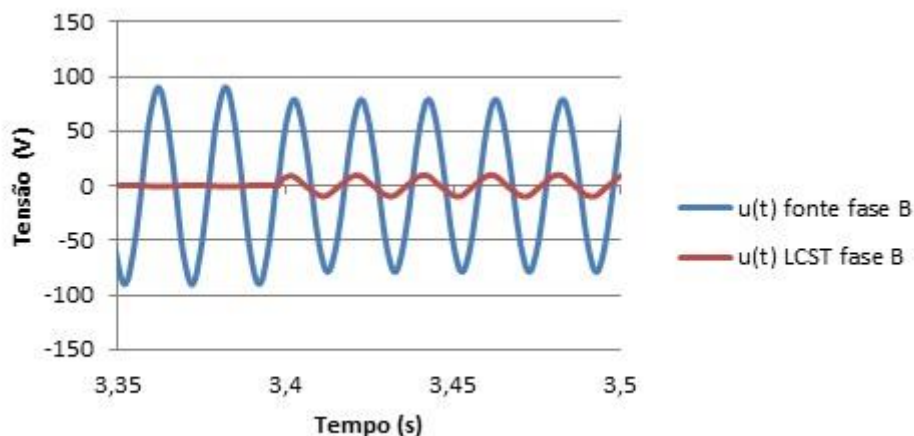


**Figura 5.78 - CC fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.**

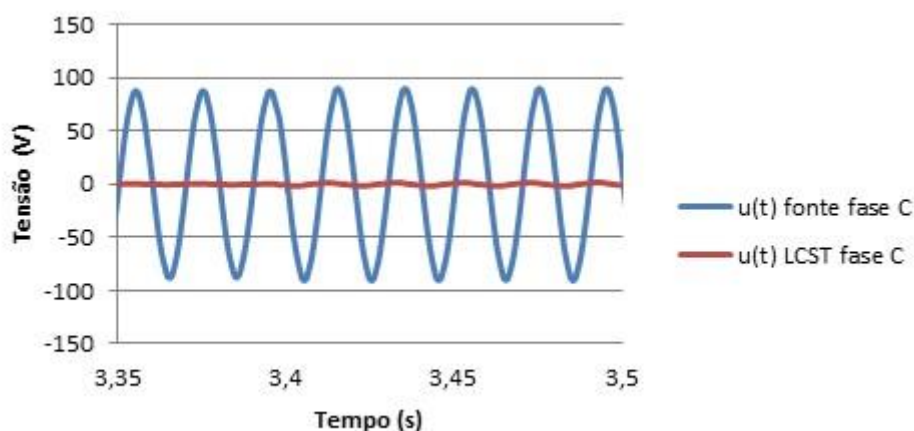
Quanto às características da tensão, constata-se pela Figura 5.79, Figura 5.80 e Figura 5.81, a invisibilidade do LCST em regime de operação normal, devido à quase inexistente queda de tensão aos terminais do mesmo, valendo no máximo 1% dos 90 V fornecidos na fonte de alimentação. Quando se proporciona o CC, ocorre uma menor queda de tensão aos terminais do limitador comparativamente aos expostos no secundário com dois anéis SAT. A fase que sofre o CC exibe 10 V de tensão máxima nos terminais do limitador, que equivale a uma relação de 13% face aos 78 V medidos na fonte. Nas fases A e B, a percentagem de queda de tensão resultante é de 1,1% e 2,2% respectivamente.



**Figura 5.79 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.**



**Figura 5.80 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.**



**Figura 5.81 - CC fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.**

Por fim, analisa-se os ciclos de histerese da Figura 5.82, Figura 5.83 e Figura 5.84. Na fase A não se registam aumentos abruptos das grandezas. Na fase curto-circuitada, os três anéis supercondutores, que formam o secundário, acrescentam uma oposição considerável à circulação de fluxo no núcleo nos momentos de falha, sendo a variação do fluxo antes do CC superior à assinalada aquando da transição das espiras do estado supercondutor para o estado normal. Na fase C, regista-se um ligeiro crescimento do fluxo magnético quando promovido o CC fase-terra.

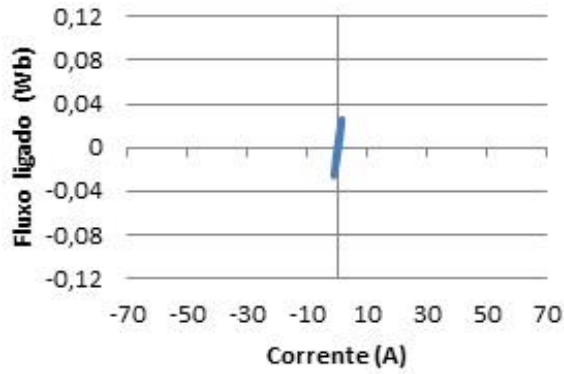


Figura 5.82 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.

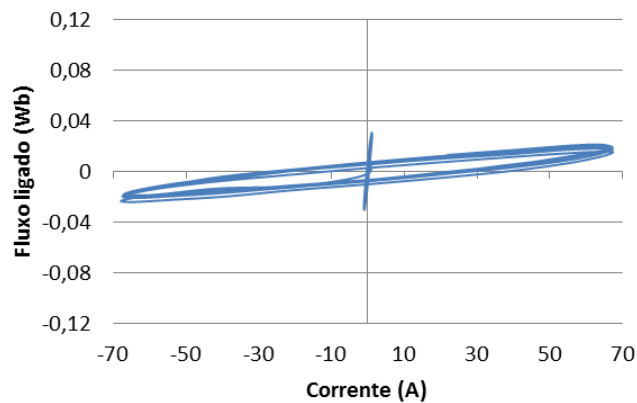


Figura 5.83 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.

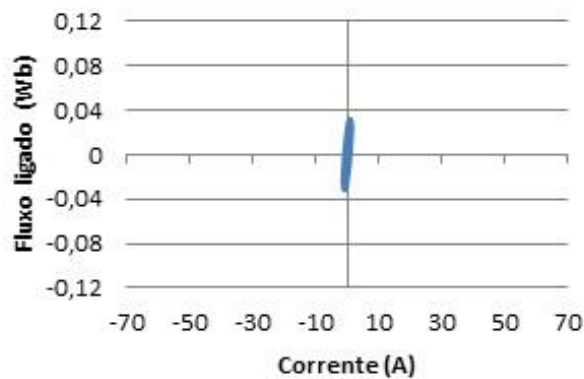
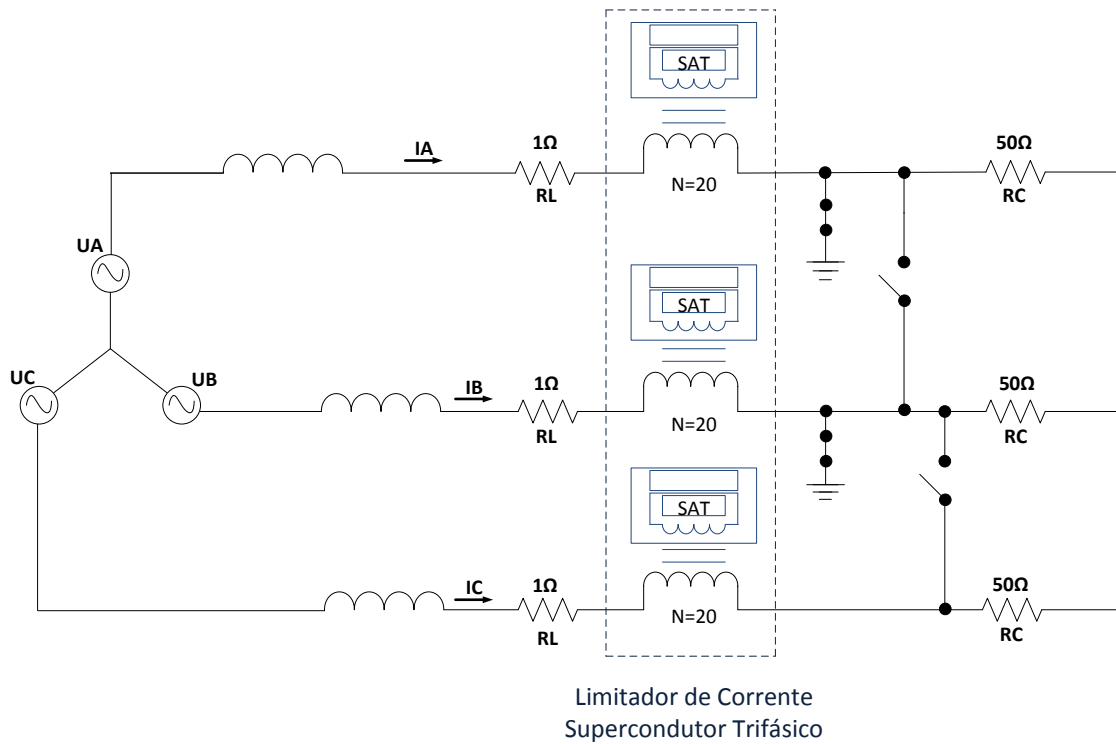


Figura 5.84 - CC fase-terra: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.

#### 5.2.4 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra

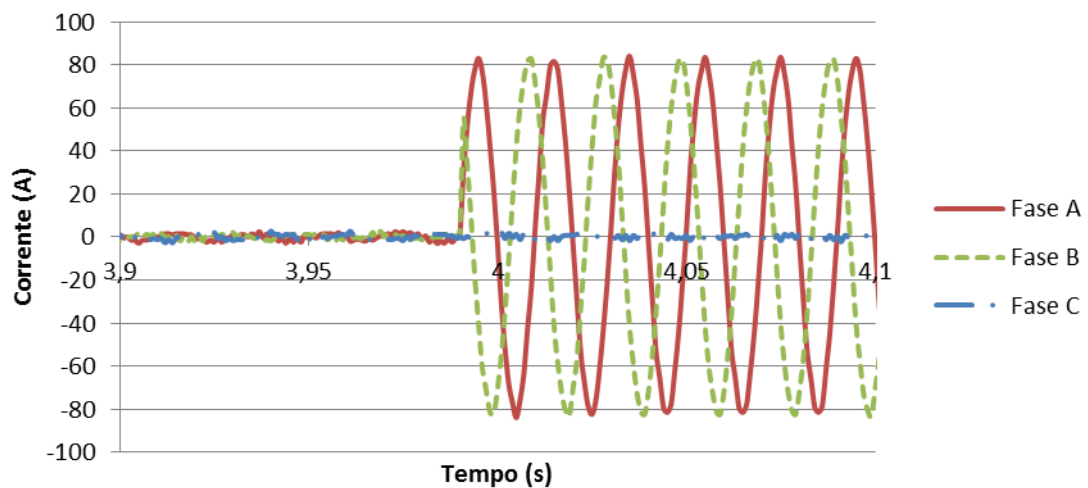
Outro tipo de CC possível de surgir numa rede trifásica é o fase-fase-terra. Este CC caracteriza-se por afectar duas fases que se ligam à terra. De acordo com a Figura 5.85, verifica-se que as fases curto-circuitadas à terra neste ensaio são a fase A e B, mediante o accionamento simultâneo dos interruptores com ligação à terra localizados nas fases referidas. Considere-se a Figura 5.86, que ilustra as correntes presumidas para este tipo de falha,

ensaiadas no item 5.1.4, e que servem como dados para fins de cálculo do poder de limitação do LCST construído.



**Figura 5.85 - Esquema eléctrico de ensaio do LCST com uma falha bifásica-terra.**

Nota: Na Figura 5.85 a terra corresponde ao neutro do transformador.



**Figura 5.86 – CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo sem LCST (idêntico à Figura 5.6).**

#### 5.2.4.1 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra: 1 Anel de Fita Supercondutora no Secundário

Como expectável, e tendo em conta o analisado no item 5.1.4, este tipo de defeito ao ser incitado origina correntes de CC nas fases em que se anula as respectivas resistências de carga. Assim, devido à activação dos interruptores, com ligação à terra, presentes nas fases A e B, induz-se ao aumento abrupto de correntes nas mesmas fases, tal como descrito na Figura 5.87. Observa-se que no primeiro pico pós-defeito, a corrente máxima é de 49 A na fase A e 58 A na fase B. Para efeitos de cálculo da limitação da corrente presumida, considera-se a corrente após o primeiro pico, que vale 43 A na fase A e 58 A na fase B, resultando portanto numa limitação de 49% e 31% respectivamente. Pelo facto da corrente  $i_B$  ser superior do que  $i_A$ , pressupõe-se os desequilíbrios existentes no circuito implementado, resultantes dos diversos elementos que o compõem. De referir, que a corrente de linha nas três fases vale 1,3 A, tal como nos ensaios prévios.

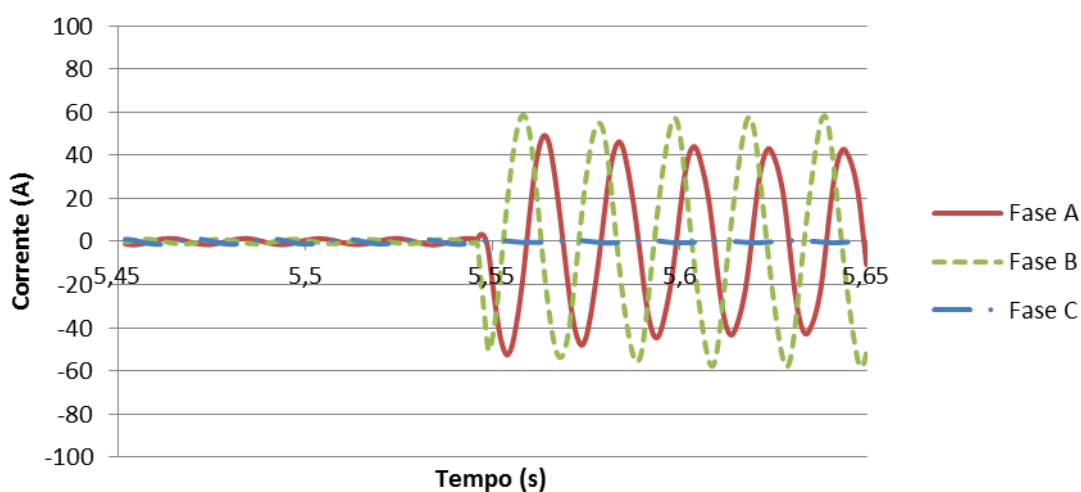
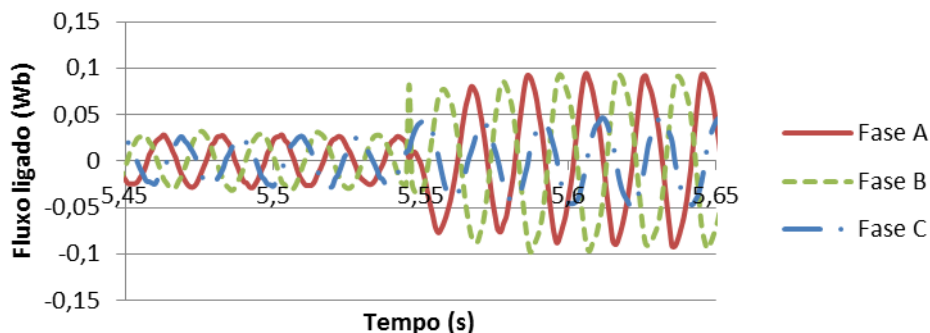


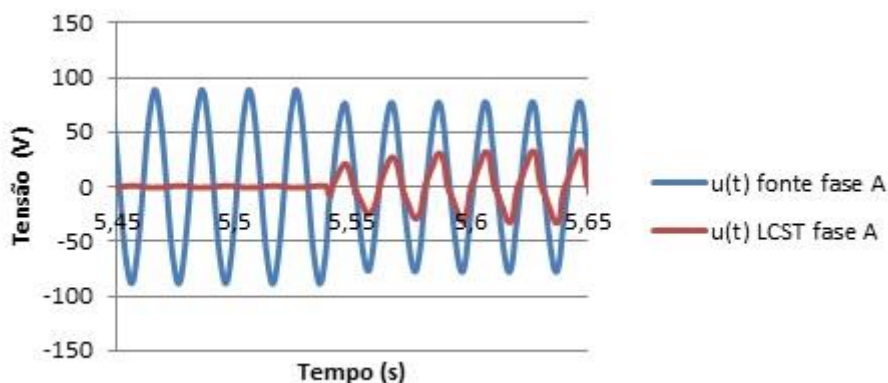
Figura 5.87 - CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.

Em funcionamento normal, a blindagem magnética é similar nas três fases e à dos ensaios anteriores, ou seja, próxima dos 30 mWb de amplitude. Aquando do CC bifásico-terra, verifica-se um aumento na circulação de fluxo ligado com o primário nas três fases, onde ocorre um aumento rude de corrente. Verifica-se pela Figura 5.88 que o fluxo máximo na fase A, B e C é respectivamente 90 mWb, 91 mWb e 45 mWb.

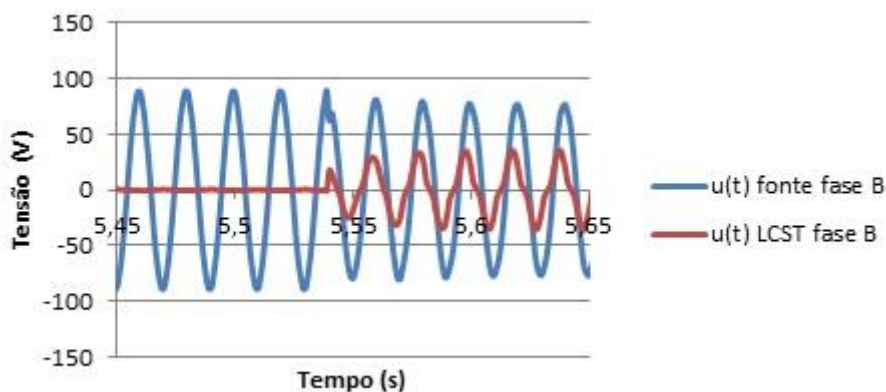


**Figura 5.88 - CC fase-fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com uma fita supercondutora no secundário.**

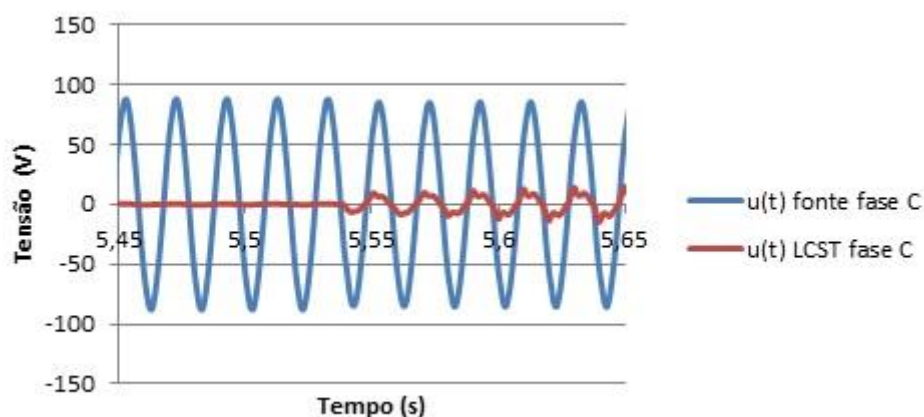
No que concerne às características da tensão, o LCST em funcionamento normal exibe aos seus terminais 0,76 V de tensão máxima, indiciando a sua transparência no sistema. Em situação de CC, este comportamento não se verifica, em virtude das maiores quedas de tensão medidas aos terminais do limitador. A fase A e B apresentam um sinal com uma amplitude de 38 V, e a fase C exibe 20 V. Estes valores, comparados às quedas de tensão na fonte de 77 V na fase A e B e 85,5 V na fase C, equivalem a uma queda de tensão aos terminais do limitador de 50% nas fases curto-circuitadas, e 24% na fase C.



**Figura 5.89 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com uma fita supercondutora no secundário.**

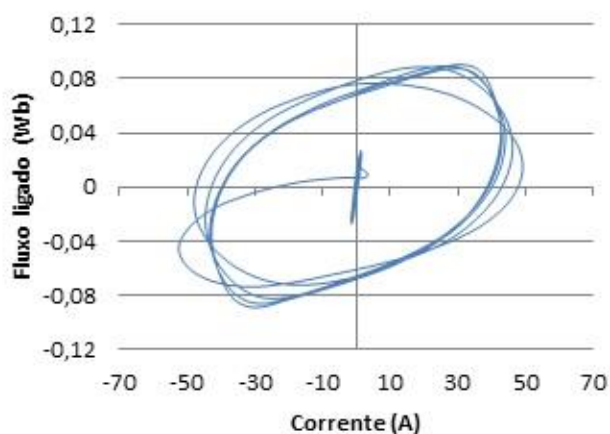


**Figura 5.90 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com uma fita supercondutora no secundário.**



**Figura 5.91 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com uma fita supercondutora no secundário.**

Por fim, no que respeita ao ensaio CC fase-fase-terra com uma espira supercondutora no secundário, observa-se na Figura 5.92, Figura 5.93 e Figura 5.94, os ciclos de histerese das bobinas do limitador. A fase C exibe uma variação de fluxo magnético de 45 mWb de amplitude, enquanto nas duas fases curto-circuitadas desponta o aparecimento das correntes de falha, assim como uma maior intensidade de fluxo máximo. As desiguais áreas dos ciclos de histerese das fases afectadas são justificadas pelas diferentes quantidades de ferro envolvidas em cada fase, sendo neste caso visível que a circulação de fluxo magnético da fase A envolve maior quantidade de ferro, pois o ciclo de histerese é mais largo. Estes resultados comprovam a assimetria do núcleo, que se reflecte nas perdas magnéticas.



**Figura 5.92 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase A com uma fita supercondutora no secundário.**

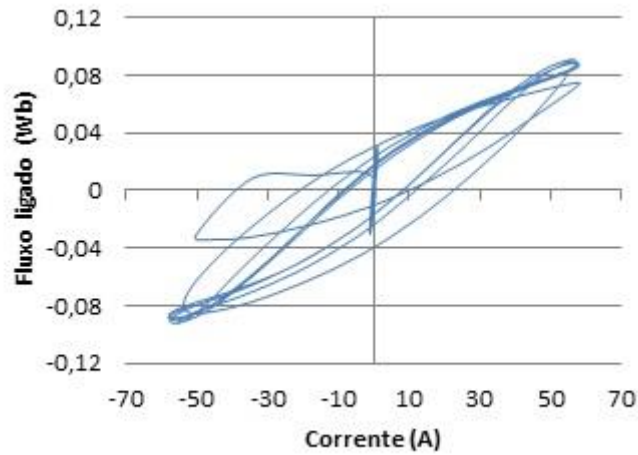


Figura 5.93 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase B com uma fita supercondutora no secundário.

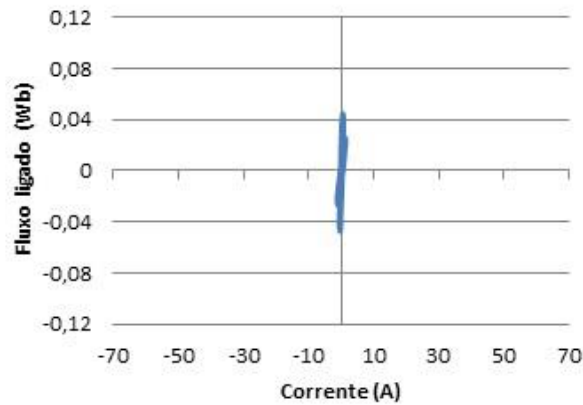
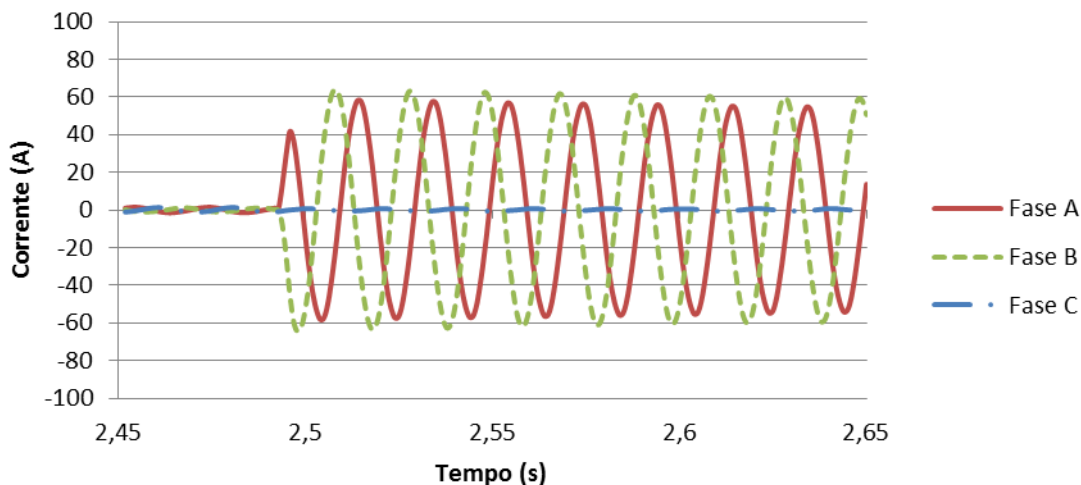


Figura 5.94 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase C com uma fita supercondutora no secundário.

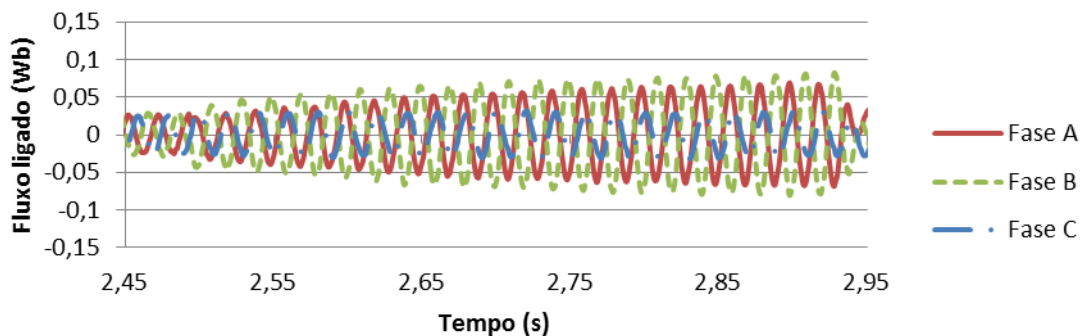
#### 5.2.4.2 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra: 2 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

Comparativamente ao ensaio anterior, observa-se na Figura 5.95 que em funcionamento normal, as três correntes mantêm uma amplitude de 1,3 A de corrente de linha. Em situação de CC, as correntes originadas na fase A e B tem um valor máximo de 58 A e 64 A, respectivamente. Contudo, tal como efectuado nos ensaios anteriores, exclui-se o primeiro pico do sinal após o defeito para efeitos de cálculo da limitação de corrente. Assim, a fase A apresenta uma corrente máxima de 55 A e a fase B 60 A, advindo uma limitação da corrente presumida de 35% e 29%. Portanto, com duas espiras SAT no secundário, a fracção de limitação de corrente é menor.



**Figura 5.95 - CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

O LCST disponibiliza em operação normal uma variação de fluxo idêntica aos ensaios já expostos, ou seja, 30 mWb no máximo. Por outro lado, verifica-se nas três fases formadas com duas espiras SAT no secundário, uma menor intensidade de fluxo máximo ligado com o primário quando se promove o CC bifásico-terra em relação ao obtido no item 5.2.4.1. A fase A exibe um crescimento constante de variação de fluxo até atingir aproximadamente 65 mWb de amplitude, enquanto na fase B regista-se um aumento até aos 78 mWb. A fase não curto-circuitada revela um ligeiro incremento até aos 31 mWb de amplitude, ou seja, praticamente igual ao medido em operação normal.



**Figura 5.96 - CC fase-fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com duas fitas supercondutoras no secundário.**

Considere-se agora a Figura 5.97, Figura 5.98 e Figura 5.99. Comprova-se novamente que a queda de tensão aos terminais das fases do LCST vale no máximo 1% da tensão na fonte, em funcionamento normal, tal como nos ensaios precedentes. Por outro lado, na presença do CC, a previsão de que a queda de tensão aos terminais do dispositivo seja inferior à verificada com uma fita SAT no secundário é confirmada. Neste caso, regista-se nos terminais da fase A, B e C uma tensão máxima de 24 V, 28 V e 4 V, resultando numa percentagem de limitação em relação à tensão na fonte de 29,2%, 34,5% e 5,1%, respectivamente.

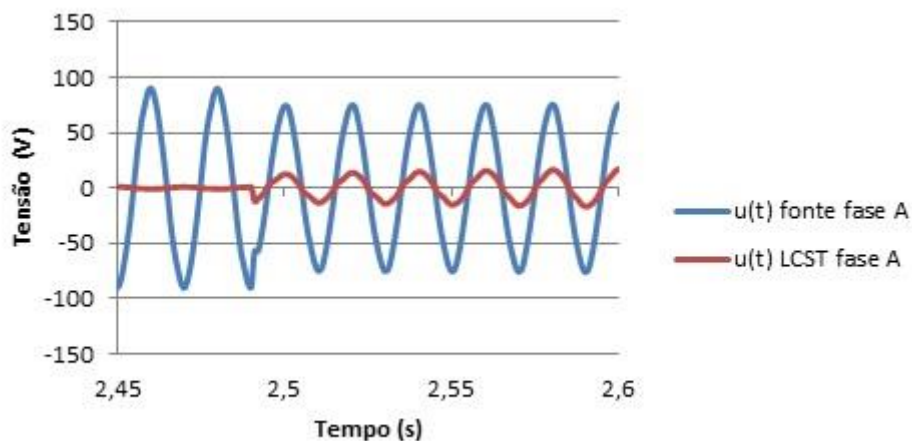


Figura 5.97 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.

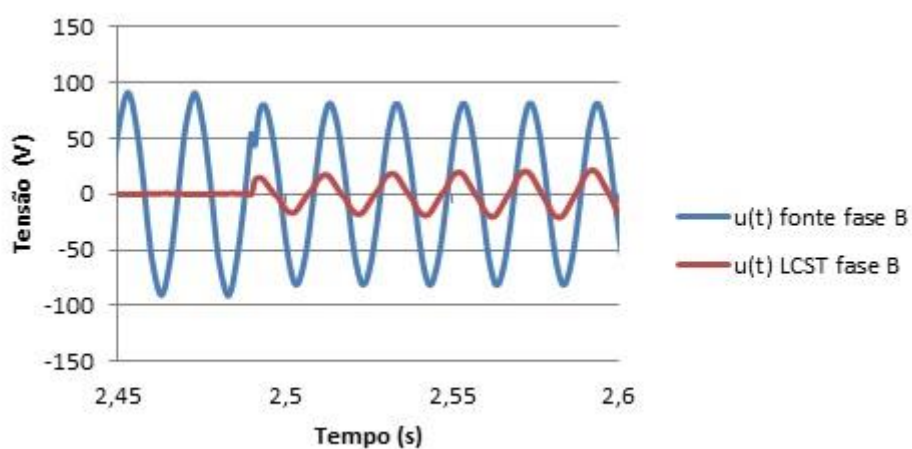


Figura 5.98 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.

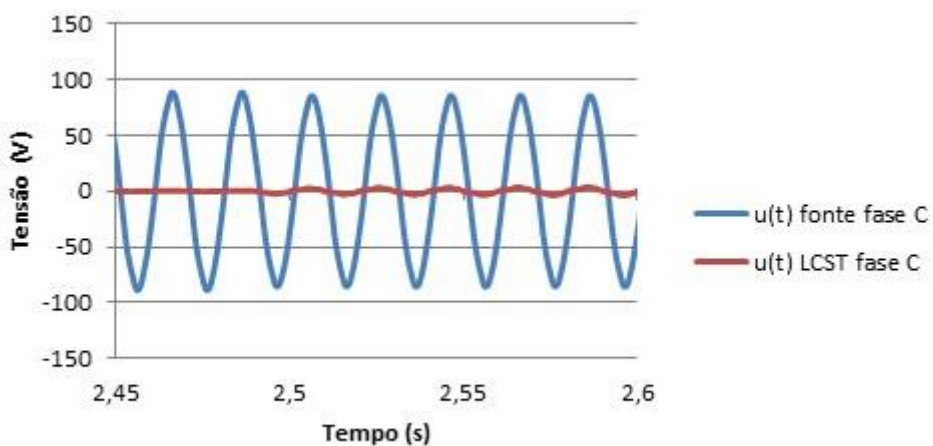


Figura 5.99 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.

Por fim, analise-se a Figura 5.100, Figura 5.101 e Figura 5.102. O ciclo de histerese da bobina na fase A aponta a um maior volume de ferro existente na circulação do fluxo ligado, em comparação com o ciclo de histerese da fase B. Quanto à fase C, esta não é atingida por nenhuma corrente de CC, verificando-se que o ciclo de histerese da respectiva bobina permanece praticamente inalterado ao longo do ensaio.

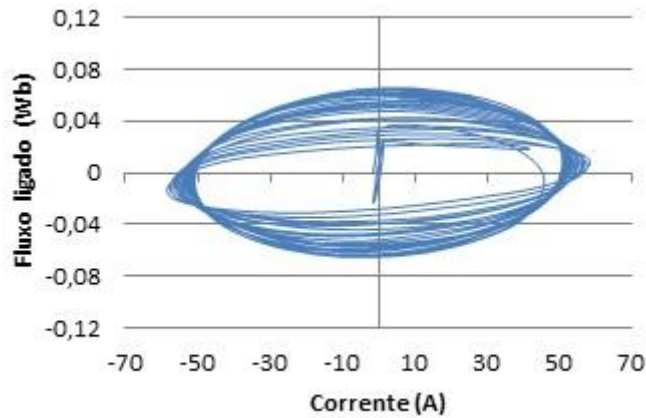


Figura 5.100 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase A com duas fitas supercondutoras no secundário.

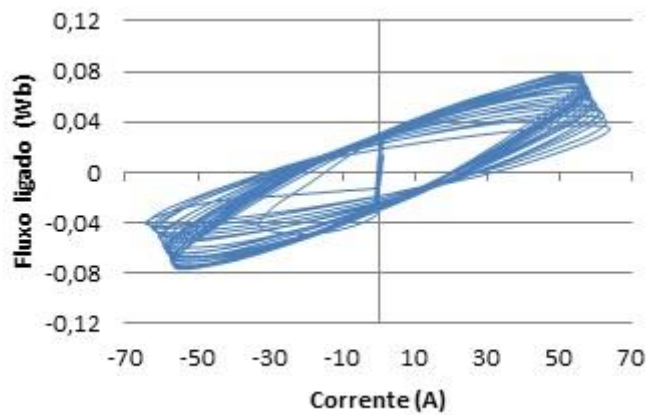


Figura 5.101 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase B com duas fitas supercondutoras no secundário.

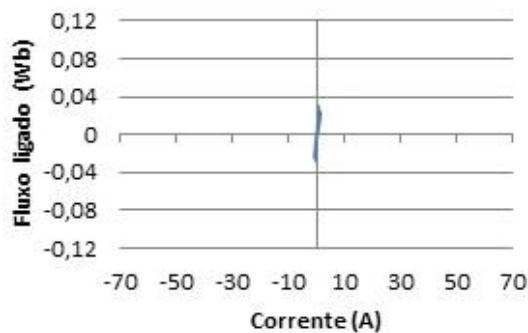


Figura 5.102 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase C com duas fitas supercondutoras no secundário.

### 5.2.4.3 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra: 3 Anéis de Fita Supercondutora no Secundário

Por último, e tendo em conta o apurado nos ensaios com uma e duas espiras SAT, confirma-se o aumento da corrente de CC nas fases defeituosas, devido à adição de uma terceira espira SAT no secundário das fases do limitador. Verifica-se no primeiro pico uma corrente máxima de linha de 61 A na fase A e 67 A na fase B, sendo que as correntes diminuem posteriormente para uma amplitude constante de 60 A e 65 A, respectivamente. Com estes dados, resulta uma limitação de 29% na fase A e 23% na fase B. Na fase C, a corrente de falha é igual à verificada nas três fases antes de se efectuar o defeito bifásico-terra, ou seja, 1,3 A. Na Figura 5.103 é possível analisar o mencionado.

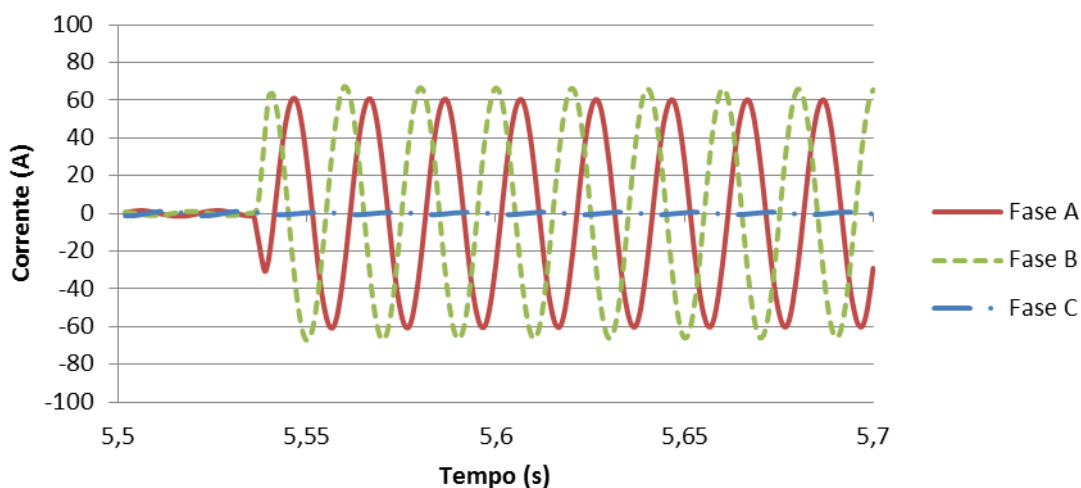


Figura 5.103 - CC fase-fase-terra: corrente em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.

Relativamente ao fluxo ligado, pela Figura 5.104 verifica-se que com três espiras SAT, o fluxo antes e após do defeito é praticamente o mesmo. Assim, confirma-se a forte oposição à circulação deste no núcleo de ferro quando sucede a transição das espiras do estado supercondutor para o estado normal. De notar, que na fase A ocorre uma ligeira diminuição do fluxo para 20 mWb de amplitude.

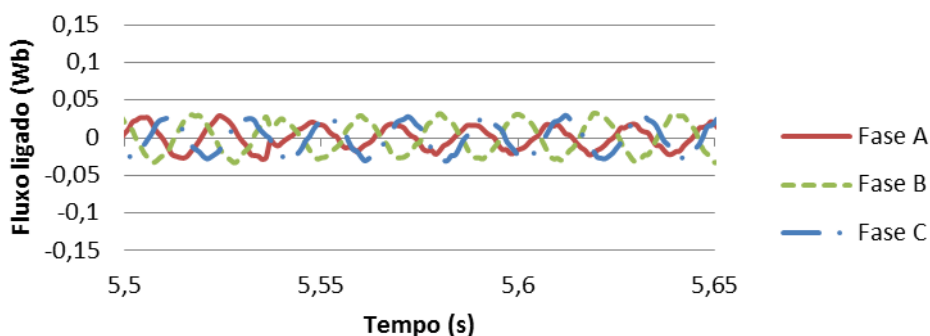


Figura 5.104 - CC fase-fase-terra: fluxo magnético em função do tempo com três fitas supercondutoras no secundário.

Em operação normal, atesta-se que o LCST apresenta-se como um elemento invisível no circuito, na medida em que uma vez mais, a queda de tensão aos terminais do limitador é no máximo 1% dos 90 V da tensão na fonte. Quando se promove o CC, e de acordo com os resultados prévios, a adição de um terceiro enrolamento de material supercondutor diminui a percentagem de queda de tensão aos terminais do LCST relativamente à queda de tensão da fonte. Regista-se uma tensão  $u$  de 11 V na fase A, 14 V na fase B e 2 V na fase C, que equivale respectivamente a 14,5%, 18% e 2,6% da tensão na fonte. Na Figura 5.105, Figura 5.106 e Figura 5.107, expõem-se os factos referidos.

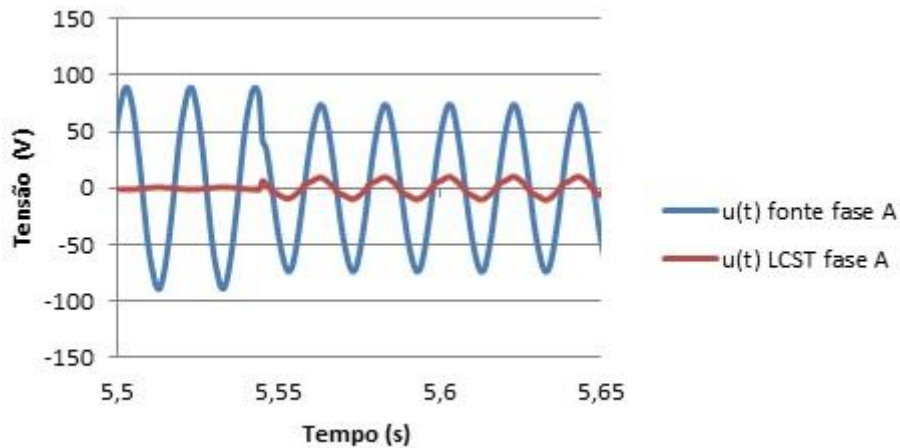


Figura 5.105 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.

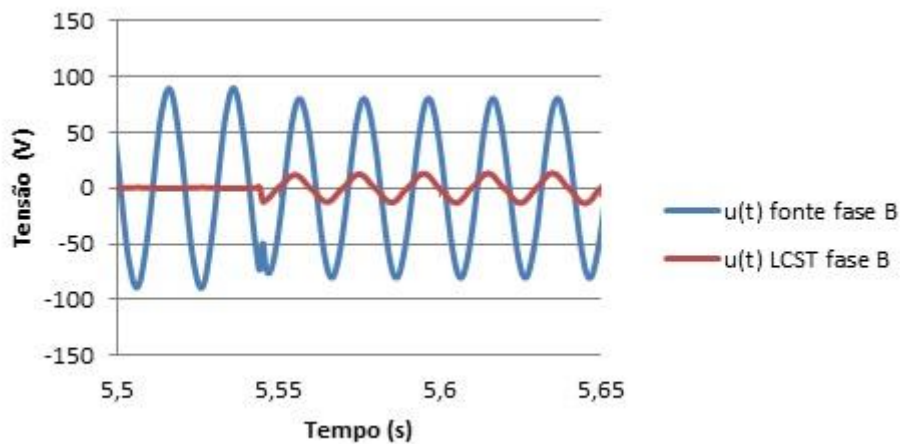
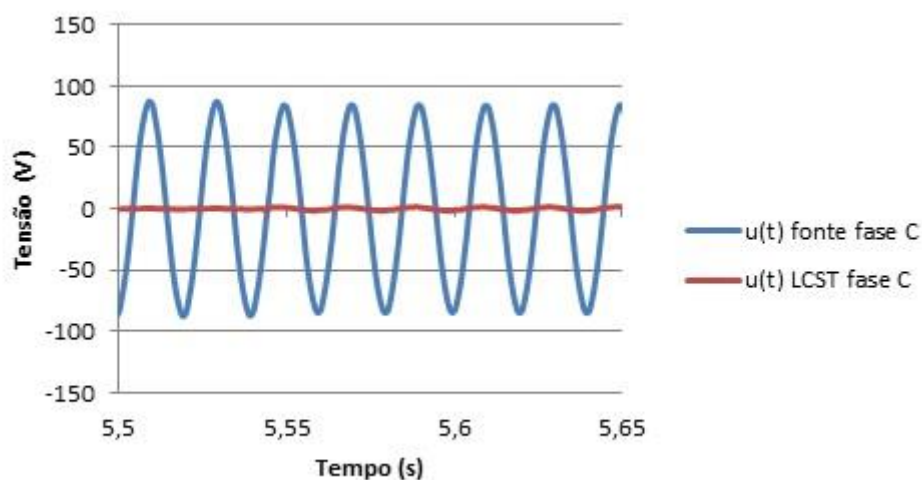
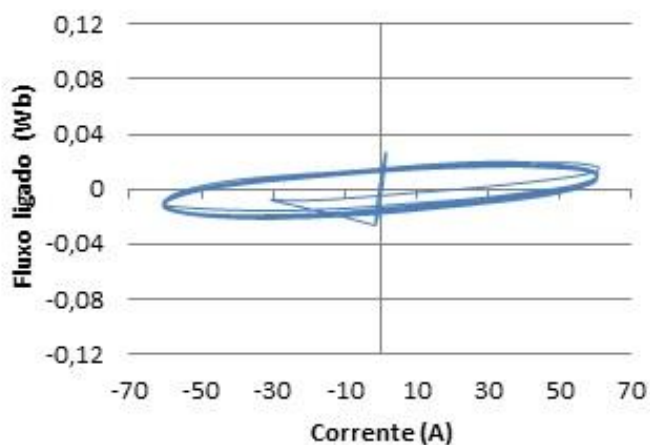


Figura 5.106 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.



**Figura 5.107 - CC fase-fase-terra: tensão em função do tempo na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.**

Na Figura 5.108, Figura 5.109 e Figura 5.110 exibe-se o ciclo de histerese da bobina em cada fase do LCST. Tal como mencionado antes acerca dos resultados deste ensaio, a variação do fluxo magnético antes e após o accionamento do CC é praticamente idêntica, sendo as diferenças dos ciclos de histerese das fases curto-circuitadas justificadas pela assimetria do núcleo e diferentes perdas magnéticas que se originam nas respectivas fases. Na fase B regista-se valores mais elevados de fluxo ligado e corrente máxima de linha.



**Figura 5.108 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase A com três fitas supercondutoras no secundário.**

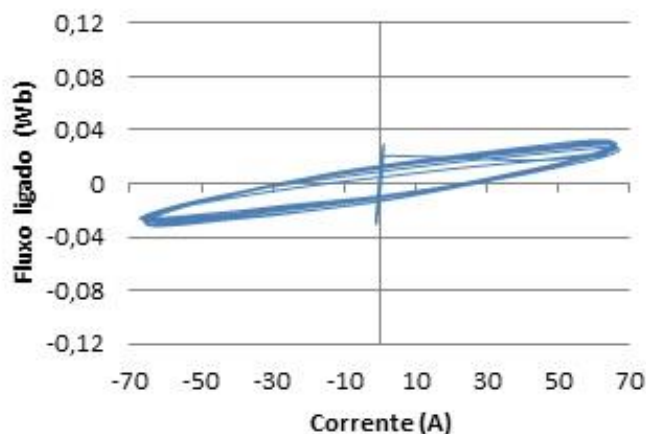


Figura 5.109 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase B com três fitas supercondutoras no secundário.

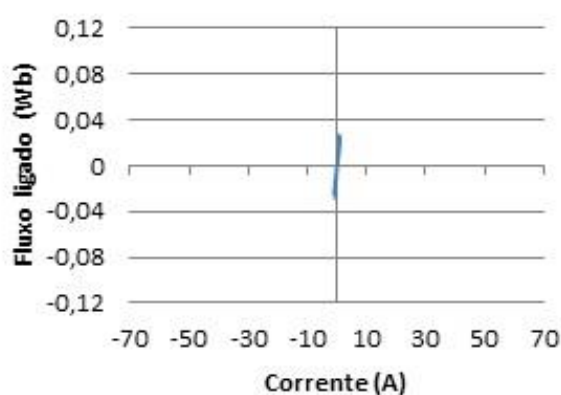


Figura 5.110 - CC fase-fase-terra: histerese da bobina na fase C com três fitas supercondutoras no secundário.

### 5.3 Resumo dos Resultados Experimentais

Neste subcapítulo expõe-se o resumo de todos os resultados alcançados pelo LCST nos ensaios laboratoriais aos quais foi submetido.

Na Tabela 5.1, Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4, encontram-se tabelados os valores máximos de operação das diferentes grandezas (corrente, fluxo e tensão), registados para os ensaios realizados, respectivamente no ponto 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 e 5.2.4 deste documento.

De referir que nas seguintes tabelas, no “Regime em operação de falha”,  $i_{L1P}$  representa a corrente de linha no primeiro pico do sinal após o accionamento do CC, e  $i_L$  corresponde à corrente de linha máxima eliminando o primeiro pico. Diferencia-se estes valores pelo facto de, como exposto previamente, os CC originados não serem activados automaticamente, e também para posteriores cálculos relativos à capacidade limitadora do LCST.

### CC Trifásico

Nº. de fitas SAT	Fase	Regime em operação normal				Regime em operação de falha					
		$i_L$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]	$i_{L1P}$ [A]	$i_L$ [A]	$i_P$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]
1	A	1,5	27,0	0,8	91,0	51,0	49,0	83,0	100,0	35,0	80,0
	B	1,5	29,0	0,5	91,0	51,0	50,0	83,0	102,0	35,0	81,0
	C	1,5	25,0	0,5	90,0	51,0	49,0	83,0	100,0	35,0	79,0
2	A	1,2	26,0	0,9	91,0	58,0	50,0	83,0	81,0	30,0	79,0
	B	1,2	28,0	0,5	92,0	59,0	50,0	83,0	81,0	30,0	80,0
	C	1,2	25,0	0,5	91,0	58,0	50,0	83,0	81,0	30,0	79,0
3	A	1,3	28,0	0,9	90,0	61,0	60,0	83,0	49,0	19,0	78,0
	B	1,3	30,0	0,5	90,0	62,0	60,0	83,0	46,0	19,0	77,0
	C	1,3	27,7	0,5	90,0	61,0	60,0	83,0	44,0	19,0	77,0

Tabela 5.1 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha trifásica.

### CC Fase-Fase

Nº. de fitas SAT	Fase	Regime em operação normal				Regime em operação de falha					
		$i_L$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]	$i_{L1P}$ [A]	$i_L$ [A]	$i_P$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]
1	A	1,3	28,0	0,9	90,0	1,3	1,3	1,3	28,0	0,54	90,0
	B	1,3	32,0	0,5	90,0	40,0	39,0	71,0	80,0	36,0	78,0
	C	1,3	30,0	0,5	89,0	41,0	38,0	71,0	97,0	37,0	83,0
2	A	1,3	28,0	0,9	90,0	1,3	1,3	1,3	28,0	0,76	90,0
	B	1,3	29,0	0,5	91,0	52,0	48,0	71,0	54,0	23,0	76,0
	C	1,3	26,0	0,5	89,0	49,0	47,0	71,0	79,0	24,0	85,0
3	A	1,3	27,0	0,9	90,0	1,3	1,3	1,3	26,0	0,76	90,0
	B	1,3	31,0	0,5	91,0	54,0	52,0	71,0	15,0	12,0	73,0
	C	1,3	27,0	0,5	89,0	53,0	51,0	71,0	36,0	12,0	85,0

Tabela 5.2 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha fase-fase.

### CC Fase-Terra

Nº. de fitas SAT	Fase	Regime em operação normal				Regime em operação de falha					
		$i_L$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]	$i_{L1P}$ [A]	$i_L$ [A]	$i_P$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]
1	A	1,3	29,0	0,7	90,0	1,3	1,3	1,3	26,0	13,0	85,0
	B	1,3	32,0	0,5	91,0	60,0	52,0	84,0	79,0	31,0	81,0
	C	1,3	29,0	0,5	91,0	1,3	1,3	1,3	62,0	13,0	90,0
2	A	1,3	26,0	0,9	90,0	1,3	1,3	1,3	18,0	4,0	83,0
	B	1,3	29,0	0,5	91,0	65,0	64,0	84,0	30,0	14,0	80,0
	C	1,3	27,0	0,5	91,0	1,3	1,3	1,3	37,0	4,0	91,0
3	A	1,3	26,0	1,0	90,0	1,3	1,3	1,3	24,0	1,0	84,0
	B	1,3	30,0	0,5	91,0	67,0	65,0	84,0	21,0	10,0	78,0
	C	1,3	26,0	0,5	91,0	1,3	1,3	1,3	31,0	2,0	89,0

Tabela 5.3 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha fase-terra.

### CC Fase-Fase-Terra

Nº. de fitas SAT	Fase	Regime em operação normal				Regime em operação de falha					
		$i_L$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]	$i_{L1P}$ [A]	$i_L$ [A]	$i_P$ [A]	$\psi_{LCST}$ [mWb]	$u_{LCST}$ [V]	$u_{fonte}$ [V]
1	A	1,3	27,0	0,7	89,0	49,0	43,0	84,0	90,0	38,0	77,0
	B	1,3	31,0	0,5	90,0	58,0	58,0	84,0	91,0	38,0	77,0
	C	1,3	24,0	0,5	88,0	1,3	1,3	1,3	45,0	21,0	86,0
2	A	1,3	25,0	0,9	91,0	58,0	55,0	84,0	66,0	24,0	81,0
	B	1,3	28,0	0,5	92,0	64,0	60,0	84,0	78,0	28,0	81,0
	C	1,3	24,0	0,5	90,0	1,3	1,3	1,3	31,0	4,0	85,0
3	A	1,3	27,0	0,9	90,0	61,0	60,0	84,0	20,0	11,0	75,0
	B	1,3	29,0	0,5	91,0	68,0	65,0	84,0	32,0	14,0	80,0
	C	1,3	26,0	0,5	89,0	1,3	1,3	1,3	28,0	2,0	84,0

Tabela 5.4 – Valores máximos do ensaio do LCST com uma falha fase-fase-terra.

De seguida, e de acordo com os valores máximos citados na Tabela 5.1, Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4, exibe-se em função do número de anéis supercondutores, os resultados calculados da percentagem de corrente que é limitada em situações de falha e também da porção da queda de tensão aos terminais do LCST face à queda de tensão nos terminais da fonte. Para tal propósito, consideram-se as seguintes expressões:

$$\text{Tensão no LCST [\%]} = \frac{u_{LCST}}{u_{fonte}} \times 100 \quad (5.3)$$

$$\text{Corrente limitada [\%]} = 100 - \left(\frac{i_L}{i_P} \times 100\right) \quad (5.4)$$

<b>CC Trifásico</b>				
Nº. de fitas SAT	Fase	Regime em operação normal	Regime em operação de falha	
		Tensão no LCST [%]	Corrente Limitada [%]	Tensão no LCST [%]
<b>1</b>	<b>A</b>	0,9	41,0	44,0
	<b>B</b>	0,5	40,0	44,0
	<b>C</b>	0,6	41,0	44,0
<b>2</b>	<b>A</b>	1,0	39,0	39,0
	<b>B</b>	0,5	39,0	38,0
	<b>C</b>	0,6	39,0	39,0
<b>3</b>	<b>A</b>	1,0	28,0	24,0
	<b>B</b>	0,6	28,0	24,0
	<b>C</b>	0,6	27,0	25,0

**Tabela 5.5 – Limitação do LCST numa falha trifásica em termos percentuais.**

Pela análise da Tabela 5.5, verifica-se que para CC trifásicos, o LCST dispõe de capacidade de limitar em igual proporção as correntes de falha nas três fases, seja composto por um, dois ou três anéis de material supercondutor no secundário. Este poder de limitação é maior quando o secundário é formado por uma espira SAT, atingindo-se 40% de limitação. Em regime de operação normal, o dispositivo comporta-se como um elemento invisível no circuito, na medida em que a tensão aos terminais do mesmo é praticamente nula nas três fases. Em momentos de falha, o limitador ostenta maior queda de tensão aos seus terminais quando composto também por uma espira SAT, nomeadamente 44% da tensão fornecida pela fonte.

<b>CC Fase-Fase</b>				
<b>Nº. de fitas SAT</b>	<b>Fase</b>	<b>Regime em operação normal</b>	<b>Regime em operação de falha</b>	
		<b>Tensão no LCST [%]</b>	<b>Corrente Limitada [%]</b>	<b>Tensão no LCST [%]</b>
<b>1</b>	<b>A</b>	1,0	0,0	0,6
	<b>B</b>	0,6	46,0	46,0
	<b>C</b>	0,6	47,0	44,0
<b>2</b>	<b>A</b>	1,0	0,0	0,8
	<b>B</b>	0,5	32,0	31,0
	<b>C</b>	0,6	34,0	28,0
<b>3</b>	<b>A</b>	1,0	0,0	0,8
	<b>B</b>	0,6	27,0	16,0
	<b>C</b>	0,6	28,0	14,0

**Tabela 5.6 – Limitação do LCST numa falha fase-fase em termos percentuais.**

Relativamente ao CC fase-fase, o LCST apresenta também capacidade de limitação. A fase que não é afectada pela falha mantém os mesmos níveis de tensão e corrente durante o período de ensaio. Por outro lado, nas fases em que se efectua o CC, a fracção de corrente que é limitada é praticamente igual em ambas as fases, sendo o seu valor máximo de 47% quando o secundário é constituído por uma espira SAT. Pelos valores de percentagem de tensão no LCST em funcionamento normal, deduz-se que o dispositivo não influencia a queda de tensão na fonte, i.e., é transparente ao funcionamento do circuito. Aquando de um CC, a percentagem de queda aos terminais do limitador em relação à queda de tensão da fonte vale no máximo 46%, quando constituído também por um único anel supercondutor em cada fase do secundário.

<b>CC Fase-Terra</b>				
<b>Nº. de fitas SAT</b>	<b>Fase</b>	<b>Regime em operação normal</b>	<b>Regime em operação de falha</b>	
		<b>Tensão no LCST [%]</b>	<b>Corrente Limitada [%]</b>	<b>Tensão no LCST [%]</b>
<b>1</b>	<b>A</b>	0,8	0,0	15,0
	<b>B</b>	0,6	38,0	38,0
	<b>C</b>	0,5	0,0	15,0
<b>2</b>	<b>A</b>	1,0	0,0	5,0
	<b>B</b>	0,5	24,0	16,9
	<b>C</b>	0,6	0,0	5,0
<b>3</b>	<b>A</b>	1,1	0,0	1,0
	<b>B</b>	0,6	22,0	13,0
	<b>C</b>	0,6	0,0	2,0

**Tabela 5.7 – Limitação do LCST numa falha fase-terra em termos percentuais.**

Em situações de falha fase-terra, observa-se que, na fase em que se causa o CC, o limitador também é competente a limitar a corrente e em relação à queda de tensão aos terminais da fase defeituosa, sendo estes valores mais elevados quando se verifica a existência de uma única espira SAT por fase, surgindo nestas condições uma limitação de 38% da corrente presumida e 38% de queda de tensão que ocorre aos terminais da fase defeituosa LCST relativamente à queda de tensão fornecida pela fonte. De salientar que no período pré-defeito, certifica-se uma vez mais que o dispositivo é transparente à rede pois os valores de queda de tensão aos seus terminais são desprezáveis.

<b>CC Fase-Fase-Terra</b>				
<b>Nº. de fitas SAT</b>	<b>Fase</b>	<b>Regime em operação normal</b>	<b>Regime em operação de falha</b>	
		<b>Tensão no LCST [%]</b>	<b>Corrente Limitada [%]</b>	<b>Tensão no LCST [%]</b>
<b>1</b>	<b>A</b>	0,9	49,0	49,0
	<b>B</b>	0,6	31,0	50,0
	<b>C</b>	0,6	0,0	24,0
<b>2</b>	<b>A</b>	1,0	35,0	29,0
	<b>B</b>	0,5	29,0	34,0
	<b>C</b>	0,6	0,0	5,0
<b>3</b>	<b>A</b>	1,0	29,0	15,0
	<b>B</b>	0,6	23,0	18,0
	<b>C</b>	0,6	0,0	3,0

**Tabela 5.8 – Limitação do LCST numa falha fase-fase-terra em termos percentuais.**

Por último, pela Tabela 5.8, infere-se novamente que o LCST apresenta índices mais elevados de limitação e maior queda de tensão aos terminais do limitador, comparativamente à tensão na fonte, quando o seu secundário é composto por um anel supercondutor. Nesta situação, as correntes presumidas das fases curto-circuitadas são limitadas no máximo em 49% e a queda de tensão aos terminais do limitador atingem cerca de 50% do valor da tensão na fonte. De notar pela Tabela 5.4, que quando o CC é activado, a amplitude da corrente de CC da fase central é um pouco superior à da fase A, pressupondo a presença de desequilíbrios no sistema devido aos diversos elementos que constituem o circuito de ensaio. Antes de ser activado o CC, o dispositivo é igualmente transparente ao funcionamento do circuito.

## **5.4 Síntese**

Neste capítulo realizou-se primeiramente a descrição dos elementos presentes no circuito trifásico sujeito aos ensaios pretendidos, e também das particularidades das condições comuns em todos os ensaios efectuados.

Numa primeira fase, procedeu-se à análise dos quatro distintos CC possíveis de ocorrerem nas redes trifásicas, executados sem o recurso do LCST, de modo a se registar as correntes geradas. Com esta acção, pretendeu-se registar as correntes originadas pelas falhas, tendo em conta as impedâncias da rede, ou seja, as correntes presumidas.

Posteriormente executaram-se os mesmos tipos de CC aplicados na primeira fase dos ensaios práticos, mas com a presença do LCST. Para cada fase do limitador, avalia-se as características temporais da corrente, fluxo e tensão, e também dos ciclos de histerese das bobinas, procedendo à descrição dos resultados. Cada tipo de CC foi realizado com a variação do número de espiras SAT no secundário do limitador.

Por último, apresenta-se resumidamente, os valores das grandezas respeitantes a todos os ensaios realizados. Com base nestes valores, e de acordo com as correntes presumidas registadas, avalia-se o desempenho e competência do protótipo construído, em termos percentuais de limitação de corrente e da queda de tensão aos seus terminais em relação à tensão da fonte.



## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Esta dissertação propôs a construção e ensaio de um protótipo de limitador de corrente supercondutor trifásico do tipo indutivo de blindagem magnética, com o secundário composto por fita SAT Bi-2223. O seu desenvolvimento permitiu atingir os objectivos inicialmente pretendidos e, os resultados obtidos, realizados mais do que uma vez de modo a garantir a veracidade e unanimidade de cada ensaio, e embora ensaiados à escala laboratorial, são importantes numa perspectiva de trabalhos futuros com este tipo de dispositivo e arquitectura.

Com o intuito de analisar o efeito de diferentes falhas, simétricas e assimétricas, num circuito implementado em laboratório, e protegido pelo limitador trifásico de tipologia indutiva edificado, provocaram-se os CC possíveis de ocorrerem em redes trifásicas.

Inicialmente provocaram-se os defeitos no circuito sem a presença do LCST, de forma a conhecer os valores das correntes presumidas em situação de CC, i.e., considerando a impedância da rede e sem a ocorrência de limitação por parte do protótipo construído. Os ensaios que permitiram adquirir os valores destas correntes, que servem posteriormente para efeitos de avaliação do protótipo, foram realizados durante períodos de tempo bastante reduzidos, onde não resultaram danos aos equipamentos presentes no circuito. De seguida, e já na presença do LCST, voltaram-se a provocar os mesmos tipos de CC. Em todos os ensaios foram analisadas as correntes, fluxos e tensões. Os resultados permitiram retirar conclusões no que concerne ao desempenho do protótipo, em função do número de espiras SAT que compõem o seu secundário. Para cada fase analisaram-se os efeitos das falhas, que afectam uma ou múltiplas fases do circuito, em termos de limitação de corrente, blindagem magnética e queda de tensão aos seus terminais.

Em todos os tipos de CC ensaiados, e em termos de corrente, verificou-se que apenas as fases defeituosas sofrem do aumento abrupto de corrente, não ocorrendo influência das mesmas nas fases não afectadas. Por outro lado, em termos de fluxo magnético ligado com o primário, os resultados indicam que, em alguns casos, as fases “saudáveis”<sup>30</sup> são susceptíveis de sofrerem alterações devido aos efeitos dos fluxos magnéticos ligados com o primário nas fases afectadas pelo defeito.

Na falha simétrica ensaiada, ou seja, trifásica, verificou-se um comportamento idêntico das características das correntes, fluxos e tensões nas diferentes fases, o que possibilita inferir que o poder de limitação face a correntes de CC é idêntico em todas as fases, sucedendo o mesmo em termos de blindagem magnética.

Por outro lado, nos defeitos assimétricos, confirmou-se a existência de efeitos nas fases não curto-circuitadas devido aumento abrupto das correntes nas fases defeituosas, especialmente nos fase-terra e fase-fase-terra.

No âmbito geral, os resultados alcançados são satisfatórios, na medida em que se comprovam as características para os quais o protótipo foi implementado, ou seja, impedância desprezável no circuito por via da sua invisibilidade em regime de operação normal, e adição

---

<sup>30</sup> Fases não envolvidas no curto-circuito.

instantânea de impedância após a detecção da falha que se reflecte na limitação das correntes presumidas. Verificou-se limitação máxima da corrente presumida de 41% (falha trifásica), 46% (falha fase-fase), 39% (fase-terra) e 50% (falha bifásica-terra). Em todas estas situações, o secundário do limitador encontrava-se formado por uma espira SAT.

Relativamente ao fenómeno da blindagem magnética, e contrariamente ao esperado e de acordo com os níveis de tensão/corrente utilizados nos ensaios, inferiu-se que esta é proporcional ao aumento do número de espiras SAT, pois em situações de falha, a oposição à circulação do fluxo no núcleo incrementou à medida que se adicionou espiras SAT em cada fase do limitador. Esta relação de proporcionalidade entre a circulação de fluxo e número de espiras SAT, que implica uma menor variação de fluxo no núcleo, justifica o menor poder de limitação de corrente de CC quando se adiciona enrolamentos supercondutores no secundário. Portanto, de acordo com as especificações dos níveis de tensão/corrente ensaiadas, conclui-se um melhor desempenho do limitador quando cada fase é formada por uma espira SAT. Em suma, os poderes de limitação do protótipo dependem do tipo de falha aplicada, devido aos diferentes tipos de circuitos eléctricos e magnéticos que se estabelecem. O seu desempenho é satisfatório, contribuindo para o incentivo de construção e desenvolvimentos de dispositivos desta tipologia formados com material supercondutor.

Os ensaios iniciais foram realizados com tensões superiores aos 90 V, nomeadamente 120 V. Porém, para estes valores, verificou-se um aquecimento excessivo em alguns anéis SAT, que se traduziu na destruição do isolamento dos anéis em questão, e noutros casos mais graves, ocorreu a destruição da zona de soldadura da fita supercondutora, devido aos efeitos térmicos e/ou esforços electrodinâmicos. De modo a evitar estas ocorrências, os ensaios foram realizados aos 90 V de tensão máximo.

Após a análise dos ensaios realizados, é notório a heterogeneidade no circuito implementado, que pode ser justificada pelos elementos que compõem o mesmo, como os desequilíbrios nas tensões da rede, das impedâncias das resistências de amostragem, ou do limitador; e também pela assimetria do núcleo, que se reflecte nas diferentes perdas magnéticas totais em cada fase, e influência no desequilíbrio da circulação do fluxo magnético no limitador e respectivas características dos ciclos de histerese.

Assim, numa perspectiva de futuros trabalhos, sugere-se o projecto e ensaio das falhas efectuadas com recurso a um LCST com núcleo ferromagnético do tipo *shell*, ao invés do LCST construído nesta dissertação, que tem enrolamentos em todas as colunas. Com esta medida poderá ser possível eliminar os diferentes possíveis percursos de fluxo magnético que se estabelecem no núcleo, originados pelos distintos tipos de falha.

Considera-se também o processo de medição das correntes induzidas nos anéis SAT de extrema importância, com recurso por exemplo a sondas de Rogowski, de modo a detectar, pelo menos, possíveis destruições do material e possibilitando a redefinição do sistema, proporcionando uma maior robustez. Desta forma será possível ensaiar o limitador em níveis superiores de tensão e corrente. Do ponto de vista de uma melhor optimização do protótipo, será importante ensaiar, em situações de falha idênticas às realizadas, o limitador com recurso

a fita supercondutora de 2G, cujo desempenho é consideravelmente superior ao da fita supercondutora de 1G, analisando as diferenças em termos de poder de limitação. Sugere-se também o ensaio de situações de defeito em intervalos de tempo reduzidos de modo a averiguar o tempo de recuperação do dispositivo protector, ou seja, quanto tempo necessita para se encontrar novamente em condições de limitar as correntes de CC e, realizar também ensaios com outros níveis de carga e assim verificar diferenças no comportamento adoptado pelo limitador.

Por último, atendendo ao exposto sobre futuros procedimentos, e considerando a metodologia evidenciada na referência (Pina, 2010), que aborda com sucesso a simulação de LCS monofásicos do tipo indutivo através da construção do ciclo de histerese do dispositivo, será importante contribuir para o desenvolvimento da metodologia quando simulada com limitadores trifásicos, pois estes são os que têm interesse em aplicações de energia. Este estudo possibilitará previsões fundamentais para o desempenho dinâmico do dispositivo quando instalado em redes eléctricas.



## Referências Bibliográficas

- Aly, M., & Mohamed, E. (27-29 de November de 2012). Comparison between resistive and inductive superconducting fault current limiters for fault current limiting. *Computer Engineering & Systems (ICCES), 2012 Seventh International Conference*, pp. pp.227,232.
- Arsênio, P. (2012). *Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223*.
- Bauml, K., & Kaltenborn, U. (2011). Inductive Shielded Superconducting Fault Current Limiter - A New Cost Effective Solution for Industrial Network Applications. Germany: Schneider Electric Energy.
- Cai, Y., Okuda, S., Odake, T., Yagai, T., Tsuda, M., & Hamajima, T. (2010 de June de 2010). Study on Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions*, pp. pp.1127,1130.
- Cvoric, D., De Haan, S. W., Ferreira, J., Van Riet, M., & Bozelie, J. (10-13 de Oct de 2010). Design and testing of full-scale 10 kV prototype of inductive fault current limiter with a common core and trifilar windings. *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference*, pp. pp.1879,1884.
- Delgado, M. (2011). *Protecção das Redes Eléctricas de Distribuição, Transporte e Interligação*. Publindústria.
- Hewitson, L. G., Brown, M., & Balakrishnan, R. (2004). *Practical Power Systems Protection*. Elsevier.
- Hobl, A., Goldacker, W., Dutoit, B., Martini, L., Petermann, A., & Tixador, P. (June de 2013). Design and Production of the ECCOFLOW Resistive Fault Current Limiter. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions*, pp. pp.5601804,5601804.
- Janowski, T., Stryczewska, H., Kozak, S., Kondratowicz-Kucewicz, B., Wojttasiewicz, G., Kozak, J., . . . Malinowski, H. (June de 2004). Bi-2223 and Bi-2212 tubes for small fault current limiters. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions*, pp. pp.851,854.
- Jian-ping, Z., Ying-ping, Z., & Zhi-ping, W. (6-9 de April de 2008). Detection of the transmission line short-circuited fault based on lifting wavelet. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference*, pp. pp.1663,1666.
- Kalsi, S. (2011). *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Klein, H. (2010). CC Based FCL's. Progress in Performance and Prototyping. *Braunschweiger Supraleiterseminar*.
- Klein, H.; Energy, B.; Technologies, S. (9-11 de May de 2012). <http://www.superconductivityiea.org/>. Obtido de SuperConductivity International Energy Agency:  
[http://www.superconductivityiea.org/document/Klein%20%20Bruker\\_SchneiderElectric%20iSFCL.pdf](http://www.superconductivityiea.org/document/Klein%20%20Bruker_SchneiderElectric%20iSFCL.pdf)

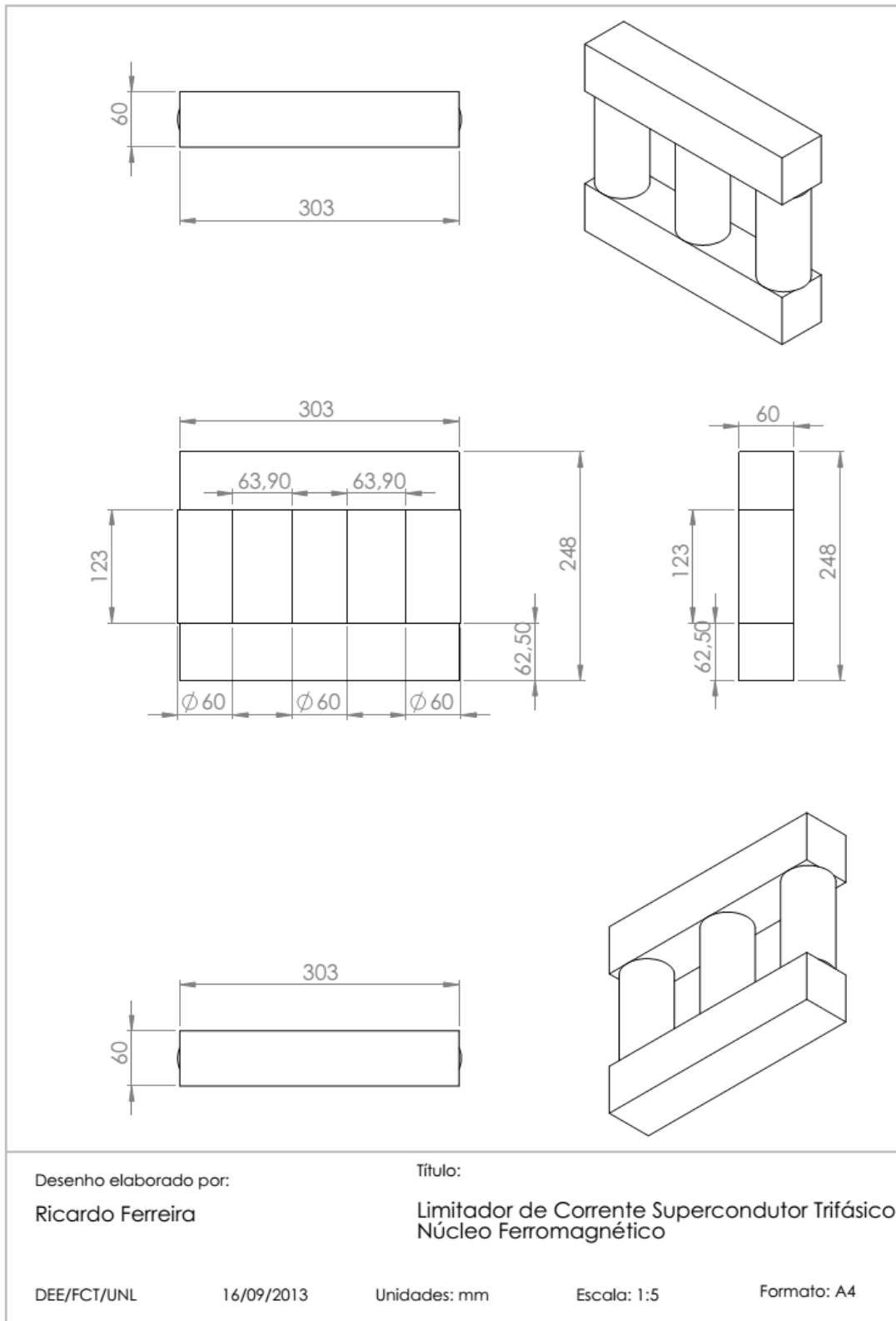
- Kovalsky, L., Yuan, X., Tekletsadik, K., Keri, A., Bock, J., & Breuer, F. (2005). Applications of superconducting fault current limiters in electric power transmission systems. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol.15, no.2, pp.2130,2133.
- Kozak, J., & Janowski, T. (2003). Applications of HTS Fault Current Limiters in Power Network.
- Kozak, J., Majka, M., Kozak, S., & Janowski, T. (June de 2012). Design and Tests of Coreless Inductive Superconducting Fault Current Limiter. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol.22, no.3, pp. pp.5601804,5601804.
- Lamas, J. (2009). *Projeto e Construção de Limitador de Corrente Supercondutor Utilizando Fitas de YBCO*. M. Sc. Thesis. Universidade de São Paulo. .
- Majoroš, M., Janšak, L., Sello, S., & Zannella, S. (1997). Transient Analysis of Inductive Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7, 2, pp. 989-992.
- Metz-Noblat, B. d., Dumas, F., & Poulain, C. (2005). *Calculation of short-circuit currents*. Cahiers Techniques.
- Mitolo, M., Sutherland, P., & Natarajan, R. (2006). Effects of High Fault Currents on Ground Grid Design. *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting*, (pp. pp.1808,1815).
- Noe, M., Hobl, A., Tixador, P., Martini, L., & Dutoit, B. (June de 2012). Conceptual Design of a 24 kV, 1 kA Resistive Superconducting Fault Current Limiter. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions*, pp. pp.5600304,5600304.
- Paiva, J. (2011). *Redes de Energia Eléctrica - Uma análise sistémica*. Lisboa: IST Press.
- Paul, W., Lakner, M., Rhyner, J., Unternahrer, P., Baumann, T., Chen, M., . . . Guérig, A. (1997). Test of 1.2 MVA high-T<sub>c</sub> superconducting fault current limiter. *Supercond. Sci. Technol.* 10, 914-918.
- Pina, J. M. (2010). *Desenho e Modelização de Sistemas de Energia Empregando Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Ph. D. Thesis. Universidade Nova de Lisboa.
- Pronto, A. (2011). *Análise de Perdas em Sistemas de Energia que Empregam Materiais Supercondutores de Alta Temperatura*. Ph. D. Thesis. Universidade Nova de Lisboa.
- Rahman, M., Lie, T., & Prasad, K. (27-29 de Oct. de 2010). Three-phase modeling of HTS transformer in distribution networks. *IPEC 2012 Conference Proceedings*, pp. pp.72,77.
- Samah, N., & Abdullah, W. (23-24 de June de 2010). Application of superconducting fault current limiter in power system. *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010 4th International*, pp. pp.325,330.
- Schaffer, J. (2000). Tiggered Current Limiters for Crossing Bus Ties Bypassing Reactors and Improving Power Quality. *System Protection Divisiona, G&W Electric Company*.
- Schmitt, H. (2003). *Fault Current Limiters*. Report on the Activities of CIGRE WG A3.10, Siemens AG.
- Schmitt, H. (2006). Fault current limiters report on the activities of CIGRE WG A3.16. *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*.

- Schneider Electric, S. (s.d.). *Efeitos dos Curtos-Circuitos - Schneider Electric*. Obtido de Schneider Electric - Especialista global em gestão de energia: [http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2\\_efeitos.pdf](http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2_efeitos.pdf)
- Shirai, Y., Noda, S., Yamabe, K., Hattori, K., Baba, J., Nishihara, T., . . . Sato, K. (June de 2013). Current Limiting Performance of Three-Phase Concentric Transformer Type SFCL at Unbalanced Fault Conditions. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol.23, no.3, pp. pp.5601905,5601905.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Chubraeva, L., & Vajda, I. (2010). An improved design of an inductive fault current limiter based on a superconducting cylinder. *Superconductor Science and Technology*. IOP Publishing.
- Sokolovsky, V., Meerovich, V., Vajda, I., & Beilin, V. (September de 2004). Superconducting FCL: design and application. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol. 14, no.3, pp. pp.1990,2000.
- Stemmler, M., Neumann, C., Merschel, F., Schwing, U., Weck, K.-H., Noe, M., . . . Elschner, S. (June de 2007). Analysis of Unsymmetrical Faults in High Voltage Power Systems With Superconducting Fault Current Limiters. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol.17, no.2, pp. pp.2347,2350.
- Steurer, M., & Noe, M. (2007). High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications and development status. *Superconductor Science and Technology, Vol.20(3)*, R15-R29.
- Vilhena, N. (2012). *Construção e Ensaio de um Limitador de Corrente Supercondutor de Núcleos Saturados*.
- Xiaoqing, Z., & Li, M. (2008). Using the Fault Current Limiter With Spark Gap to Reduce Short-Circuit Currents. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.23, no.1, pp.506,507.
- Xin, Y., Gong, W., Niu, X., Cao, Z., Xi, H., Zhang, J., . . . Hou, B. (2006). Development of Superconducting Fault Current Limiters. *Power System Technology*, 22-26.
- Yazawa, T., Koyanagi, K., Takahashi, M., Ono, M., Sakai, M., Toba, K., . . . Shiohara, Y. (June de 2009). Design and Experimental Results of Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter Using Highly-Resistive YBCO Tapes. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol.19, no.3, pp. pp.1956,1959.

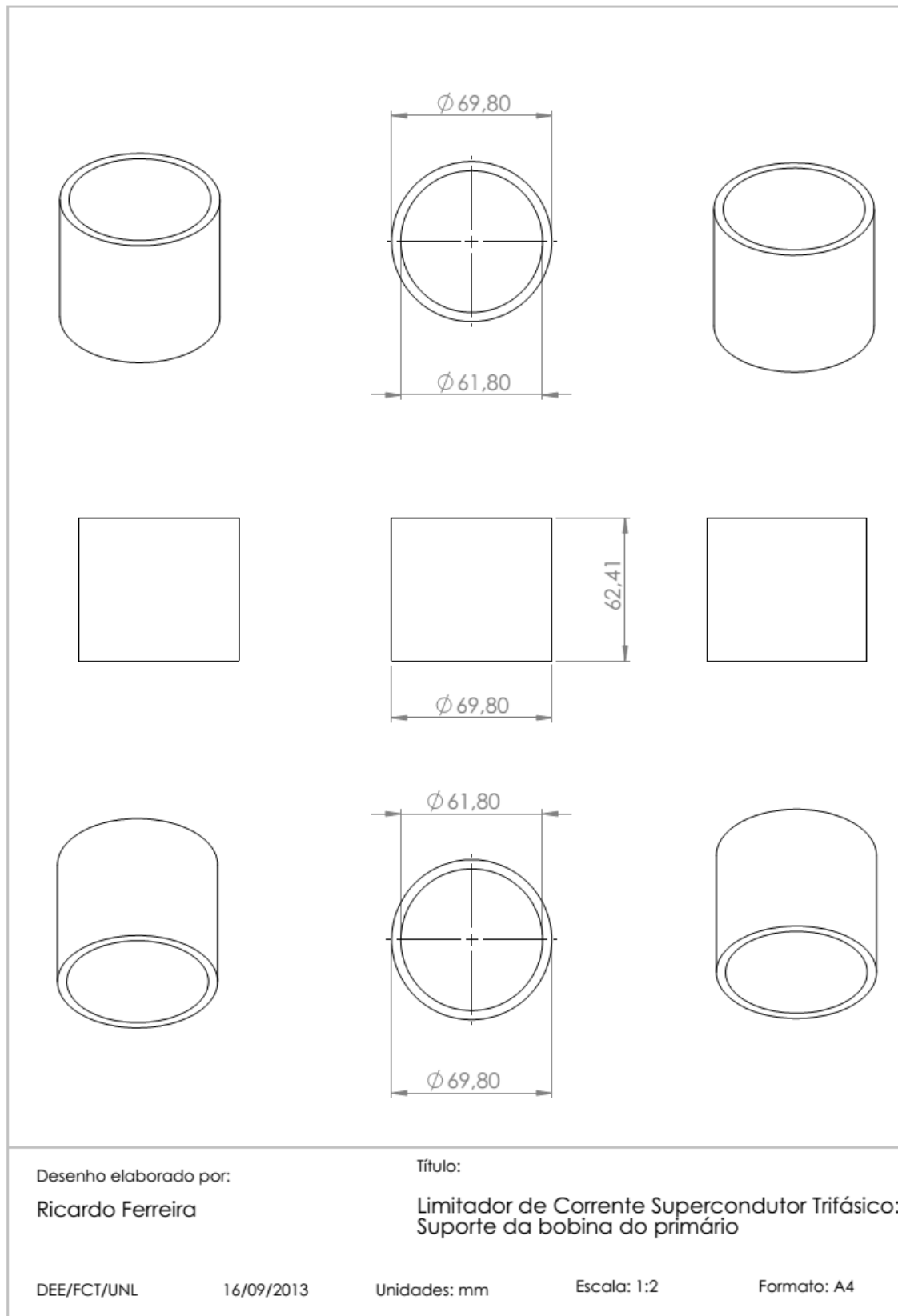


## Apêndices

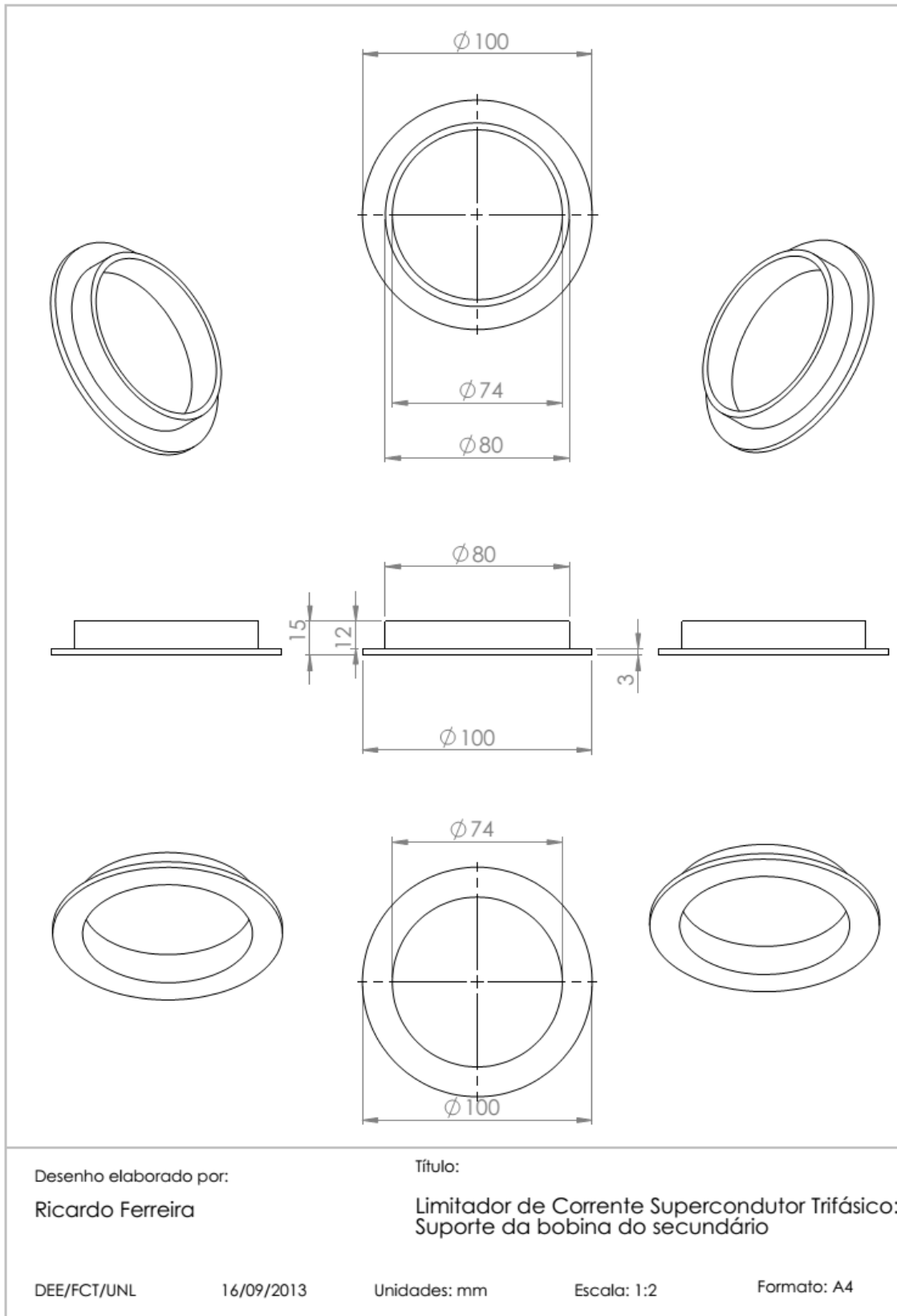
### 1. Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Núcleo Ferromagnético



## 2. Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Suporte da Bobina do Primário



### 3. Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Suporte da Bobina do Secundário



#### 4. Limitador de Corrente Supercondutor Trifásico: Implementação em banho criogénico

