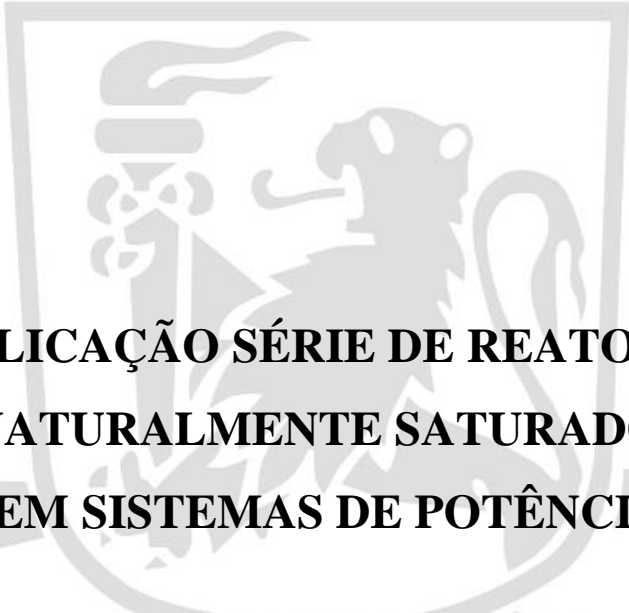


UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



FERNANDO EDIER FRANÇA FREITAS



**APLICAÇÃO SÉRIE DE REATORES
NATURALMENTE SATURADOS
EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**



VIRTUS IMPAVIDA

Recife, Fevereiro de 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

APLICAÇÃO SÉRIE DE REATORES
NATURALMENTE SATURADOS
EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

por

FERNANDO EDIER FRANÇA FREITAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, Ph.D.

Recife, Fevereiro de 2010.

© Fernando Edier França Freitas, 2010

F866a Freitas, Fernando Edier França

Aplicação série de reatores naturalmente saturados em sistemas de potência / Fernando Edier França Freitas. - Recife: O Autor, 2010. xx , 121 f., il : graf., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica. 2. Limitador de corrente de curto circuito . 3. Compensador série 4. Reator. I. Título.

UFPE

621.3

CDD (22. ed.)

BCTG/2010-045



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

FERNANDO EDIER FRANÇA FREITAS

TÍTULO

**“APLICAÇÃO SÉRIE DE REATORES NATURALMENTE
SATURADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA”**

A comissão examinadora composta pelos professores: MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, DEESP/UFPE, RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, DEESP/UFPE e LUIZ ANTONIO MAGNATA DA FONTE, DEESP/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **FERNANDO EDIER FRANÇA FREITAS APROVADO.**

Recife, 25 de fevereiro de 2010.

RAFAEL DUEIRE LINS
Coordenador do PPGEE

MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador e Membro Titular Externo

LUIZ ANTONIO MAGNATA DA FONTE
Membro Titular Externo

RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO
Membro Titular Interno

*Dedico este trabalho aos
verdadeiros responsáveis por
sua conclusão:*

DEUS, mantenedor da vida;

*Meu filho Luiz Fernando, razão
das minhas conquistas;*

*Minha esposa Andréa das
Neves, fonte de inspiração;*

*Meus pais Francisco Freitas e
Nizete França, meus guias.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por proporcionar-me a oportunidade de desenvolver este trabalho ao lado de pessoas competentes e desfrutar de suas amizades.

Aos meus pais, Francisco de Medeiros Freitas e Nizete França Freitas, abnegados em oferecer-me a melhor educação, carinho, conselhos e ensinamentos.

Ao meu filho, Luiz Fernando, e a minha esposa, Andréa das Neves, pela compreensão, incentivo e cumplicidade durante todos esses anos.

Ao professor Manoel Afonso, pela oportunidade concedida para desenvolver este e outros trabalhos sob sua orientação e pela paciência, confiança e compreensão.

Ao professor Luiz Antônio Magnata, pelo estímulo, ensinamentos, dedicação e colaboração, exercendo durante todo o processo de elaboração deste trabalho, funções de orientador.

Aos professores Ronaldo Aquino e Milde Maria, pelos conselhos e colaborações que enriqueceram este trabalho.

Aos componentes da banca examinadora, pelas sugestões e críticas que engrandece o trabalho.

A Valdete Oliveira e Andréa Tenório, pelas contribuições sempre importantes.

A Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), por proporcionar a infraestrutura laboratorial e material no âmbito do programa de P&D ANEEL, ajuda essencial no desenvolvimento deste trabalho.

A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, por prover informações necessárias no âmbito do programa de P&D ANEEL.

Aos demais colegas de curso e de trabalho, pelas colaborações inestimáveis.

Não podemos transferir conhecimentos de nossa mente para a de outrem como se fossem constituídos de matéria sólida, pois os pensamentos não são objetos que podem ser tocados, manuseados...

As idéias têm que ser pensadas na outra mente; as experiências, revividas pela outra pessoa.

(John Milton Gregory)

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

APLICAÇÃO SÉRIE DE REATORES NATURALMENTE SATURADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Fernando Edier França Freitas

Fevereiro/2010

Orientador: Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Palavras-chave: Limitador de Corrente de Curto Circuito, Compensador Série, Reator Naturalmente Saturado, Curto Circuito, Disjuntores Superados.

Número de Páginas: xx+121.

RESUMO: Esta dissertação trata de aspectos relacionados à aplicação série de *Reatores Naturalmente Saturados* (RNS) em sistemas de potência, com ênfase em *Limitadores de Corrente de Curto Circuito* (LCC), seus aspectos gerais e análise de desempenho. Inicialmente, uma análise do estado operativo dos dispositivos de manobras em funcionamento no sistema elétrico nacional é apresentada para destacar a relevância do tema para o setor elétrico. Segue-se uma síntese do estado da arte relacionada com os limitadores para mostrar o efetivo interesse da comunidade científica pelo assunto e para posicionar o presente trabalho no contexto mundial. Novas propostas para a utilização em série de RNS são então apresentadas. Arquiteturas com montagens e características inovadoras são descritas e aprofundadas, destacando-se as novidades introduzidas no modelo anteriormente desenvolvido pela GEC (*General Electric Company*), pioneira nos estudos a respeito deste dispositivo. Uma investigação laboratorial por meio de protótipos em tamanho reduzido de elementos de um sistema elétrico com a aplicação série de RNS funcionando como LCC é apresentada para certificar a eficiência dos arranjos ora propostos, apoiada por simulações no programa computacional EMTP-ATP (*Electro-Magnetic Transient Program - Alternative Transient Program*). Modelos matemáticos para o estudo de desempenho desses limitadores são estabelecidos e autenticados pelo confronto entre os registros obtidos em laboratório e as respostas fornecidas pelo EMTP-ATP.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

SERIES APPLICATION OF NATURALLY SATURATED REACTORS IN POWER SYSTEMS

Fernando Edier França Freitas

February /2009

Supervisor(s): Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Concentration Area: Energy Processing.

Keywords: Limiting Short-circuit Current, Series Compensator, Naturally Saturated Reactor, Short-circuit, Circuit Overcome.

Number of Pages: xx+121.

ABSTRACT: This dissertation deals with issues related to series application of naturally saturated reactors (RNS) in power systems, with emphasis on limiting short circuit current (LCC), its general aspects and performance analysis. Firstly, an analysis of the operating state of the switching devices operating in the national electrical system is presented to highlight the relevance of the theme for the electricity sector. Following, a summary of the state-of-the-art of limiting short circuit current is presented to show the effective interest of the scientific community in the subject and to position this work in a global context. New proposal of using RNS in series will then be presented. Architectures of innovative assemblies and characteristics are fully described, emphasizing the innovations introduced in the model developed previously by GEC (*General Electric Company*), a pioneer in studies of this device. Laboratory studies by means of reduced-size prototypes of elements used in an electrical system consisting of RNS in series, working as a LCC, are presented to certify the effectiveness of the arrangements being proposed, supported by simulations in the computer program EMTP-ATP (*Electro-Magnetic Transient Program - Alternative Transient Program*). Mathematical models for studying the performance of these limiters are established and authenticated by the confrontation between the records obtained in the laboratory and the answers provided by the EMTP-ATP.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
1 ASPECTOS GERAIS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	4
2 SITUAÇÃO DAS EMPRESAS DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 CRITÉRIOS E PROCEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO “ESTUDOS DE CURTO CIRCUITO”	6
2.3 LEVANTAMENTO DOS DISJUNTORES SUPERADOS EM OPERAÇÃO NO SIN	12
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
3 ESTADO DA ARTE	17
3.1 INTRODUÇÃO	17
3.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE UM LCC	17
3.3 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO	19
3.3.1 <i>Técnicas Passivas</i>	20
3.3.1.1 Medidas Topológicas.....	20
3.3.1.2 Aplicação de Equipamentos	22
3.3.2 <i>Técnicas Ativas</i>	23
3.3.2.1 Fusíveis Limitadores de Corrente de Curto Circuito	24
3.3.2.2 Dispositivos Pirotécnicos.....	25
3.3.2.3 Limitadores a Base de Supercondutores.....	26
3.3.2.4 Limitadores a Base de Elementos de Estado Sólido.....	32
3.3.2.5 Limitadores a Base de Materiais Magnéticos	39
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
4 ARQUITETURAS DE LCC COM BASE EM RNS	42
4.1 INTRODUÇÃO	42
4.2 FAMÍLIA DE ARQUITETURAS	45
4.3 ARQUITETURAS TIPO A	47
4.3.1 <i>Arquitetura Tipo A1</i>	48
4.3.2 <i>Arquitetura Tipo A2</i>	49
4.3.3 <i>Arquitetura Tipo A3</i>	51
4.4 ARQUITETURAS TIPO B	52
4.4.1 <i>Arquitetura Tipo B1</i>	53
4.4.2 <i>Arquitetura Tipo B2</i>	54
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56

5	MODELAGEM DO SISTEMA	58
5.1	INTRODUÇÃO	58
5.2	MODELAGEM DA FONTE DE TENSÃO	59
5.3	MODELAGEM DOS ELEMENTOS LINEARES DO LCC	60
5.4	MODELAGEM DO RNS	61
5.5	MODELAGEM DA CARGA E DA IMPEDÂNCIA DE CURTO	66
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO.....	68
6.1	INTRODUÇÃO	68
6.2	RESULTADOS DA CONFIGURAÇÃO A1	69
6.2.1	<i>Obtenção do Equivalente de Thévenin e Escolha dos Elementos que Representam a Carga e o Curto Circuito.....</i>	<i>70</i>
6.2.2	<i>Escolha dos Valores dos Componentes do LCC.....</i>	<i>74</i>
6.2.3	<i>Resultados Experimentais.....</i>	<i>76</i>
6.2.4	<i>Resultados de Simulação.....</i>	<i>80</i>
6.2.5	<i>Tempo de Resposta do LCC.....</i>	<i>82</i>
6.3	RESULTADOS DA CONFIGURAÇÃO B1	84
6.3.1	<i>Obtenção do Equivalente de Thévenin e Escolha dos Elementos que Representam a Carga e o Curto Circuito.....</i>	<i>85</i>
6.3.2	<i>Escolha dos Valores dos Componentes do LCC.....</i>	<i>85</i>
6.3.3	<i>Resultados Experimentais.....</i>	<i>86</i>
6.3.4	<i>Resultados de Simulação.....</i>	<i>88</i>
6.3.5	<i>Tempo de Resposta do LCC.....</i>	<i>90</i>
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
7	CONCLUSÃO.....	92
7.1	CONCLUSÕES GERAIS	92
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
8	APÊNDICES.....	95
8.1	APÊNDICE A.....	95
8.2	APÊNDICE B.....	101
9	ANEXOS	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Montagem inicialmente proposta para o limitador de corrente de curto circuito a base de reatores naturalmente saturados.	2
Figura 2.1 - Metodologia utilizada para elaboração do relatório "Estudos de Curto Circuito"[4].	7
Figura 2.2 - Circuito X/R simplificado.	9
Figura 2.3 - Corrente total de curto circuito com suas componentes AC e DC.	10
Figura 2.4 - Tempos relacionados à operação de um disjuntor.	11
Figura 3.1 - Separação de barras como medida para diminuir a corrente de curto circuito.	20
Figura 3.2 - (A) Acoplamento de barras; (B) Em serie com as entradas dos alimentadores; (C) Em serie com as saídas dos alimentadores.	22
Figura 3.3 - Fusível Limitador de Corrente de Curto.	24
Figura 3.4 - Dispositivo pirotécnico proposto pela ABB [10].	25
Figura 3.5 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, puramente resistivo.	27
Figura 3.6 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, ponte de diodos.	28
Figura 3.7 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, núcleo de ferro saturado.	29
Figura 3.8 - Arranjo físico do limitador com núcleo de ferro blindado [4].	30
Figura 3.9 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, núcleo de ferro blindado.	31
Figura 3.10 - Símbolo esquemático de Tiristores.	32
Figura 3.11 - Modelo clássico de um limitador de curto circuito a base de elementos de estado sólido.	33
Figura 3.12 - Ligação paralela de limitadores de curto circuito a base de elementos de estado sólido.	35
Figura 3.13 - Ligação série/paralela de limitadores de curto circuito a base de elementos de estado sólido.	36
Figura 3.14 - Esquema de ligação de um limitador de curto circuito a base de elementos de estado sólido que não apresenta o capacitor.	37
Figura 3.15 - Característica de Magnetização dos materiais utilizados nos limitadores magnéticos.	39
Figura 3.16 - Arquitetura básica de um limitador magnético.	40
Figura 3.17 - (A) Circuito magnético, (B) Características operacionais.	41
Figura 4.1 - Característica de magnetização de materiais ferromagnéticos.	43
Figura 4.2 - (A) Curva $B \times \mathcal{H}$ dos materiais ferromagnéticos; (B) Curva $B \times \mathcal{H}$ transformada para $\lambda \times i$	44
Figura 4.3 - Característica $v \times i$ idealizada de um reator.	45
Figura 4.4 - Curva $v \times i$ para os modelos de LCC com RNS pertencentes ao tipo A.	46
Figura 4.5 - Curva $v \times i$ para os modelos de LCC com RNS pertencentes ao tipo B.	47
Figura 4.6 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo A1.	49
Figura 4.7 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo A2.	49
Figura 4.8 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo A3.	51
Figura 4.9 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo B1.	53
Figura 4.10 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo B2.	54
Figura 4.11 - Leiaute básico para a bancada de teste do LCC.	57
Figura 5.1 - Representação gráfica do modelo da fonte de tensão.	59

Figura 5.2 - (A) Representação gráfica do modelo do indutor; (B) Representação gráfica do modelo do capacitor.	60
Figura 5.3 - Possíveis estruturas magnéticas para concepção de um RNS para controle de um LCC.	61
Figura 5.4 - Curva genérica Fluxo de Enlace x Corrente de um material ferromagnético.	62
Figura 5.5 - (A) Modelo adotado para o RNS; ainda sem a presença das perdas ôhmicas, (B) Curva de Magnetização do Material.	63
Figura 5.6 - (A) Modelo provisório do RNS; (B) Curva Fictícia $\lambda \times i$ do Ramo do Resistor; (C) Curva $\lambda \times i$ do Ramo do Indutor não linear; (D) Curva de Magnetização Real do Núcleo $\lambda \times i$	64
Figura 5.7 - Representação gráfica do modelo do RNS adotado.	66
Figura 5.8 - Representação gráfica do modelo da carga nominal e do curto circuito do sistema.	67
Figura 6.1 - Esquema simplificado de montagem para o ensaio da configuração A1.	69
Figura 6.2 - Esquema de ligação do variador de tensão utilizado nos ensaios.	70
Figura 6.3 - Equivalente de Thévenin visto do ponto onde foram realizados os ensaios.	71
Figura 6.4 - Esquema de montagem para o ensaio de curto com o sistema sem a presença do LCC.	72
Figura 6.5 - Corrente do sistema em curto sem a presença do LCC.	72
Figura 6.6 - Tensão do sistema em curto sem a presença do LCC.	73
Figura 6.7 - Característica $v \times i$ do RNS escolhido para montagem da configuração A1.	74
Figura 6.8 - Esquema completo de montagem para o ensaio da configuração A1.	75
Figura 6.9 - Corrente total, para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A1.	77
Figura 6.10 - Tensão na carga, para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A1.	77
Figura 6.11 - (A) Corrente Total, do Capacitor e do RNS; (B) Detalhe das correntes Total, do Capacitor e do RNS. Para o LCC montado na configuração A1.	78
Figura 6.12 - Tensão e corrente no RNS, para o LCC montado na configuração A1.	79
Figura 6.13 - Corrente total, para o sistema simulado e ensaiado, com o LCC montado na configuração A1.	80
Figura 6.14 - (A) Corrente no RNS; (B) Corrente no Capacitor; (C) Tensão no RNS; (D) Tensão na Carga. Para o sistema simulado e ensaiado com o LCC montado na configuração A1.	81
Figura 6.15 - (A) Tensões e correntes no sistema com e sem o LCC; (B) Detalhe das correntes no sistema com e sem LCC. Para o LCC montado na configuração A1. OBS: As correntes em (A) foram multiplicadas por um fator de 5 vezes para melhor visualização.	82
Figura 6.16 - Diagrama esquemático para simulação do LCC com chave ideal para realização de seu controle e montado na configuração A1.	83
Figura 6.17 - Correntes do sistema simulado para o LCC com RNS, com CH_i e sem LCC.	83
Figura 6.18 - Esquema simplificado de montagem para o ensaio da configuração B1.	84
Figura 6.19 - Esquema completo de montagem para o ensaio da configuração B1.	85
Figura 6.20 - Corrente total, para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração B1.	86
Figura 6.21 - Tensão na carga, para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração B1.	86

Figura 6.22 - (A) Corrente Total, do Capacitor e do RNS; (B) Tensão e corrente no RNS. Para o LCC montado na configuração B1.	87
Figura 6.23 - Correntes no sistema sem a presença de LCC e com LCC montado nas configurações A1 e B1.	87
Figura 6.24 - Corrente total, para o sistema simulado e ensaiado, com o LCC montado na configuração B1.	89
Figura 6.25 - (A) Corrente no RNS; (B) Corrente no Capacitor; (C) Tensão no RNS; (D) Tensão na Carga. Para o sistema simulado e ensaiado com o LCC montado na configuração B1.	89
Figura 6.26 - Correntes do sistema experimentado sem e com a presença do LCC, montado na configuração B1.	90
Figura 8.1 – (A) Correntes do sistema; (B) Tensão na carga. Para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A2.	101
Figura 8.2 – (A) Corrente Total, no Capacitor e no RNS; (B) Tensão e corrente no RNS. Para o sistema ensaiado com a presença do LCC, montado na configuração A2. ..	101
Figura 8.3 – (A) Corrente Total; (B) Tensão na Carga; (C) Corrente no RNS; (D) Corrente no Capacitor. Para o sistema ensaiado e simulado com a presença do LCC, montado na configuração A2.	102
Figura 8.4 – (A) Correntes do sistema; (B) Tensão na carga. Para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A3.	103
Figura 8.5 – (A) Corrente Total, no Capacitor e no RNS; (B) Tensão e corrente no RNS. Para o sistema ensaiado com a presença do LCC, montado na configuração A3. ..	103
Figura 8.6 – (A) Corrente Total; (B) Tensão na Carga; (C) Corrente no RNS; (D) Corrente no Capacitor. Para o sistema ensaiado e simulado com a presença do LCC, montado na configuração A3.	104
Figura 9.1 - Esquema de montagem do ensaio para obter a impedância equivalente.	105
Figura 9.2 - Esquema de montagem do ensaio para obter a resistência de carga.	106
Figura 9.3 – Característica $v \times i$ do resistor que representa a carga.	107
Figura 9.4 - Esquema de montagem do ensaio para obter a resistência dos indutores de curto circuito.	108
Figura 9.5 - Esquema de montagem do ensaio para obter a reatância dos indutores de curto circuito.	109
Figura 9.6 – Característica $v \times i$ do indutor que representa o curto circuito.	109
Figura 9.7 - Esquema de montagem do ensaio para obter a característica $\lambda \times i$ e das perdas no ferro do RNS.	112
Figura 9.8 – Característica $v \times i$ do RNS.	113
Figura 9.9 – Característica $\lambda \times i$ do RNS.	114
Figura 9.10 - Esquema de montagem do ensaio para obter a reatância capacitiva do banco de capacitores.	115
Figura 9.11 – Característica $v \times i$ do banco de capacitores.	115
Figura 9.12 – Característica $v \times i$ dos reatores lineares do LCC.	117

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - <i>Tempos de operação padrão de disjuntores.</i>	11
Tabela 2.2 - <i>Barras monitoradas para realização do estudo de curto circuito[3]</i>	12
Tabela 2.3 - <i>Barramentos que atingiram algum dos critérios do relatório de curto circuito da ONS [3].</i>	12
Tabela 2.4 - <i>Classificação das empresas que tiveram barramentos superados por corrente simétrica.</i>	14
Tabela 2.5 - <i>Quantidade de disjuntores superados ou em estado de alerta.</i>	15
Tabela 6.1 - <i>Valores de tensão de pico e corrente de pico relativos às Figuras 6.5 e 6.6.</i> 73	
Tabela 6.2 - <i>Comparação dos parâmetros do sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A1.</i>	79
Tabela 6.3 - <i>Valores de pico dos parâmetros do sistema simulado e ensaiado, para o LCC montado na configuração A1.</i>	81
Tabela 6.4 - <i>Valores de pico dos parâmetros do sistema sem a presença do LCC e com LCC montado nas configurações A1 e B1.</i>	88
Tabela 6.5 - <i>Valores de pico dos parâmetros do sistema simulado e ensaiado, para o LCC montado na configuração B1.</i>	90
Tabela 8.1 – <i>Resultados para o sistema com LCC ensaiado, simulado e sem a presença de LCC. Montado na configuração A2.</i>	102
Tabela 8.2 – <i>Resultados para o sistema com LCC ensaiado, simulado e sem a presença de LCC. Montado na configuração A3.</i>	104
Tabela 9.1 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter o Equivalente de Thévenin.</i> ...	105
Tabela 9.2 - <i>Resultado da impedância equivalente.</i>	106
Tabela 9.3 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência de carga.</i>	107
Tabela 9.4 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência dos indutores de curto circuito.</i>	108
Tabela 9.5 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos indutores de curto circuito.</i>	109
Tabela 9.6 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência do RNS.</i>	110
Tabela 9.7 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter as perdas totais no ferro do RNS.</i>	111
Tabela 9.8 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter as características $\lambda x i$ e $v x i$ do RNS.</i>	113
Tabela 9.9 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter a reatância capacitiva do banco de capacitores.</i>	115
Tabela 9.10 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência dos indutores lineares do LCC.</i>	116
Tabela 9.11 - <i>Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos indutores lineares do LCC.</i>	117

Lista de Abreviaturas

LCC	Limitador de Corrente de Curto Circuito
RNS	Reator Naturalmente Saturado
GEC	General Electric Company
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
DEESP	Departamento de Engenharia Elétrica e Sistema de Potência
EMTP-ATP	Electro-Magnetic Transient Program - Alternative Transient Program
PAR	Plano de Ampliação e Reforço
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
ANAFAS	Programa de Análises de Falhas Simultâneas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
CTEEP	Companhia de Transmissão Elétrica Paulista
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
EPRI	Electric Power Research Institute
WASA	Western Área Power Administration
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
GTO	Gate Turn Off (desligamento pelo gatilho)
MCT	MOS Controlled Thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
TACS	Transient Analysis of Control Systems
MODELS	General Purpose Simulation Language CTEEP
P&D	Projeto e Desenvolvimento

Lista de Símbolos

τ	Constante de tempo do circuito [segundos]
X	Reatância equivalente do sistema vista do ponto de falta [Ω]
R	Resistência equivalente do sistema vista do ponto de falta [Ω]
I_{CC}	Corrente de curto circuito calculada [A]
I_{CCN}	Corrente de curto circuito calculada [A]
I_{Total}	Corrente Total de curto circuito [A]
I_{CA}	Componente alternada da corrente total de curto circuito [A]
I_{DC}	Componente exponencial da corrente total de curto circuito [A]
ω	Frequência angular [rad/s]
t	Tempo [s]
φ	Ângulo de fase da tensão no instante do curto circuito ($t=0$).
Φ	Ângulo do fator de potência (relação X/R vista do ponto de falta).
L	Indutância [H]
Z	Impedância equivalente do sistema [Ω]
I_M	Corrente de pico de curto circuito [A]
E_M	Tensão de pico no ponto do curto circuito antes da ocorrência do curto [V]
f_i	Fator de multiplicação da corrente de curto circuito simétrica
t_i	Tempo de abertura dos contatos dos disjuntores [s]
S	Fator de capacidade dos disjuntores
$I_{CA_{ASS}}$	Corrente de curto circuito alternada assimétrica [A]
$I_{CA_{SIM}}$	Corrente de curto circuito alternada simétrica [A]
$I_{DISJ_{ASS}}$	Capacidade de interrupção de corrente assimétrica de disjuntores [A]
$I_{DISJ_{SIM}}$	Capacidade de interrupção de corrente simétrica de disjuntores [A]
T_C	Temperatura crítica de materiais supercondutores [K]
\mathcal{H}_C	Campo magnético coercitivo [A/m]
μ_N	Permeabilidade magnética dos materiais magnéticos duros, quando estes operam em um sistema em regime normal [T.m/A]

μ_{CC}	Permeabilidade magnética dos materiais magnéticos duros, quando estes operam em um sistema sob condição de falta [T.m/A]
\mathcal{B}	Densidade de fluxo magnético [T]
\mathcal{B}_S	Valor de densidade de fluxo magnético de início de saturação [T]
\mathcal{B}_{MAX}	Valor de pico da densidade de fluxo magnético [T]
\mathcal{H}	Campo magnético [A/m]
λ	Fluxo concatenado [Wb-esp]
N	Número de espiras
A	Área da seção transversal do circuito magnético do RNS [m ²]
ℓ	Comprimento do caminho magnético do circuito magnético do RNS [m]
L_m	Indutância fornecida pelo RNS quando este está fora de saturação [H]
L_S	Indutância fornecida pelo RNS quando este se encontra saturado [H]
X_S	Reatância indutiva fornecida pelo RNS quando este se encontra saturado [Ω]
R_S	Resistência que representa as perdas ôhmicas do enrolamento do RNS [Ω]
X_L	Reatância indutiva fornecida pelo Reator Linear [Ω]
R_L	Resistência que representa as perdas ôhmicas do enrolamento do Reator Linear [Ω]
X_C	Reatância capacitiva fornecida pelo Banco de Capacitores [Ω]
R_C	Resistência que representa as perdas do Banco de Capacitores [Ω]
X_{LCC}	Reatância total fornecida pelo LCC quando este está em operação [Ω]
V_S	Tensão de início de saturação do RNS [V]
V_L	Tensão entre os terminais do Reator Linear [V]
V_C	Tensão entre os terminais do Banco de Capacitores [V]
V_R	Tensão entre os terminais do RNS [V]
$\Delta\lambda$	Variação do fluxo concatenado [Wb-esp]
Δi	Variação de corrente [A]
V_M	Tensão de pico da fonte de tensão [V]

V_{TH}	Tensão de um ponto qualquer de um circuito elétrico em circuito aberto [V]
Z_{TH}	Impedância equivalente vista de um ponto qualquer de um circuito elétrico [Ω]
I_C	Corrente no ramo do Banco de Capacitores [A]
I_R	Corrente no ramo do RNS [A]
I_T	Corrente total do sistema ensaiado [A]
f	Frequência do sistema [Hz]
a	Constante que representa $(4,44 \cdot f \cdot N \cdot A)$
c	Constante que representa $(1/R \cdot a^2)$
P	Perdas totais em materiais ferromagnéticos [W]
$P_{Histerese}$	Perdas por Histerese em materiais ferromagnéticos [W]
$P_{Foucault}$	Perdas por Foucault em materiais ferromagnéticos [W]
$P_{Excedentes}$	Perdas Excedentes em materiais ferromagnéticos [W]
α	Constante que multiplica a densidade de fluxo magnético no cálculo das perdas por Foucault
β	Constante que multiplica a densidade de fluxo magnético no cálculo das perdas por Histerese
η	Constante que multiplica a densidade de fluxo magnético no cálculo das perdas Excedentes
R_{Carga}	Resistência que representa a carga no sistema ensaiado [Ω]
Z_{Curto}	Impedância que representa o curto circuito no sistema ensaiado [Ω]
CH	Chave eletrônica de manobra do curto circuito no sistema ensaiado
CH_i	Chave de controle do LCC em algumas simulações
$I_{Nominal}$	Corrente de pico do sistema antes da imposição do curto circuito [A]
$I_{Transitório}$	Corrente de pico do primeiro pico após a imposição do curto circuito ao sistema [A]
I_{Regime}	Corrente de pico após esta atingir o regime após a imposição do curto circuito ao sistema [A]
$V_{Carga Antes}$	Tensão de pico na carga antes da imposição do curto circuito [V]
$V_{Carga Após}$	Tensão de pico na carga após a imposição do curto circuito ao sistema [V]

$P_{\hat{O}micas}$	Perdas por efeito Joule do RNS [W]
$R_{\hat{O}micas}$	Resistência que representa as Perdas por efeito Joule do RNS [Ω]
P_{Ferro}	Perdas no ferro do RNS [W]
R_{Ferro}	Resistência que representa as Perdas no ferro do RNS [Ω]

1 ASPECTOS GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de energia nos sistemas elétricos de potência exige como contrapartida, uma ação contínua das empresas do setor elétrico com vistas a diagnosticar, antecipadamente, os pontos de estrangulamento da rede e promover as obras necessárias para o atendimento satisfatório dessa demanda. Com essa finalidade, linhas de transmissão e subestações são planejadas e incorporadas à rede elétrica, bem como a capacidade das instalações existentes é ampliada pela inclusão de novos equipamentos de maior potência nominal. Além de responder às solicitações de consumo, outro propósito permanente das empresas de energia elétrica é assegurar um elevado padrão de qualidade ao fornecimento, não somente para o cumprimento dos índices impostos pelo contrato de concessão firmado com o poder público, mas também pela satisfação de oferecer aos seus clientes um produto que atenda a todos os requisitos exigidos pelas normas vigentes. Para isso, o sistema de transmissão de energia torna-se cada vez mais “malhado”, com vistas a oferecer várias opções para a transferência de potência entre regiões. Ainda mais, a necessidade de dispor de várias alternativas de fornecimento, como também a otimização das fontes geradoras disponíveis, sugere interligações entre as diversas redes elétricas em operação no território nacional.

A evolução do sistema elétrico em decorrência desses processos ocasiona uma sensível redução da “*distância elétrica*” entre as estações de suprimento e as cargas, o que se por um lado favorece a obtenção de um perfil de tensão bastante satisfatório ao longo do sistema de transmissão, por outro contribui para um crescimento considerável da corrente de curto circuito nas barras da rede elétrica. Nessas circunstâncias, a capacidade de interrupção das unidades de chaveamento em operação nas subestações poderá ser ultrapassada, particularmente os dispositivos com um maior tempo de funcionamento,

muito embora também aqueles de instalação mais recente possam ser atingidos caso o patamar de elevação da corrente seja expressivo.

Esse quadro sugere a perspectiva de um evento de grande monta, caso um curto circuito com a intensidade crítica venha a ocorrer na vizinhança desses pontos vulneráveis do sistema de potência. Tal possibilidade recomenda uma pronta ação das concessionárias de energia elétrica, as quais, em geral, têm optado por substituir os equipamentos inadequados por outros com a capacidade necessária. Por outro lado, os custos financeiros envolvidos num empreendimento dessa importância sugerem que o leque de alternativas seja ampliado e outras proposições, além da simples troca, sejam apreciadas e cotejadas na busca da solução mais econômica. Nesse contexto, uma das opções mais promissoras é, sem dúvida, o emprego de dispositivos que limitem a corrente de curto circuito na instalação. Com essa medida, as substituições citadas não seriam mais necessárias e as atuais unidades, agora habilitadas ao desempenho da sua função, poderiam ser utilizadas por toda a vida operativa prevista para as mesmas, assegurando, além de um retorno adequado do investimento, uma operação confiável e com qualidade.

Dispositivos *limitadores de corrente de curto circuito* (LCC) tem sido tema de pesquisa de muitos estudiosos e empresas, com propostas que vão de simples mudanças topológicas nas configurações do sistema à utilização de equipamentos. Algumas dessas medidas são utilizadas desde longa data por diversas empresas, outras são propostas apenas de forma teórica, mas todas pactuantes do mesmo princípio: reduzir a corrente de curto circuito a patamares aceitáveis pelos equipamentos de disjunção em operação no sistema.

Uma opção proposta no passado, mas que responde com eficiência as exigências indicadas é a utilização em série de *reatores naturalmente saturados* (RNS) funcionando como limitador de corrente de curto circuito. A proposta original deste dispositivo é formada por um reator linear em série com um conjunto formado por um capacitor em paralelo com um RNS, conforme Figura 1.1.

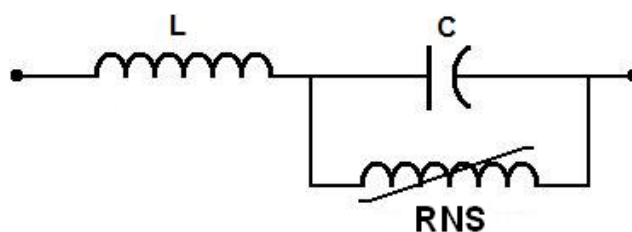


Figura 1.1 - Montagem inicialmente proposta para o limitador de corrente de curto circuito a base de reatores naturalmente saturados.

A princípio, o reator linear e o banco de capacitores são projetados com o mesmo valor de impedância para que, em regime permanente, se anulem e não afetem o sistema. O RNS, em virtude de suas características, funciona como um dispositivo de controle, retirando o capacitor de operação no momento em que uma falha ocorre no sistema e provoca o aumento da corrente, deixando apenas o reator linear em operação para realizar a redução da corrente de curto.

O uso de RNS para controle de limitadores de corrente de curto foi primeiramente proposto pela *General Electric Company* (GEC), que detinha o conhecimento tecnológico para fabricação de RNS, elemento base do LCC e de projeto complexo. Posteriormente, em face das oportunidades de aplicação desse dispositivo em sistemas de potência, a *Universidade Federal de Pernambuco* (UFPE), através do *Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência* (DEESP), criou um grupo dedicado ao estudo de reatores naturalmente saturados, tendo desenvolvido diversas pesquisas a respeito deste tema.

No presente trabalho, são propostas novas alternativas para o uso de RNS, apresentando não só modificações no esquema de montagem do equipamento inicialmente proposto pela GEC, mas também apresentando modificações no modo de operação, proporcionando benefícios extras em relação à proposta original. Como é praxe na análise de desempenho de novos equipamentos, protótipos de pequeno porte foram utilizados com a finalidade de analisar o desempenho operacional das alternativas propostas, utilizando-as como LCC, destacando suas vantagens e justificando seu uso em tamanho real no sistema elétrico. Outra proposta do presente trabalho é simular o sistema que será ensaiado na ferramenta computacional *Electro-Magnetic Transient Program - Alternative Transient Program* (EMTP-ATP), utilizando para isto modelos individuais de cada componente do sistema, para que este possa representar, ao menos de forma qualitativa, os resultados obtidos experimentalmente.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentada a situação das empresas do setor elétrico brasileiro com respeito aos disjuntores, atualmente em operação no sistema de potência e que se encontram superados ou em estado de alerta. Este levantamento é realizado por empresa e por barras. Também é enunciada a metodologia utilizada para indicar o estado dos disjuntores.

No capítulo 3 é apresentado o “*Estado da Arte*”, exibindo as diversas técnicas propostas por pesquisadores e empresas para reduzir a corrente de curto circuito, expondo suas características operativas, vantagens e desvantagens, para com isso se ter idéia dos dispositivos que são oferecidos, a nível mundial, para limitar a corrente de curto circuito.

No capítulo 4 são apresentadas as novas configurações propostas para a utilização em série de RNS, analisando o princípio de funcionamento, vantagens, desvantagens e novidades que cada uma delas apresentam. Também é abordada de forma simplificada a teoria que rege os materiais ferromagnéticos com que os RNS são construídos e enunciados alguns dispositivos que empregam o RNS como base para seu funcionamento.

No capítulo 5 é indicado de que forma serão modelados todos os elementos que fazem parte do sistema a ser experimentado, para uma posterior comparação com os resultados obtidos em ensaio, bem como as justificativas para o uso de cada modelo.

No capítulo 6 são apresentados todos os resultados experimentais e de simulação obtidos através de uma bancada de testes, montada com elementos em tamanhos reduzidos de um sistema elétrico, inclusive com a aplicação de RNS funcionando como LCC montado nas configurações A1 e B1, bem como as justificativas por optar por cada valor dos elementos envolvidos nestes estudos. São realizadas comparações entre as simulações e os ensaios do sistema com e sem a presença do LCC para as duas configurações citadas.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões a que o estudo conduziu e algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados com o tema desta dissertação.

Nos capítulos 8 e 9 são expostos os Apêndices e Anexos, respectivamente. Neles são apresentados materiais de relevante importância para o entendimento e o desenvolvimento do presente trabalho, mas que, se introduzido no corpo central da dissertação, poderia dispersar, pelos detalhes envolvidos, o foco principal da atenção do leitor.

2

SITUAÇÃO DAS EMPRESAS DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

2.1 INTRODUÇÃO

Como descrito no tópico anterior, com a evolução do sistema elétrico brasileiro, as empresas do setor tem sofrido bastante com a superação de equipamentos devido ao aumento da corrente de curto circuito. Na presente seção será descrito de forma sucinta a quantidade de disjuntores superados ou em estado de alerta presentes no sistema elétrico brasileiro, e a forma como tal situação foi caracterizada.

Com as medidas previstas no *Plano de Ampliação e Reforços (PAR)*, elaborado anualmente pelo *Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)* e que relacionam as obras necessárias para a melhoria na operação do sistema elétrico, a tendência é que a corrente de curto circuito aumente cada vez mais, provocando, assim, a superação de um número maior de equipamentos. Também no PAR consta uma avaliação dos valores das correntes de curtos circuitos, obtidos do relatório denominado "*Estudos de Curto Circuito*", além de indicar, de forma preliminar, os equipamentos a serem substituídos. Na falta de informações fornecidas diretamente pelas empresas transmissoras sobre a situação em que se encontram seus disjuntores, este relatório torna-se a principal fonte de consultas para os pesquisadores, mesmo ciente de que os números nele apresentados poderão ser inferiores aos realmente verificados.

2.2 CRITÉRIOS E PROCEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO “ESTUDOS DE CURTO CIRCUITO”

O relatório “*Estudos de Curto Circuito*” é elaborado anualmente pelo ONS em conjunto com as transmissoras (Agentes) e traz os estudos para um horizonte de 3 anos, levando em consideração as obras a serem executadas nesse período. Neste estudo são avaliados todos os barramentos do *Sistema Interligado Nacional* (SIN), indicando-se aqueles que tiveram sua capacidade de interrupção de corrente superada e a evolução da corrente de curto circuito nesses barramentos com relação aos estudos anteriores. Considera-se como capacidade de interrupção da instalação aquela referente ao disjuntor com menor valor de corrente conectado a barra em estudo. A ferramenta computacional utilizada para realização desse estudo é o *Programa de Análises de Falhas Simultâneas* (ANAFAS) de propriedade do *Centro de Pesquisas de Energia Elétrica* (CEPEL).

O relatório de curto circuito é a primeira etapa do estudo, onde estão indicados os equipamentos que deverão passar por uma investigação mais profunda, pois nessa fase é considerada apenas a corrente de curto circuito simétrica. Na segunda etapa, a qual não está acessível ao público, os Agentes, baseados no relatório de curto circuito por corrente simétrica, desenvolvem os estudos mais detalhados aplicados aqueles equipamentos ora discriminados no relatório do ONS. Os estudos específicos realizados pelos Agentes proprietários dos equipamentos sob investigação são:

- Corrente nominal;
- Crista da corrente de curto circuito;
- Constante de tempo (X/R);
- Tensão de restabelecimento transitória (TRT).

A metodologia adotada pelo grupo responsável pela elaboração do relatório “*Estudos de Curto Circuito*” é apresentado no fluxograma da Figura 2.1, o qual caracteriza as condições indicativas de ocorrência de superação.

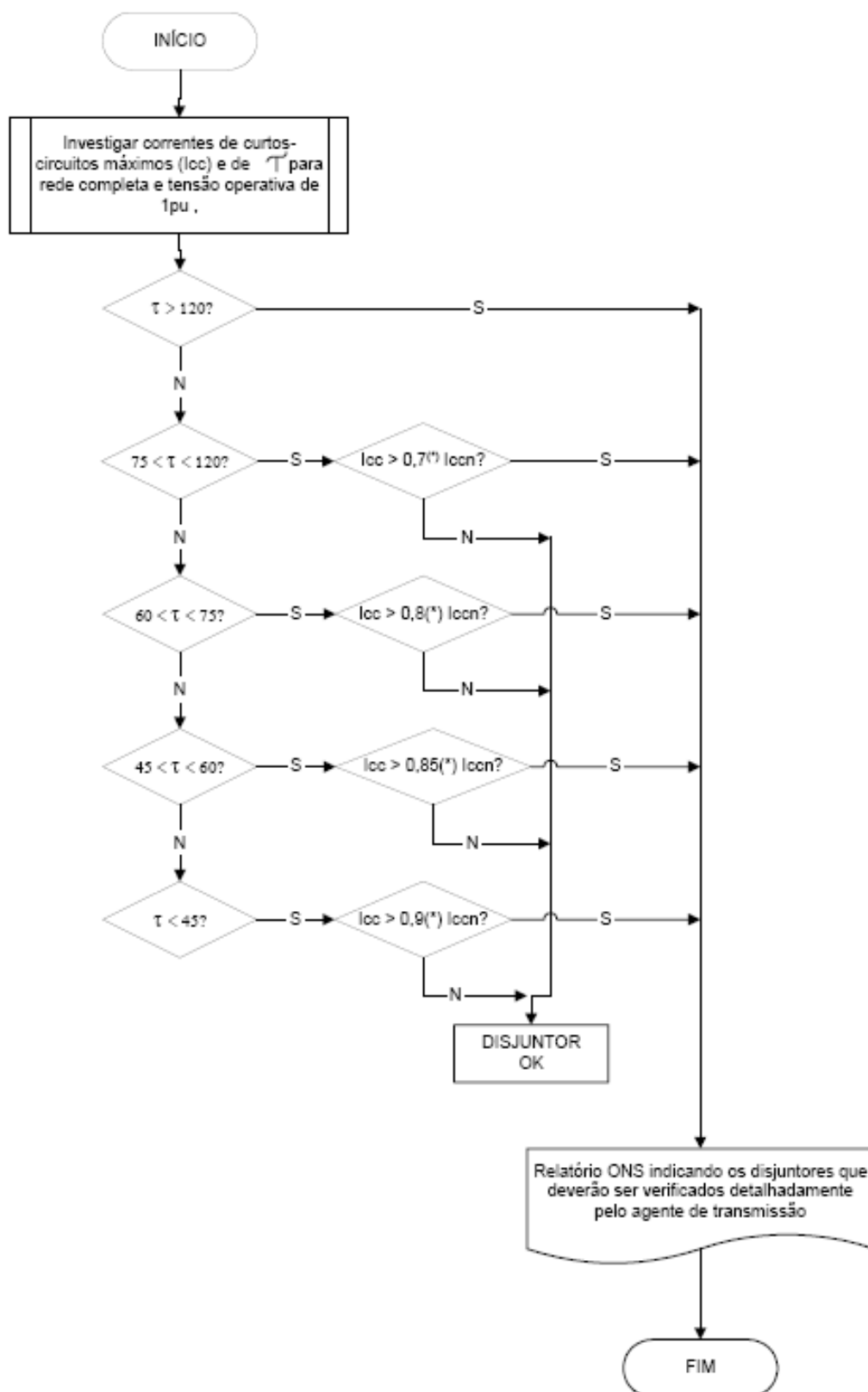


Figura 2.1 - Metodologia utilizada para elaboração do relatório "Estudos de Curto Circuito"[4].

Pelo fluxograma da Figura 2.1, pode ser observado que os disjuntores, que necessitarão de investigações mais detalhadas por parte dos Agentes, serão aqueles conectados aos barramentos que exibam pelo menos um dos seguintes fatores:

- $\tau > 120ms$ ($X/R \geq 45,24$) - Constante de tempo maior que 120ms;
- $75 < \tau < 120ms$ e $I_{CC} > 0,7 \cdot I_{CCN}$ ($28,28 \leq X/R < 45,24$) - Constante de tempo entre 75ms e 120ms, e corrente de curto circuito maior que 70% da capacidade de interrupção do menor disjuntor conectado ao barramento;
- $60 < \tau < 75ms$ e $I_{CC} > 0,8 \cdot I_{CCN}$ ($22,62 \leq X/R < 28,28$) - Constante de tempo entre 60ms e 75ms, e corrente de curto circuito maior que 80% da capacidade de interrupção do menor disjuntor conectado ao barramento;
- $45 < \tau < 60ms$ e $I_{CC} > 0,85 \cdot I_{CCN}$ ($16,96 \leq X/R < 22,62$) - Constante de tempo entre 45ms e 60ms, e corrente de curto circuito maior que 85% da capacidade de interrupção do menor disjuntor conectado ao barramento;
- $\tau < 45ms$ e $I_{CC} > 0,9 \cdot I_{CCN}$ ($X/R < 16,96$) - Constante de tempo menor que 45ms, e corrente de curto circuito maior que 90% da capacidade de interrupção do menor disjuntor conectado ao barramento;

Este procedimento foi adotado para evitar que disjuntores que não tiveram sua capacidade de interrupção superada pela corrente de curto simétrica, venham a ser indicados como estando em boas condições, quando na verdade podem estar superados pela corrente de curto assimétrica, que é a corrente real que deverá ser interrompida pelo disjuntor. A constante de tempo, ou a relação (X/R), influencia no valor da corrente real de curto circuito da seguinte maneira:

$$i_{Total} = i_{CA} + i_{DC} \quad (2.1)$$

$$i_{Total} = \underbrace{I_M \cdot \cos(\omega t + \varphi - \phi)}_{I_{CA}} - \underbrace{I_M \cdot \cos(\varphi - \phi) \cdot e^{-(Rt/L)}}_{I_{DC}} \quad (2.2)$$

$$I_M = \frac{E_M}{Z} \quad (2.3)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.4)$$

$$\phi = \arctan \frac{X}{R} \quad (2.5)$$

Como,

$$L = \frac{X}{\omega} \quad (2.6)$$

Então,

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega \cdot R} \quad (2.7)$$

A corrente total pode ser expressa da seguinte forma:

$$i_{Total} = \underbrace{I_M \cdot \cos(\omega t + \varphi - \phi)}_{I_{CA}} - \underbrace{I_M \cdot \cos(\varphi - \phi) \cdot e^{-\omega t / X/R}}_{I_{DC}} \quad (2.8)$$

A Equação (2.8) expressa a corrente no circuito da Figura 2.2, e sua dedução pode ser encontrada em [1].

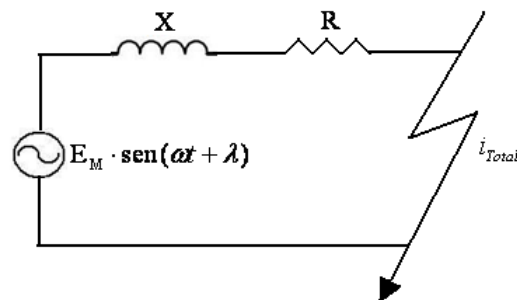


Figura 2.2 - Circuito X/R simplificado.

Como relatado acima, a componente exponencial pode contribuir de forma significativa na corrente total de curto circuito, a depender da relação X/R no ponto de ocorrência da falha. A equação (2.8) indica exatamente isto e pode ser melhor compreendida na Figura 2.3.

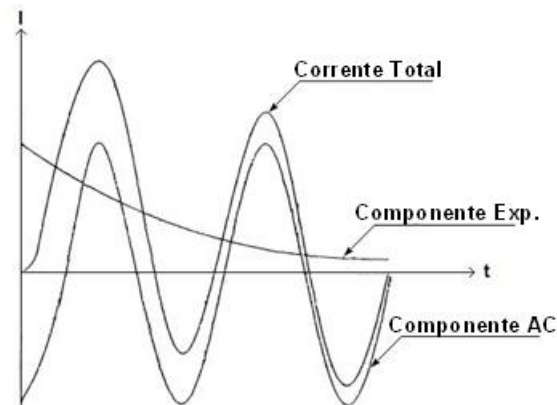


Figura 2.3 - Corrente total de curto circuito com suas componentes AC e DC.

A corrente de curto circuito total exata deve ser calculada utilizando a Equação (2.8). Todavia, outra maneira para se obter essa corrente com uma aproximação satisfatória está descrito em [2], onde se multiplica a corrente de curto simétrica por um fator (f_i) que depende da relação X/R no ponto de curto circuito e do tempo de abertura dos contatos (t_i), como indicam a Figura 2.4 e a Tabela 2.1.

$$f_i = \max \left[1, \sqrt{1 + 2e^{\frac{-4\pi t_i}{X/R}}} \right] \quad (2.9)$$

A corrente assimétrica que um disjuntor pode interromper é dada pela multiplicação da capacidade de interrupção nominal do mesmo por um fator de capacidade (S), que depende da classificação do disjuntor e é normatizado para uma relação de X/R=15. O fator de capacidade para cada tipo de disjuntor é apresentado na Tabela 2.1.

Assim, para verificar a condição operacional de um dado disjuntor para interrupção da corrente de curto circuito assimétrica, basta comparar a corrente de curto assimétrica dada pela Equação 2.10, com a capacidade de interrupção assimétrica do disjuntor dada pela Equação 2.11. Se a corrente de curto assimétrica no ponto for maior que a capacidade de interrupção assimétrica do disjuntor, este é caracterizado como superado por corrente assimétrica.

$$I_{CA_{ASS}} = I_{CA_{SIM}} \cdot f_i \quad (2.10)$$

$$I_{DISJ_{ASS}} = I_{DISJ_{SIM}} \cdot S \quad (2.11)$$

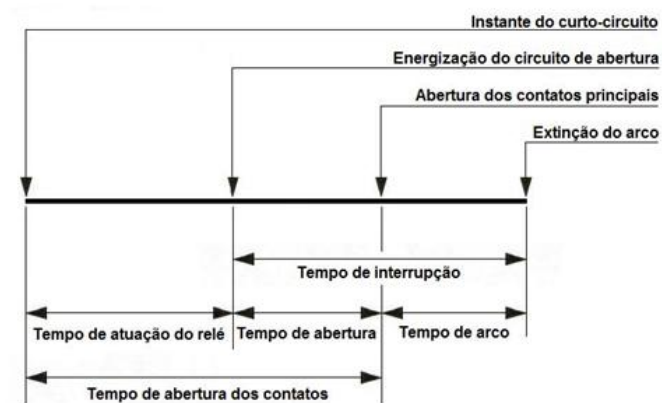


Figura 2.4 - *Tempos relacionados à operação de um disjuntor.*

Tabela 2.1 - *Tempos de operação padrão de disjuntores.*

Tempo de Interrupção Nominal (Ciclos)	Tempo de Abertura (Ciclos)	Tempo de Abertura dos Contatos (Ciclos)	Fator de Capacidade
2	1.0	1.5	1.3
3	1.5	2.0	1.2
5	2.5	3.0	1.1
8	3.5	4.0	1.0

Na análise por corrente simétrica, o ONS adota o seguinte critério para julgamento do estado operacional do disjuntor [3]:

- O disjuntor cuja relação entre a corrente de curto circuito e a capacidade de interrupção simétrica apresentar valor igual ou superior a 100 %, será considerado na condição SUPERADO;
- Se a relação exibir valor superior a 90 % e inferior a 100 %, o disjuntor será considerado como em estado de ALERTA e;
- Se a relação estiver abaixo de 90 %, o disjuntor será considerado apto para operação (OK).

2.3 LEVANTAMENTO DOS DISJUNTORES SUPERADOS EM OPERAÇÃO NO SIN

Conforme descrito no tópico anterior, o relatório de curto circuito é elaborado aplicando-se faltas monofásicas e trifásicas em todas as barras da *Rede Básica* e considerando apenas a corrente de curto simétrica, cabendo aos Agentes os estudos mais detalhados. Os dados apresentados a seguir foram retirados do relatório “*Estudos de Curto Circuito – Período 2008-2011*” [4].

A Tabela 2.2 mostra um resumo do total de barramentos do SIN monitorados para realização do estudo de curto circuito.

Tabela 2.2 - Barras monitoradas para realização do estudo de curto circuito[3]

Barras com tensão maior ou igual a 230 KV			Barras com tensão menor a 230 KV		
Com informação sobre o disjuntor	Sem informação sobre o disjuntor	Barras que não possuem disjuntor	Com informação sobre o disjuntor	Sem informação sobre o disjuntor	Barras que não possuem disjuntor
532	134	20	1411	395	332
686			3138		
3824					

Um fato que se destaca nos dados apresentados na Tabela 2.2 é a quantidade de disjuntores tidos como sem informação.

Outro dado relevante dos estudos [4] é a quantidade de barramentos que se enquadra em cada um dos critérios de julgamento adotados no relatório de curto circuito do ONS. A Tabela 2.3 apresenta esses dados.

Tabela 2.3 - Barramentos que atingiram algum dos critérios do relatório de curto circuito da ONS [3].

Critério	Nível de Tensão dos barramentos		Total de barramentos
	maior ou igual a 230 KV	menor que 230 KV	
$X/R < 16,96$ e $I_{tot} > 90\%$	20	81	101
$16,96 \leq X/R < 22,62$ e $I_{tot} > 85\%$	25	11	36
$22,62 \leq X/R < 28,28$ e $I_{tot} > 80\%$	3	6	9
$28,28 \leq X/R < 45,24$ e $I_{tot} > 70\%$	4	19	23
$X/R \geq 45,24$	7	431	438
Total de Barramentos	59	548	607

Alguns pontos da Tabela 2.3 são, com efeito, de grande importância para a operação do SIN. O primeiro deles é a quantidade de barramentos que exibem ou irão exibir algum tipo de problema até 2011, exatamente 607 representando 16% do total de barramentos monitorados. O segundo fato destacado é que a grande maioria dos barramentos com algum problema situa-se na classe de tensão inferior a 230 KV, o que totaliza 90% dos barramentos com anormalidade. O terceiro ponto é que a grande maioria dos barramentos com problema não apresentam correntes de curto simétricas elevadas, mas uma relação $X/R \geq 45,24$, cerca de 72% do total. Esse fato não exclui tais dispositivos da condição superada, mas indicam que os mesmos deverão ser submetidos a estudos mais detalhados para identificar a razão de tamanha relação X/R. O último aspecto que merece destaque é a parcela significativa dos barramentos com problema que apresentam uma corrente de curto circuito superior a 90% da capacidade de interrupção do menor disjuntor conectado ao mesmo, aproximadamente 17% do total. Isso indica que, pelo menos 1 dos disjuntores conectados a esse barramento estará superado ou em estado de alerta.

A Tabela 2.4 apresenta a quantidade de barramentos com algum tipo de anormalidade por empresa concessionária. Desta tabela se constata que 100 barramentos, cerca de 17% do total arrolado nessa tabela, apresentam no mínimo 1 disjuntor superado por corrente de curto simétrica, o que importa em 2,6% de todos os barramentos. Considerando também os barramentos em estado de alerta, já que existe uma grande probabilidade dos mesmos estarem superados por outros critérios, este número atinge 4,4%. Outro fato importante na Tabela 2.4, é que 27,8% dos barramentos com problema estão ou superados ou em estado de alerta. Esse quantitativo poderá elevar-se ainda mais quando se considera que uma parte dos barramentos restantes poderá se enquadrar nesta classificação, já que irão passar por estudos mais detalhados a fim de detectar a causa da relação X/R elevada. Merece destaque também as empresas com maior número de barramentos com indicação de algum tipo de problema, como é o caso da Companhia de Transmissão Elétrica Paulista (CTEEP) e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), com 133 e 126 barramentos com anormalidades, respectivamente.

Tabela 2.4 - Classificação das empresas que tiveram barramentos superados por corrente simétrica.

EMPRESA	BARRAMENTOS			
	SUPEARADOS POR CORRENTE SIMÉTRICA ($I_{cc} \geq I_{disj}$)	ALERTA POR CORRENTE SIMÉTRICA ($I_{cc} \geq 0,9 * I_{disj}$)	X/R=16,96	TOTAL
AES TIETE			1	1
AMPLA		1	1	2
BRENTECH	1			1
CEAL			1	1
CEB			1	1
CEEE	13	1	14	28
CELESC	6	5	1	12
CELG			13	13
CELTINS			2	2
CEMAT			2	2
CEMIG	4	4	19	27
CHESF	12	7	107	126
CMS			1	1
COELBA			4	4
COELCE		1	1	2
COPEL	7	5	23	35
CSA			1	1
CSM			1	1
CPFL	4	8		12
CTEEP	18	14	101	133
CVRD			1	1
EDEVP			2	2
ELECTRO		1	1	2
ELETRONORTE	4	2	65	71
ELETROSUL	1	10	9	20
EMAE	4	2		6
FURNAS	23	7	47	77
IE OINHEIROS			1	1
ITAIPU			2	2
LIGHT		1		1
NEW ENERGI			1	1
PLENATRANS			2	2
TERMOCABO			1	1
TRACTEBEL	1		11	12
TSN	2		1	3
TOTAL	100	69	438	607

A Tabela 2.5 apresenta a quantidade de disjuntores superados ou em estado de alerta devido a corrente de curto circuito simétrica, classificados por empresa e por classe de tensão.

Tabela 2.5 - Quantidade de disjuntores superados ou em estado de alerta.

EMPRESA	DISJUNTORES					TOTAL
	SEM INFORMAÇÃO	SUPERADOS POR CORRENTE SIMÉTRICA		EM ESTADO DE ALERTA POR CORRENTE SIMÉTRICA		
		V \geq 230 KV	V<230KV	V \geq 230 KV	V<230KV	
BRENTECH		1				1
CEEE	8	19	64	1	4	88
CELESC	5		17		26	43
CEMIG	1	10	5	1	10	26
CHESF	4	13	25	19	6	63
COELCE					3	3
COPEL	3	4	23	2	21	50
CPFL	0	0	21	0	0	21
CTEEP	13	20	53	34	37	144
ELETRONORTE	0	0	1	0	0	1
ELETROSUL	2	0	2	6	1	9
EMAE	0	2	28	9	6	45
FURNAS	15	49	69	22	22	162
TRACTEBEL		1				1
TSN			6			6
TOTAL		119	314	94	136	663

Observa-se na Tabela 2.5 que para o horizonte em análise (2011), existirão 433 disjuntores superados e 230 disjuntores em estado de alerta em todo sistema elétrico nacional. Estes 663 disjuntores superados ou em estado de alerta estão distribuídos nos 169 barramentos indicados com essa classificação na Tabela 2.4. Nota-se também que a grande maioria dos disjuntores com problema, precisamente 450 unidades, encontra-se numa classe de tensão inferior a 230KV, representando 68% do total.

Como mencionado em diversos pontos dessa seção, os números apresentados nas Tabelas 2.3, 2.4 e 2.5 foram estabelecidos tendo-se em conta a corrente de curto circuito simétrica em cada um. Com a elaboração dos estudos específicos realizados pelos Agentes, que leva em consideração a corrente de curto assimétrica, o número de disjuntores superados ou em estado de alerta poderá sofrer uma elevação significativa.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados apresentados nesta seção apontam um número bastante elevado de disjuntores em operação no SIN, que já apresentam superação ou irão experimentar essa condição num horizonte bem próximo. Essa constatação aponta para a grande necessidade de dispositivos limitadores da corrente de curto circuito, que tornem os mesmos novamente aptos para a operação sem necessidade dos expressivos investimentos financeiros requeridos para a troca desses equipamentos. Como será visto no capítulo posterior, vários recursos com essa finalidade têm sido propostos pelos pesquisadores, alguns de fato já adotados desde longa data por algumas empresas, outros ainda em estágio experimentais ou apenas formulados do ponto de vista teórico.

3

ESTADO DA ARTE

3.1 INTRODUÇÃO

A necessidade das empresas distribuidoras e transmissoras de energia elétrica em reduzir a corrente de curto circuito a níveis satisfatórios para os equipamentos de chaveamento em operação tem incentivado a pesquisa entre estudiosos e empresas de dispositivos com essa finalidade. Diversos esquemas foram e são propostos até hoje com o intuito de elevar a impedância da rede elétrica no ponto do defeito e, com isso, reduzir a corrente de falha para os patamares desejados. Alguns desses dispositivos já são ofertados comercialmente e efetivamente utilizados por empresas do setor elétrico. Outros, porém, ainda se encontram em regime experimental ou mesmo em desenvolvimento teórico e apenas citados na bibliografia especializada.

3.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE UM LCC

Além de limitar a corrente de curto circuito de forma efetiva, os diferentes tipos de LCC devem apresentar algumas características básicas, que em maior ou menor grau, os diferem e os ordenam como as melhores alternativas a serem utilizadas. As principais características que os LCC devem obedecer, segundo a especificação para LCC proposta por [5], são:

- Impedância: deve ser a menor possível em condição normal de operação normal do sistema, a fim de evitar:
 - Perdas resistivas;
 - Perdas reativas;
 - Quedas de tensão.

- Condição operacional do sistema: deve ser avaliada 3 condições do sistema:
 - Condição normal de operação;
 - Condição de sobre carga;
 - Condição de curto circuito:
 - Corrente a ser limitada;
 - Sobre tensão durante a operação;
 - Velocidade de operação;
 - Transitórios causados pela operação;
 - Tempo de restabelecimento após a operação;
 - Capacidade de efetuar múltiplas operações.

- Proteção:
 - Seletividade;
 - Interação com o plano ou conceito de proteção existente;
 - Interação com os novos conceitos de proteção;
 - Limite de falta de energia que o prejudique;
 - Promover um ambiente de trabalho seguro.

- Segurança e Impactos ao meio ambiente:
 - Interferências eletrodinâmicas (em caso de uso de reatores em paralelo).

- Tempo de vida e Manutenção do equipamento.

- Custos com o equipamento: instalação, operação, etc.

- Confiabilidade: os LCC deverão possuir um nível de confiabilidade alto, pois serão invocados a operar após longos tempos entre eventos.

Além de reduzir a corrente de curto circuito a patamares tecnicamente aceitáveis pelos disjuntores em operação, um LCC pode proporcionar outros benefícios ao sistema elétrico, tais como:

- Melhoria na qualidade da energia:
 - Reduzir os afundamentos de tensão;
 - Reduzir os harmônicos;
 - Reduzir as sobre tensões temporárias devido à conexão de produtores independentes de energia.

- Evita altos investimentos e sobre dimensionamento dos equipamentos.

- Evita custos recorrentes.

3.3 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Desde longa data, a redução da corrente de curto circuito é uma necessidade imperiosa das empresas o setor elétrico e, por isso, novas técnicas ou o aprimoramento de técnicas antigas estão em permanente desenvolvimento. Todas as medidas propostas para este fim baseiam-se no princípio de diminuir a corrente de curto circuito em um determinado ponto pela elevação da impedância equivalente vista desse ponto. As técnicas que promovem tal elevação em caráter permanente são denominadas de passivas, enquanto aquelas que procedem a essa mudança apenas temporariamente e por ocasião da incidência de uma falha no sistema elétrico, recebem a designação de técnicas ativas. A seguir essas técnicas são abordadas com mais detalhes, expondo suas vantagens e desvantagens.

3.3.1 Técnicas Passivas

Essas técnicas englobam tanto a adoção de medidas de natureza topológica na rede elétrica como a aplicação de dispositivos propriamente ditos.

3.3.1.1 Medidas Topológicas

Essas medidas consistem em aumentar a impedância de falta com a separação de circuitos que operam em paralelo em unidades individuais ou em subgrupos Figura 3.1.

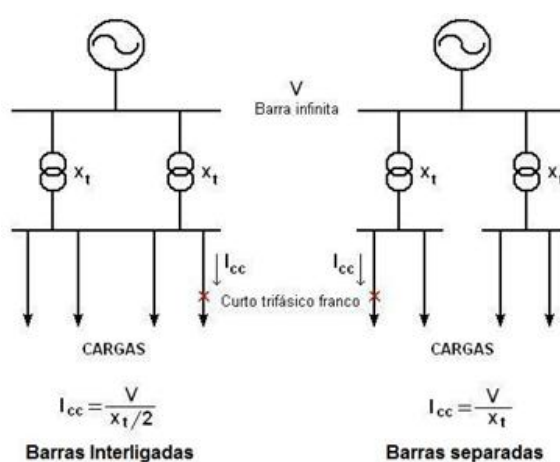


Figura 3.1 - Separação de barras como medida para diminuir a corrente de curto circuito.

Essa medida é conhecida como separação de barras e normalmente é utilizada em subestações onde funcionam dois ou mais transformadores em paralelo. Na Figura 3.1 pode ser observado que a corrente de curto circuito torna-se duas vezes menor com a separação das barras da maneira ilustrada na figura, assumindo que todos os transformadores possuem impedâncias equivalentes iguais.

No passado, essa medida era muito utilizada, primeiramente devido à ausência no mercado de dispositivos limitadores de corrente de curto circuito que satisfizessem os requisitos impostos pelas empresas que operam, regulam ou fiscalizam o sistema elétrico. Em segundo lugar devido à ausência no mercado eletroeletrônico da época de dispositivos de manobra capazes de interromper correntes acima de determinados limites.

Bastante utilizada antes da existência de alternativas mais sofisticadas e eficientes, até hoje tal medida ainda é um recurso posto em prática pelas empresas para diminuir a corrente de curto circuito em pontos estratégicos do sistema elétrico, como mostra [6].

Apesar da efetividade indiscutível dessa alternativa, os benefícios auferidos com a interligação dos barramentos das subestações são comprometidos com a aplicação da mesma, a saber:

- Confiabilidade da rede elétrica;
- Flexibilidade operacional do sistema;
- Estabilidade estática e transitória;
- Qualidade da energia ofertada.

Um recurso para mitigar a perda dos benefícios citados acima é apresentado em [7], que propõe a interligação das barras através de um disjuntor. Tal medida, conhecida como desligamento seqüencial da rede, faz com que, em condições normais de operação, o sistema usufrua das vantagens oferecidas pela baixa impedância. Na ocorrência de um defeito, porém, o disjuntor de interligação seria acionado, promovendo a separação das barras e, em consequência, elevando a impedância do defeito e diminuindo a corrente de curto circuito. Após o isolamento do trecho defeituoso, o disjuntor de interligação seria novamente ativado, restaurando a condição normal de funcionamento. Em contrapartida essa alternativa torna mais complexa a operação do sistema, trazendo algumas desvantagens como:

- Disjuntores dos ramais de alimentação momentaneamente submetidos a uma sobrecarga;
- Em caso de falha desse esquema, os efeitos poderiam ser desastrosos para o sistema;
- O tempo de eliminação da falta seria acrescido do tempo de atuação do disjuntor de interligação, o que poderia pôr em risco a integridade dos equipamentos do sistema.

3.3.1.2 Aplicação de Equipamentos

Os equipamentos utilizados para reduzir a corrente de curto circuito, que se enquadram nas chamadas técnicas passivas, são os transformadores dispendo de uma alta impedância e os reatores lineares conectados em série. Apesar das perdas e da deterioração na regulação da tensão do sistema de potência produzidas pelo uso desses equipamentos, tais alternativas, particularmente os reatores lineares continuam sendo uma prática comum nas empresas de energia elétrica como assinala [8], por se tratar de uma medida de custo reduzido. O Brasil, por exemplo, possui larga experiência no uso de reatores lineares com núcleo de ar, empresas como Furnas (*Furnas Centrais Elétricas S. A.*), Cemig (*Companhia Energética de Minas Gerais*) e Eletronorte (*Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A.*) possuem equipamentos dessa natureza, com tensão de trabalho de até 500 KV, para reduzir a corrente de curto circuito em certos pontos de seu sistema.

A Figura 3.2 mostra os diferentes modos de aplicação em sistemas elétricos de um LCC a base de reatores lineares. A melhor localização para o dispositivo depende de um estudo criterioso e específico para o ponto onde se deseja limitar a corrente de curto, conforme [9], devendo-se levar em conta: o valor de corrente que se pretende alcançar; o número de disjuntores que serão beneficiados; as características técnicas de cada alternativa e os custos de cada uma delas.

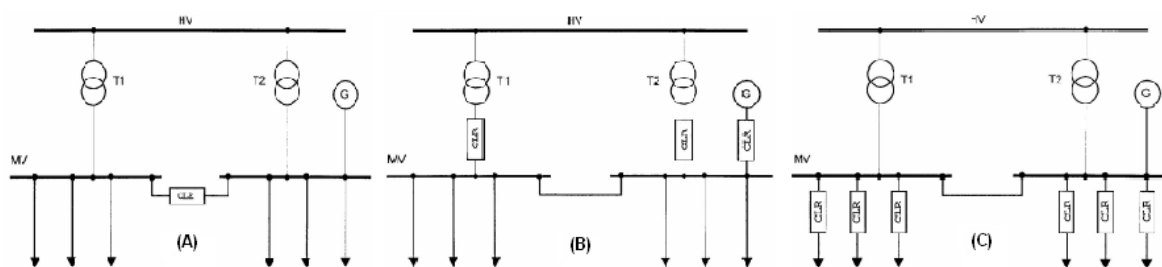


Figura 3.2 - (A) *Acoplamento de barras*; (B) *Em série com as entradas dos alimentadores*; (C) *Em série com as saídas dos alimentadores*.

A Figura 3.2(A) mostra como deve ser realizado o acoplamento de barras através de um LCC para se obter as vantagens de uma melhor divisão da carga para os transformadores, e de uma redução da corrente de curto circuito para a capacidade do sistema. Como desvantagem, essa configuração não permite uma limitação individual na corrente de curto circuito fornecida por cada uma das fontes de alimentação, o que somente

é possível com a configuração da Figura 3.2(B). Nesse arranjo, um LCC é conectado em série com cada uma das fontes, o que proporciona a limitação na contribuição individual das fontes, porém o mesmo exibe, como desvantagem, uma degradação na regulação da tensão do sistema. A Figura 3.2(C) mostra uma outra alternativa para diminuir a corrente de curto circuito, desta vez, utilizando um LCC em série com cada um os ramais de suprimento da carga. Essa configuração é tecnicamente a mais atrativa de todas, pois além das mesmas vantagens oferecidas pelas demais, proporciona uma melhor regulação do sistema.

3.3.2 Técnicas Ativas

Essas técnicas têm por finalidade promover a redução condicionada da corrente de curto circuito, ou seja, o dispositivo deverá permanecer no sistema sem causar qualquer interferência no mesmo durante os períodos de normalidade e somente operar quando da ocorrência de algum defeito. Este objetivo somente é alcançado por meio de dispositivos específicos e que estão agrupados no que tange a natureza dos seus elementos componentes nas seguintes classes:

- Fusíveis Limitadores de Corrente;
- Dispositivos Pirotécnicos;
- Supercondutores;
- Estado Sólido;
- Magnéticos.

Os LCC podem ainda ser caracterizados da seguinte forma:

- Auto-gatilho ou gatilho externo;
- Com ou sem interruptores de corrente;
- Capazes ou não de conduzir a corrente de curto até o tempo de abertura dos disjuntores (validos apenas para dispositivos sem interruptores de corrente);
- Capazes ou não de se auto-restabelecer. Alguns tipos de LCC necessitam de troca de componentes após a operação.

3.3.2.1 Fusíveis Limitadores de Corrente de Curto Circuito

Este dispositivo foi concebido a mais ou menos 100 anos e consiste normalmente de condutores de prata envoltos por uma camada de areia. Como descreve [10], quando a corrente se eleva a um nível indesejado, ocorre o rompimento dos condutores que deixa o ar ionizado no seio da areia. Essa camada de sílica além de conter o arco, mantém uma pressão elevada na sua área de ocorrência e durante a fusão do componente. Isso faz com que o fusível introduza uma resistência muito alta no circuito durante um curto período de tempo, tipicamente centenas de microssegundos, reduzindo, assim, a corrente de curto circuito. A Figura 3.3 mostra um tipo de fusível limitador de corrente de curto.



Figura 3.3 - *Fusível Limitador de Corrente de Curto.*

Seu uso é limitado a tensões de até 36 KV e é empregado basicamente para acoplamento de indústrias ao sistema elétrico.

Este dispositivo possui auto-gatilho, interrompe a passagem da corrente e necessita de troca do elemento para retornar à operação normal após o evento da falta. Uma característica importante deste dispositivo é que o mesmo possui uma alta capacidade para limitação de corrente.

A desvantagem deste equipamento em relação aos demais, além de não apresentar uma auto-restauração, é que, em face da elevada resistência rapidamente incorporada no circuito no instante da operação, surge em seus terminais elevados picos de tensão, que podem danificar outros equipamentos.

3.3.2.2 Dispositivos Pirotécnicos

Este equipamento foi desenvolvido em 1955 e pode ser usado em sistemas de corrente alternada e também contínua. A Figura 3.4 apresenta de forma simplificada a arquitetura desse dispositivo com destaque para as partes principais de sua estrutura física.

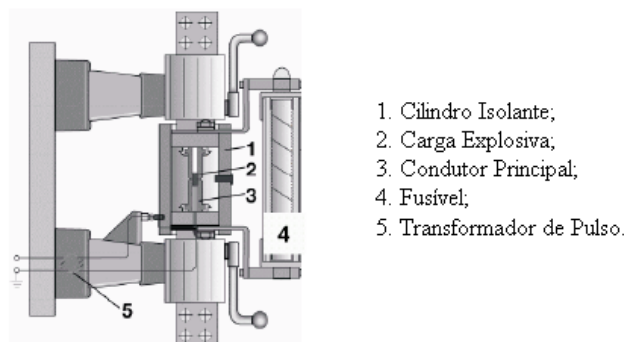


Figura 3.4 - *Dispositivo pirotécnico proposto pela ABB [10].*

Em condições normais, a corrente circula pelo condutor principal do dispositivo, que possui resistência desprezível. Na ocorrência de um curto, um circuito eletrônico envia um comando para a explosão da carga e, por consequência, abrir o contato principal, forçando a corrente circular pelo fusível que está em paralelo com o contato principal. Esse elemento possui uma resistência de valor tal a reduzir a corrente ao nível desejado [10]. Após um tempo pré-definido de passagem da corrente pelo elo fusível, algo em torno de 0,5 ms, este abre interrompendo definitivamente a passagem da corrente. A corrente de curto que atravessa o contato principal é monitorada por um circuito eletrônico que avalia a taxa de crescimento da corrente e fornece o comando para a explosão da carga.

Este tipo de equipamento foi bastante utilizado no Canadá a partir de 1991 [10], pela companhia de eletrificação Manitoba Hydro, mas um incidente em uma das linhas onde estavam instalados alguns desses dispositivos freou seu uso por parte desta empresa. Este equipamento tem seu uso limitado a 36 KV e foi bastante utilizado na conexão de grandes indústrias ao sistema elétrico. Empresas como a Companhia Siderúrgica Nacional, Acesita e Aracruz fizeram uso deste dispositivo para se conectar ao sistema elétrico brasileiro, como forma de reduzir a corrente de curto circuito.

Este dispositivo possui gatilho externo, interrompe a passagem da corrente, e necessita de troca do elemento para retornar a operação normal. Por não inserir de forma

abrupta a resistência no circuito, a elevação de tensão em seus terminais não é tão elevada quanto no dispositivo anteriormente descrito, porém, em compensação seu tempo de resposta é maior em face da presença de um circuito para comandar a operação do dispositivo.

3.3.2.3 Limitadores a Base de Supercondutores

Supercondutividade é uma propriedade física apresentada por certos materiais, que, ao experimentar temperaturas extremamente baixas, inferior a sua temperatura crítica T_c , exibem características particulares como uma resistência nula a passagem da corrente elétrica e um diamagnetismo perfeito, efeito Meissner, com a exclusão de campo magnético em seu interior. Essa característica supercondutora deixa de existir na ocorrência de um ou mais dos seguintes fatores: aplicação de campo magnético externo ao material; elevação da temperatura acima da temperatura crítica T_c ; aplicação de correntes de transporte.

Os dispositivos limitadores usufruem, exatamente, propriedade dos materiais supercondutores de transitar da condição normal de baixa resistência para outra de elevada resistência, quando a corrente através dos mesmos excede um valor crítico. Diversos arranjos foram propostos e classificados em [11] nos seguintes tipos:

- A. Puramente Resistivo;
- B. Ponte de Diodos ou de Tiristores;
- C. Núcleo de Ferro Saturado;
- D. Núcleo de Ferro Blindado.

Os dispositivos que utilizam os materiais supercondutores em sua concepção ainda estão em fase de investigação por meio de protótipos instalados em baixa e média tensão. Algumas empresas do setor elétrico, como as alemãs RWE Net e EnBW, possuem estudos favoráveis a utilização deste tipo de equipamento em seus sistemas [5]. Segundo [11], vários protótipos deste equipamento estão instalados e sendo testados em todo o mundo, com resultados satisfatórios.

A. Puramente Resistivo

Nessa montagem (“*Pure resistive type*”), ilustrada na Figura 3.5, a corrente normal de carga circula diretamente no supercondutor e por exibir um valor inferior ao patamar crítico do material, uma resistência de valor desprezível é inserida no circuito. Na ocorrência de um curto circuito onde a corrente passando pelo supercondutor aumentará além do limite crítico do material, fazendo com que este perca suas características supercondutivas. Nessas circunstâncias, o material interpõe uma resistência de valor tal a limitar a corrente de curto circuito a patamares condizentes com a capacidade dos disjuntores já existentes no local. Essa transição de supercondutor para estado normal de condução é chamado de “*quench*”.

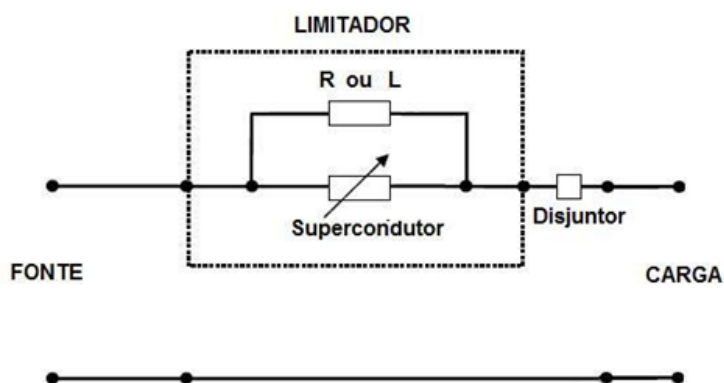


Figura 3.5 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, puramente resistivo.

Na montagem do limitador de curto circuito mostrada na Figura 3.5, uma resistência ou uma reatância é conectada em paralelo com o supercondutor. Essa impedância é imprescindível para o bom funcionamento do dispositivo, pois além de proteger o supercondutor evitando a criação de pontos quentes durante o “*quench*”, ela também é responsável pelo ajuste da impedância total do dispositivo e, conseqüentemente, do valor da corrente limitada. Evita-se, desse modo, sobretensões que possam ocorrer caso a resistência do material supercondutor aumente muito de valor no momento da transição. Também é importante salientar que o defeito precisa ser isolado rapidamente para que a temperatura máxima do supercondutor não seja atingida. Além disso, deve ser esperado um tempo (tempo de resfriamento) para colocá-lo novamente em operação, tempo este que depende do material e da concepção do supercondutor. Esta configuração é dita “*fail-*

safe”, ou seja, se o supercondutor falhar, não ocorrerá maiores danos, além da não limitação da corrente de curto circuito.

Segundo [11], existem vários protótipos deste tipo de equipamento instalados pelo mundo, sendo o de maior tensão conectado em 13.2 KV e com capacidade de condução de corrente de 630 A, projeto idealizado pela empresa KEPRI da Korea, que vem realizando testes nesse equipamento desde 2007.

B. Ponte de Diodos ou de Tiristores

Nesta configuração, a corrente normal de carga não circula diretamente pelo material supercondutor, o que ocorre somente no caso de defeito no sistema. O supercondutor é inserido numa ponte de diodos ou de tiristores que realiza uma retificação de onda completa conforme o esquema mostrado na Figura 3.6.

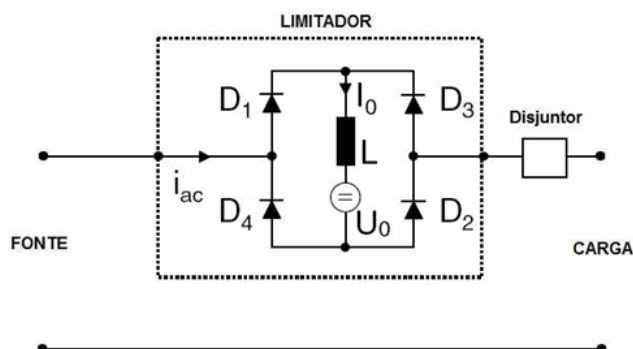


Figura 3.6 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, ponte de diodos.

Essa configuração trabalha de forma que, em regime normal, a corrente contínua I_0 imposta pela fonte U_0 é maior que a corrente de carga I_{ac} do sistema, fazendo com que todos os diodos operem e a corrente de carga não circule pela indutância L do supercondutor. Desde que a queda de tensão nos diodos é insignificante, não existe perdas em regime normal de operação. Por outro lado, na ocorrência de um curto circuito na rede elétrica, a corrente I_{ac} torna-se maior que a corrente I_0 e, em consequência, os diodos D_1 e D_2 conduzem por meio ciclo e os diodos D_3 e D_4 conduzem no outro meio ciclo. Dessa forma a corrente começa a circular pela indutância supercondutora L completando o

processo de limitação da corrente de curto circuito. O valor da corrente a ser limitada pelo dispositivo é, conseqüentemente, ditada pela magnitude da corrente contínua I_0 . Esta configuração oferece alguns benefícios em relação à configuração anterior, como por exemplo:

- A não existência do “*quench*” - o material não transita de supercondutor para condução normal de forma abrupta;
- O dispositivo pode ser recolocado no sistema logo após ter sido chamado a operar;
- Pode ser utilizado um material não supercondutor, apesar das perdas relativamente elevadas produzidas nesse caso.

Em compensação este esquema não é “*fail-safe*”, ou seja, em caso de falha do supercondutor ocorrerá um curto circuito no trecho onde este está localizado.

O protótipo deste tipo de dispositivo instalado em maior nível de tensão encontra-se na antiga União Soviética, projeto idealizado pela General Atomics e instalado em 7.2 KV com capacidade de condução de corrente de 1.2 KA [11].

C. Núcleo de Ferro Saturado

Também neste esquema a corrente de carga não circula diretamente pelo material supercondutor, este é empregado no secundário do dispositivo onde circula uma corrente contínua I_0 . A corrente de carga circula pelo enrolamento primário, que é construído de material ferromagnético. Este esquema está ilustrado da Figura 3.7.

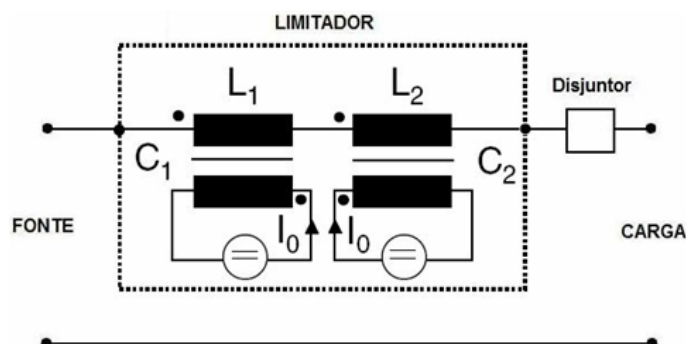


Figura 3.7 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, núcleo de ferro saturado.

Em regime normal de trabalho as correntes são ajustadas de forma que os enrolamentos primário e secundário operam sob intensa saturação e que tenham polaridade oposta, com isso a impedância imposta ao sistema é muito baixa. No caso de ocorrência de uma falta na rede elétrica, os núcleos são retirados do regime de saturação alternadamente e assim são inseridas no sistema as impedâncias L_1 ou L_2 agora com valores significativos, limitando, portanto, a corrente de curto circuito.

Este esquema tem como vantagens ser “*fail-safe*”, permitir um retorno imediato à operação tão logo o sistema seja normalizado e possibilitar o uso de um material não supercondutor, embora com elevação das perdas como no caso anterior da ponte de diodos.

Existe um protótipo deste dispositivo instalado em 3 KV e com capacidade de corrente de 556 A [10].

D. Núcleo de Ferro Blindado

Como mostra a montagem ilustrada na Figura 3.8, esse dispositivo faz uso dos princípios de um transformador, com o primário sendo formado por um enrolamento de cobre comum e o secundário por um material supercondutor.

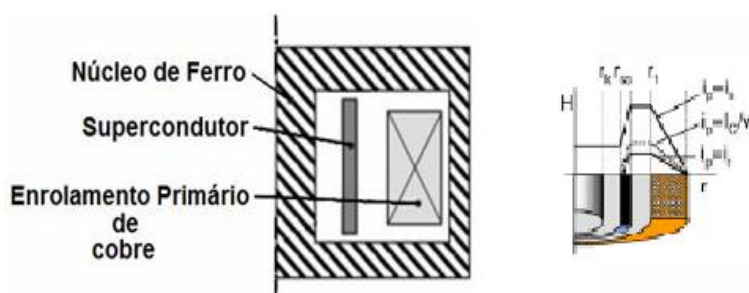


Figura 3.8 - Arranjo físico do limitador com núcleo de ferro blindado [4].

A Figura 3.9 ilustra o princípio de funcionamento do limitador de corrente de curto circuito tipo núcleo de ferro blindado.

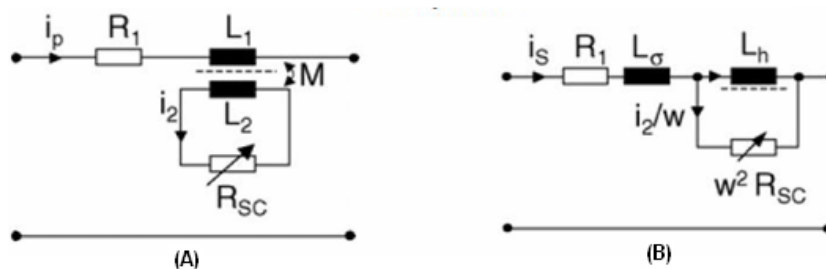


Figura 3.9 - Limitador de curto circuito a base de supercondutores, núcleo de ferro blindado.

Como pode ser visualizado na Figura 3.9(A), a corrente de carga circula no primário e como a corrente é inferior ao limite crítico de corrente do supercondutor cilíndrico, este comporta-se como uma blindagem perfeita para o enrolamento primário. Com isso apenas uma pequena parcela do fluxo penetra no núcleo de ferro, oferecendo ao sistema uma impedância muito pequena, composta da resistência do enrolamento primário com a reatância de dispersão do espaço entre o enrolamento primário e o supercondutor.

Porém, quando ocorre uma falha no sistema, a corrente no supercondutor supera o limite crítico do material provocando a retirada da blindagem do ferro e com isso permitindo a circulação do fluxo e a inserção de uma impedância de valor elevado composta pela indutância de magnetização do ferro em paralelo com a resistência do material supercondutor, como mostra a Figura 3.9(B).

Segundo [10], existe um protótipo deste equipamento sob investigação instalado em 10.5 KV e com capacidade de condução de corrente de 70 A.

É importante salientar que não foi encontrada na literatura pesquisada nenhuma referência de produção em escala industrial de qualquer dos tipos de limitadores com base em materiais supercondutores. É mencionado em [11] a construção de alguns protótipos para testes com resultados promissores, mas, segundo os próprios autores, não é possível apontar qual dos modelos apresentados responderão adequadamente as exigências de um bom desempenho por um preço satisfatório.

3.3.2.4 Limitadores a Base de Elementos de Estado Sólido

A essência destes tipos de limitadores está no funcionamento dos elementos de estado sólido aplicados em sua arquitetura, em geral *tiristores*, cujas características se adequam melhor ao tipo de trabalho previsto para o LCC. O Tiristor é um dispositivo semiconductor com no mínimo quatro camadas semicondutoras numa seqüência P-N-P-N (três junções semicondutoras), que opera em regime de chaveamento e apresenta um comportamento funcional biestável. Os tiristores permitem por meio da adequada ativação do terminal de controle (Gate), o chaveamento do estado de bloqueio para estado de condução, sendo que alguns tiristores permitem também o chaveamento inverso, da condução para o bloqueio. A maioria dos tiristores só se desligam quando a corrente cai abaixo do valor da corrente de manutenção, o que requer o uso de circuitos especiais para promover o desligamento e, por isso, o tipo mais utilizado nos limitadores é o GTO (Gate Turn Off, desligamento pelo Gate). Esse modelo de tiristor permite o desligamento por um pulso negativo de corrente de alta intensidade, obtida, em geral, pela descarga de um capacitor. A Figura 3.10 mostra o símbolo do tiristor, onde o *anodo* e o *catodo* são conectados a rede elétrica e o *gate* é conectado a um circuito externo responsável pelo chaveamento do dispositivo.

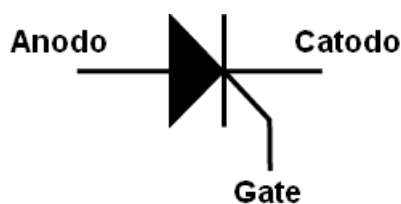


Figura 3.10 - Símbolo esquemático de Tiristores.

Como o próprio nome já indica, os limitadores a base de elementos de estado sólido fazem uso das propriedades dos elementos de estado sólido para exercer o controle do limitador de corrente de curto circuito. A estrutura clássica desse grupo de limitadores está ilustrada na Figura 3.11 e os outros esquemas são basicamente variantes desse modelo.

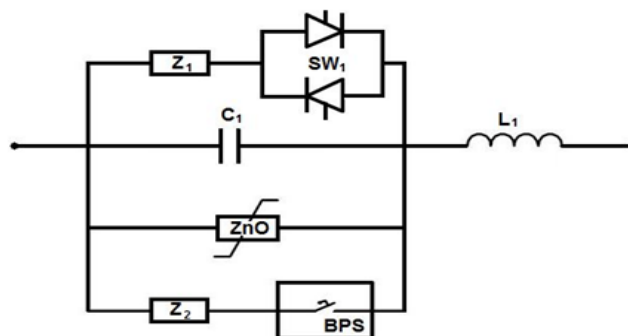


Figura 3.11 - Modelo clássico de um limitador de curto circuito a base de elementos de estado sólido.

A conexão série do capacitor C_1 e do indutor L_1 se constitui na essência do dispositivo. Em condição normal de operação, os tiristores SW_1 funcionam como uma chave aberta, de maneira que, nessas circunstâncias, o LCC introduz no sistema a impedância líquida da conexão série C_1 - L_1 . Desde que, teoricamente, a reatância capacitiva de C_1 é igual à reatância indutiva de L_1 , o LCC reduz-se a resistência ôhmica desses dois elementos, que sendo de pequeno valor não produz qualquer efeito no sistema. Quando a rede elétrica é percorrida por uma corrente elevada, como é o caso de uma falta, a chave SW_1 é acionada removendo o capacitor C_1 e deixando apenas indutor L_1 para que este elemento realize a tarefa de limitar a corrente de curto circuito.

Os demais elementos presentes no diagrama da Figura 3.11, essenciais para um funcionamento seguro do esquema, são o para-raio ZnO, que provê a proteção contra sobretensão do capacitor C_1 , e as impedâncias de pequeno valor Z_1 e Z_2 , as quais limitam as correntes de chaveamento e procedem a descarga do remanescente do capacitor por intermédio da chave BPS .

Protótipos deste tipo de equipamento já se encontram instalados em altos níveis de tensão, como por exemplo, na empresa norte americana Kayenta, onde um dispositivo de 330 Mvar está conectado em 230 KV.

Algumas variantes desta arquitetura são propostas como forma de, além de limitar a corrente de curto, realizar uma compensação série no sistema. São elas:

- A. Disposição Série Realizando Compensação Série;
- B. Disposição Paralelo Realizando Compensação Série;
- C. Disposição Série/Paralelo Realizando Compensação Série;
- D. Disposição sem Capacitor.

A. Disposição Série Realizando Compensação Série

Muitas vezes, é recomendado que a reatância capacitiva do limitador seja um pouco maior que a reatância indutiva, como propõe [12], para que, em regime normal de operação, o LCC funcione aos moldes de uma compensação série na linha de transmissão associada ao dispositivo e com isso ensejar uma elevação da capacidade de transmissão da mesma. Essa variante de limitador é similar ao modelo da Figura 3.11, alterando-se apenas o valor da reatância capacitiva do LCC, que, nesse caso, será superior a reatância indutiva, para que o mesmo cumpra o papel de um compensador longitudinal.

Este tipo de limitador de curto circuito proporciona alguns outros benefícios que aqueles dos limitadores comuns:

- Rapidez de resposta do conjunto de elementos sólidos, não só na atuação para limitar a corrente de curto circuito, mas também no retorno ao seu estado normal de operação como compensador da linha de transmissão;
- Nenhuma perda em estado normal de operação, pois a corrente de carga do sistema não circula pelos dispositivos de estado sólido;
- Limitação da taxa de elevação de corrente no tiristor e proteção do capacitor contra sobretensões simultaneamente;
- Melhor aproveitamento do dispositivo com a opção de compensação série da linha de transmissão correspondente, o que, além de elevar a capacidade de transmissão, introduz melhorias na estabilidade do sistema.

Apesar de todas estas vantagens, essa configuração poderá dar lugar a alguns problemas que exigem soluções particulares, como a ocorrência de sobretensões no capacitor, que requer um dimensionado adequado do para-raio, a possibilidade de ressonância do capacitor com a reatância equivalente do sistema no ponto de conexão e o grau de limitação da corrente em função da magnitude da falha.

B. Disposição Paralelo Realizando Compensação Série

Este esquema trás uma modificação em relação à estrutura clássica apresentada no tópico anterior. A proposta estabelecida em [13] é trocar a ligação série do esquema anterior por uma ligação paralela do capacitor C com o indutor L como exhibe a Figura 3.12.

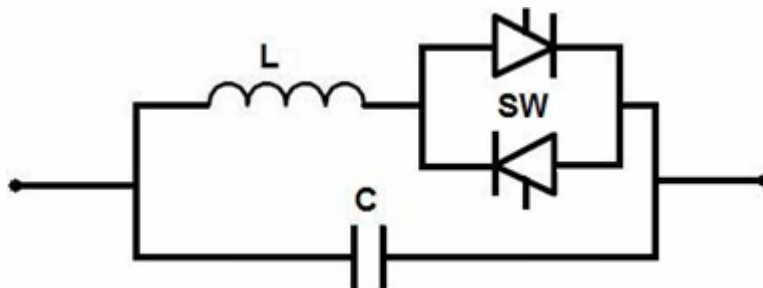


Figura 3.12 - *Ligação paralela de limitadores de curto circuito a base de elementos de estado sólido.*

O princípio de funcionamento deste modelo é semelhante ao apresentado no tópico anterior, com o capacitor C realizando uma compensação série em condições normais de funcionamento do sistema, já que, com a chave SW aberta, o indutor L encontra-se-á fora de operação. Ocorrendo uma falha no sistema elétrico, a chave SW passa a conduzir, inserindo o indutor L no sistema que forma com o capacitor C um circuito ressonante de elevada impedância, reduzindo com isso a intensidade da corrente aos patamares desejáveis.

Esse método limita a corrente através de uma alta impedância, fruto da ressonância LC em paralelo, contudo provoca tensões e correntes excessivas no capacitor.

C. Disposição Série/Paralelo Realizando Compensação Série

Essa proposta feita em [14] modifica a topologia da Figura 3.12 dividindo o indutor L em duas partes, L_1 e L_2 , o primeiro em paralelo com o capacitor C e o segundo em série com o conjunto formado por L_1 e C , conforme mostra a Figura 3.13.

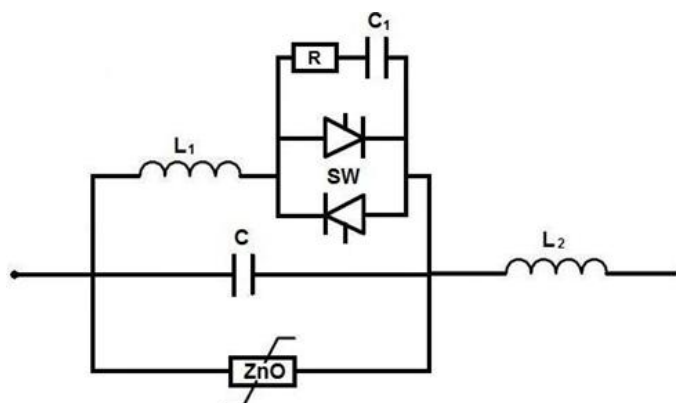


Figura 3.13 - *Ligação série/paralela de limitadores de curto circuito a base de elementos de estado sólido.*

Com o sistema em operação normal, a chave SW manteria o ramo do circuito com o indutor L_1 inativo, de modo que a impedância do limitador seria determinada pela combinação em série dos elementos L_2 e C . Esses componentes seriam, então, projetados para oferecer uma reatância de natureza capacitiva e com um valor tal que satisfizesse o grau de compensação desejado para o sistema. Por sua vez, o indutor L_1 somente seria introduzido no circuito por ocasião de uma falha, podendo, em conjunto com o capacitor C e de acordo com o ajuste do ângulo de disparo dos tiristores, exibir uma impedância de magnitude apropriada para conter os níveis de curto circuito no patamar requerido. No diagrama da Figura 3.13 também foram incluídos a proteção de sobretensão tanto do capacitor, formada pelo para-raio de óxido de zinco ZnO, como dos tiristores, representado pelo circuito “snubber” composto da resistência R em série com o capacitor C_1 .

Esta configuração se destaca perante as outras pelas seguintes vantagens:

- Melhora a qualidade da energia transmitida, a estabilidade do sistema e a capacidade de transmissão da linha onde está inserido;
- Exibe uma perda nula nos tiristores, pois a corrente de carga não circula diretamente por eles em regime normal de operação;

- Amplia a função do dispositivo, já que, além de limitar a corrente de defeito, o mesmo também realiza uma compensação série da linha;
- Não produz sobretensão através do capacitor;
- Exibe uma resposta rápida, graças ao controle realizado pelos tiristores, tanto para limitar a corrente de curto, quanto para o retorno à função de compensação série da linha quando a falha for eliminada.

D. Disposição sem Capacitor

Uma outra configuração do limitador utilizando elementos de estado sólido é proposto em [15], e inova pela não utilização do capacitor que se faz presente nos esquemas apresentados anteriormente para os demais membros dessa família de LCC, como se verifica na Figura 3.14.

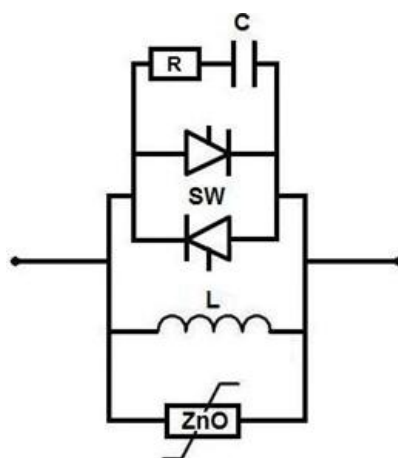


Figura 3.14 - Esquema de ligação de um limitador de curto circuito a base de elementos de estado sólido que não apresenta o capacitor.

Sem contar com o capacitor que operava junto com o indutor série e/ou paralelo das demais configurações, a chave SW é posicionada em paralelo com o indutor L, como indica a Figura 3.14, e passa a exercer o comando de entrada e saída do mesmo de acordo com a seguinte regra:

- I. No funcionamento normal da rede elétrica, a chave SW permanecerá fechada, eliminando, assim, o indutor L do circuito;
- II. Na condição de falta na rede elétrica, a chave SW será comutada para a posição aberta, introduzindo o indutor L diretamente na trajetória de circulação da corrente de curto circuito para, assim, conter o crescimento da mesma.

A Figura 3.14 também contempla os dispositivos de proteção contra sobretensão exigidos para um circuito dessa natureza, a saber, o para-raio de óxido de zinco (ZnO), e o circuito “*snubber*” formado pela resistência R em série com o capacitor C.

Este esquema possui algumas desvantagens em relação aos outros dispositivos analisados até o presente momento, como, por exemplo, a impossibilidade de compensação série da linha com o sistema em estado permanente, já que este esquema não trabalha com o capacitor especificado para essa função, ou ainda as perdas relativamente altas nos tiristores, já que em estado permanente a corrente de carga circula diretamente por estes elementos.

A despeito da vasta literatura abordando a aplicação da tecnologia de estado sólido para o desenvolvimento de limitadores de corrente de curto circuito, uma fração da qual foi alvo da presente investigação, nenhum grande fabricante do setor eletroeletrônico, no momento, parece inclinado para o tema, conforme descrito em [11]. Segundo esses autores, enquanto no passado grande parte dessas empresas dispunha de um projeto de grande porte para tais limitadores de corrente, na atualidade, apenas a *Electric Power Research Institute* (EPRI) mantém uma equipe de pesquisa em franca atividade.

Por outro lado, pode ser observada em um catálogo da Siemens [16], a oferta de um limitador de corrente de curto circuito aos moldes daquele ilustrado na Figura 3.11. A referência [17] descreve justamente a aplicação com sucesso de um desses limitadores na subestação de *Kayenta da Western Área Power Administration* (WASA) em operação desde 1992.

De acordo com grande parte dos autores compulsados, no estágio atual, os limitadores a base de elementos de estado sólido ainda exibem um elevado custo para a aquisição e a instalação, além de não oferecer uma confiabilidade compatível com aquela requerida pelas redes elétricas, ainda exige um conjunto bastante complexo de serviços auxiliares.

3.3.2.5 Limitadores a Base de Materiais Magnéticos

Esta família de dispositivos limitadores da corrente de curto circuito de uma rede elétrica utiliza a característica magnética de certos materiais, ilustrada na Figura 3.15, para realizar o controle do circuito.

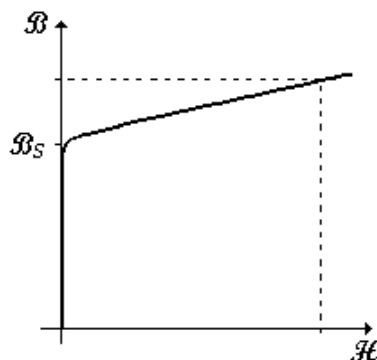


Figura 3.15 - *Característica de Magnetização dos materiais utilizados nos limitadores magnéticos.*

Dois tipos de limitadores magnéticos da corrente de curto circuito estão descritos na literatura especializada:

- A. Limitadores Magnéticos com Material Ferromagnético Mole;
- B. Limitadores Magnéticos com Material Magnético Duro.

A. Limitadores Magnéticos com Material Ferromagnético Mole

O primeiro registro de um limitador de corrente de curto circuito que utiliza a característica magnética de um material ferromagnético como elemento de controle do circuito é descrito em [18]. O dispositivo descrito por tais autores, cuja arquitetura básica está ilustrada na Figura 3.16, emprega o princípio da ressonância série entre o capacitor C e o indutor de núcleo de ar L para, em condições normais de operação do sistema de potência, oferecer uma impedância praticamente nula a passagem da corrente de carga do sistema. Nessa condição, a tensão estabelecida nos terminais do capacitor C é inferior à tensão de início de saturação do reator RNS , de modo que esse componente solicita uma

corrente extremamente reduzida, funcionando, portanto, como uma chave aberta. Quando, por outro lado, a corrente na rede elétrica se eleva em decorrência de um curto circuito, a queda de tensão no capacitor C também se eleva, impondo ao reator RNS um regime de intensa saturação. Nesse estado operacional, o reator RNS apresenta uma impedância muito baixa, representando, assim, o papel de uma chave fechada. O capacitor C será, nessa circunstância, removido do circuito, de modo que o indutor L poderá, agora, exercer a função de limitação da corrente de curto circuito. Outros componentes, que não foram incluídos na Figura 3.16 para não tirar de foco os princípios de funcionamento do limitador, são também importantes para assegurar a perfeita funcionalidade do conjunto e serão abordados com mais detalhes posteriormente.

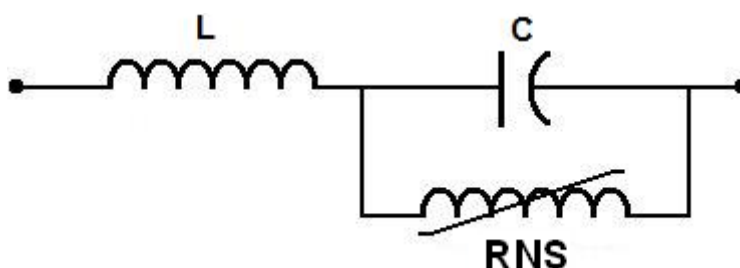


Figura 3.16 - Arquitetura básica de um limitador magnético.

B. Limitadores Magnéticos com Material Magnético Duro

Recentemente, outro modelo de limitador de corrente de curto circuito, dessa vez controlado pelas propriedades magnéticas dos materiais magnéticos duros, foi descrito em [19], como parte da pesquisa em curso na *Areva Technology Center*. O dispositivo é formado por uma bobina, conectada em série com o sistema de potência, envolvendo um núcleo com um entreferro preenchido por um ímã permanente, tal como mostra a Figura 3.17(A). Na ausência de um defeito, a corrente circulando na bobina produz um campo magnético de intensidade inferior ao campo magnético coercitivo \mathcal{H}_c do ímã, de modo que o conjunto opera em uma característica de baixa permeabilidade, μ_N , linha pontilhada da Figura 3.17(B), e, portanto, comporta-se como uma pequena indutância. Quando um curto circuito toma lugar, a elevação experimentada pela corrente é suficiente para criar um campo magnético que supera o campo coercitivo, magnetizando o ímã permanente. O

dispositivo funciona, agora, em uma característica de alta permeabilidade, μ_{CC} , linha tracejada da Figura 3.17(B), oferecendo, portanto, uma alta indutância à passagem da corrente.

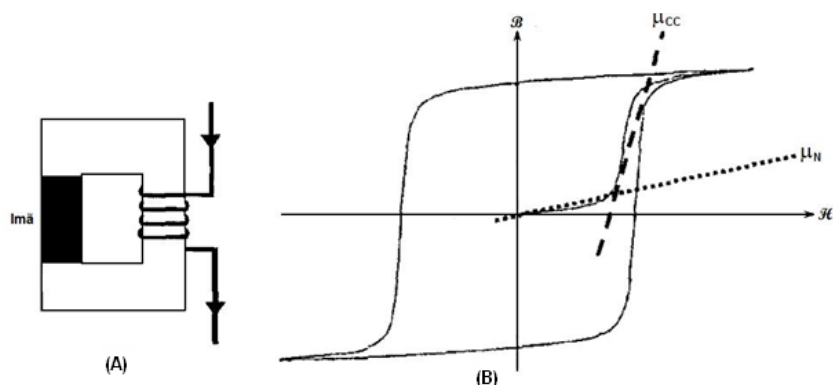


Figura 3.17 - (A) Circuito magnético, (B) Características operacionais.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível observar que o problema da elevação da corrente de curto circuito nos sistemas elétricos tem se tornado cada vez mais grave, motivando diversos pesquisadores a desenvolver dispositivos ou metodologias capazes de reduzir essa corrente. Esses dispositivos utilizam diversas tecnologias, cada uma com suas características de funcionamento, vantagens e desvantagens. Algumas dessas técnicas já são utilizadas desde longa data por varias empresas, outras estão ainda em nível de propostas capazes de desempenhar o mesmo papel com maior eficiência e com outros ganhos, como: compensação série do sistema; melhora da qualidade da energia e redução de custos.

4

ARQUITETURAS DE LCC COM BASE EM RNS

4.1 INTRODUÇÃO

Como comentado no capítulo anterior, este tipo de limitador de curto circuito faz uso da característica magnética dos reatores naturalmente saturados, especificamente os reatores com saturação natural conectados em série, para controlar a entrada e a saída de operação do equipamento. Como revela [20], as estruturas magnéticas saturadas eram frequentes já nos anos de 1930 como multiplicadores magnéticos de frequência, equipamentos bastante utilizados na época para a transmissão de sinais de rádio. Os primeiros multiplicadores magnéticos de frequência tinham como saída o triplo da frequência de entrada (*Frequency Triplers*) e exibiam algumas vantagens importantes com relação aos outros tipos de multiplicadores: eram mais robustos, apresentavam uma alta confiabilidade e possuíam uma durabilidade elevada. Todavia, devido à pobre qualidade dos materiais magnéticos disponíveis na época, equipamentos de outra natureza, como os eletrônicos que experimentavam então grande evolução, conquistaram pouco a pouco mais espaço. Mais tarde, com a melhoria nas propriedades dos materiais magnéticos, os multiplicadores magnéticos voltaram a uma posição de relevo, sendo utilizados também como base para outros dispositivos. Na atualidade, as estruturas magnéticas saturadas são úteis em vários segmentos da engenharia, podendo-se destacar:

- Multiplicadores de frequência acima de três vezes a frequência de entrada [21];
- Estruturas magnéticas saturadas de múltiplos núcleos para regulação de tensão [21];
- Estruturas magnéticas saturadas de múltiplos núcleos para supressão de variações rápidas de tensão [22];
- Auto-regulador magnético de tensão [23];

- Estruturas saturadas conectadas em série desempenhando a função de limitador de corrente de curto circuito, tema que motiva esta dissertação.

O uso de reatores naturalmente saturados em dispositivos limitadores de corrente de curto circuito começou com a *GEC Switchgear Ltd.*, empresa sediada na Inglaterra e pertencente ao conglomerado da *GEC (General Electric Company)*. Conforme [18], pelo menos 7 (sete) desses limitadores com potência de até 10 MVA e tensão nominal de 10 kV foram destinados a aplicações como o acoplamento de barras de subestações e para a conexão de pequenas fontes de geração em redes elétricas de grande porte.

A característica de magnetização para um núcleo ferromagnético tem a forma apresentada na Figura 4.1.

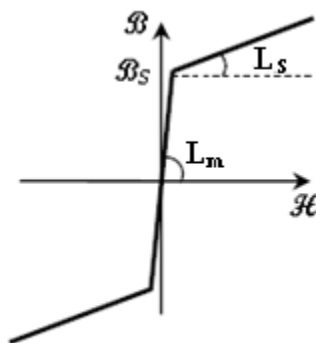


Figura 4.1 - *Característica de magnetização de materiais ferromagnéticos.*

É evidente na Figura 4.1 que, a partir do valor de indução magnética \mathcal{B}_s , o material entra em regime de intensa saturação, modificando a inclinação da sua curva normal de magnetização. O princípio de funcionamento dos reatores saturados é baseado exatamente nessa curva $\mathcal{B} \times \mathcal{H}$, atributo intrínseco dos materiais ferromagnéticos. Um dispositivo formado por um núcleo desse material e excitado por um enrolamento apresentará uma característica de magnetização $\lambda \times i$ obtida diretamente da curva $\mathcal{B} \times \mathcal{H}$ pelas operações indicadas na Figura 4.2.

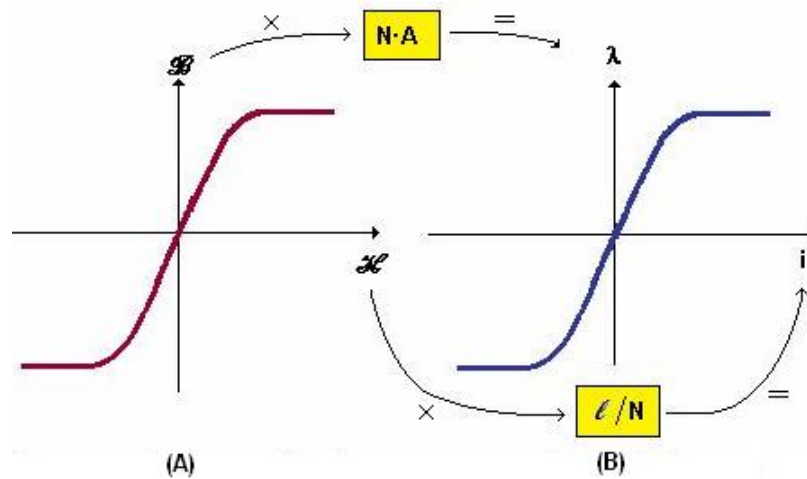


Figura 4.2 - (A) Curva $B \times \mathcal{H}$ dos materiais ferromagnéticos; (B) Curva $B \times \mathcal{H}$ transformada para $\lambda \times i$

Como mostra a Figura 4.2, o fluxo concatenado (λ) e a corrente (i) são obtidas pela definição do fluxo de enlace:

$$\lambda = \mathcal{N} \mathcal{B} A \quad (4.1)$$

e pela lei de Ámpere,

$$i = \frac{\mathcal{H} \times \ell}{\mathcal{N}} \quad (4.2)$$

A característica externa de um dispositivo assim formado, relação $v \times i$, pode ser determinada imediatamente da curva $\lambda \times i$ pelo uso da Lei de Faraday que prescreve:

$$v = \omega \times \lambda \quad (4.3)$$

A Figura 4.3 mostra uma curva $v \times i$ idealizada, onde podemos observar que para valores de tensão abaixo da tensão de saturação (V_s), o reator comporta-se como uma chave aberta, pois uma reatância elevada é introduzida no circuito, e para valores de tensão acima da tensão de saturação (V_s), o reator comporta-se como uma chave fechada, pois uma reatância muito pequena é introduzida no circuito.

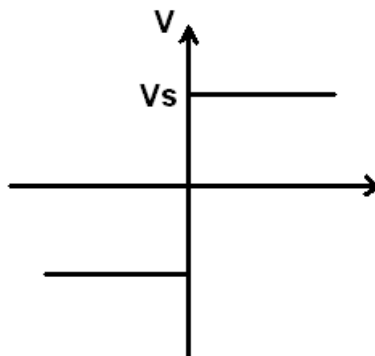


Figura 4.3 - Característica $v \times i$ idealizada de um reator.

Esse comportamento ora permissivo ora proibitivo para a passagem plena da corrente será utilizado para exercer o controle da entrada ou da saída de impedâncias destinadas à limitação das solicitações ocasionadas pelos curtos circuitos. Baseado na arquitetura do LCC proposto pela *GEC*, algumas variantes são aqui propostas no intuito de obter resultados mais apropriados para cada aplicação.

4.2 FAMÍLIA DE ARQUITETURAS

As diferentes e inovadoras proposições para o arranjo básico do LCC foram concebidas supondo-se que o reator com saturação natural, RNS de agora por diante, será capaz de exercer dois papéis distintos. O primeiro desses papéis é justamente aquele para o qual o RNS foi originalmente criado e explorado comercialmente pela *GEC*, qual seja de manter a tensão constante nos terminais quando um regime de saturação é imposto ao mesmo. A característica operacional de um RNS assim produzido está registrada na Figura 4.4, a qual assinala que esse dispositivo solicitará um valor inexpressivo de corrente da fonte sempre que a tensão situar-se abaixo da magnitude V_s , designada de tensão de início de saturação. Nessa condição operacional, portanto, o RNS exibirá uma elevada impedância, podendo, assim ser tratado nos moldes de uma chave aberta. Por outro lado, para tensões acima de V_s , o funcionamento do RNS muda radicalmente, passando o mesmo a demandar uma elevada corrente em face da redução significativa da impedância do mesmo. Em tal situação, como essa impedância pode ser feita tão pequena quanto se queira, inclusive nula com o concurso de um capacitor externo, o RNS será representado

por uma chave na posição fechada. Esse comportamento ora permissivo ora proibitivo para a passagem plena da corrente será utilizado para exercer o controle da entrada ou da saída de impedâncias destinadas à limitação das solicitações ocasionadas pelos curtos circuitos. As arquiteturas fundamentadas nesse princípio serão doravante designadas como pertencentes ao tipo A.

Apesar das arquiteturas designadas neste trabalho como pertencentes ao tipo A desfrutarem da mesma filosofia de trabalho proposta inicialmente pela GEC, onde o RNS exerce o controle do dispositivo funcionando ora como uma chave aberta, ora como uma chave fechada, dependendo do estado operacional do sistema onde está instalado, as novas propostas de montagem das arquiteturas pertencentes a este grupo traz algumas inovações altamente positivas no sentido de melhorar a operação do dispositivo e fazer com que este possa ser utilizado com outros propósitos, como por exemplo, compensador série.

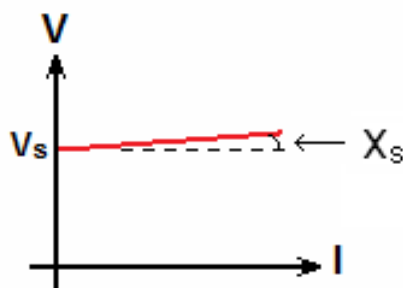


Figura 4.4 - Curva $v \times i$ para os modelos de LCC com RNS pertencentes ao tipo A.

O segundo papel reservado para o RNS decorre dos estudos desenvolvidos no âmbito do LDSP, os quais demonstraram que o valor da impedância apresentada por um RNS, após a entrada em saturação, pode ser controlado por intermédio de diversos elementos internos. O uso de enrolamentos adicionais apropriadamente conectados e secundados por reatâncias adequadamente dimensionadas tem destacada atuação para esse fim. Como consequência, parece perfeitamente factível projetar um RNS que exiba a característica da Figura 4.5, onde, como no Tipo A, até que a tensão nos terminais do mesmo não ultrapasse o valor de saturação V_s , esse dispositivo se comporte tal qual uma chave na condição aberta. Por outro lado, após a tensão superar V_s , o RNS seria posto em saturação, funcionando, nesse caso, como uma impedância X_s inserida no circuito. Em tais circunstâncias, com a escolha de um valor apropriado para a impedância X_s , as correntes de curto circuito poderiam ser limitadas na intensidade prescrita sem o uso de elementos

externos para essa função. A família de arquiteturas que faz uso de um RNS com o comportamento descrito será denominada de Tipo B.

Como descrito acima, os dispositivos designados como pertencentes a este grupo possuem filosofia de trabalho bem diferente dos que pertencem ao tipo A, comprovando o ineditismo das arquiteturas pertencentes ao tipo B. Estas montagens podem trazer alguns benefícios em relação aos pertencentes ao tipo A, principalmente no que diz respeito aos custos com o equipamento.

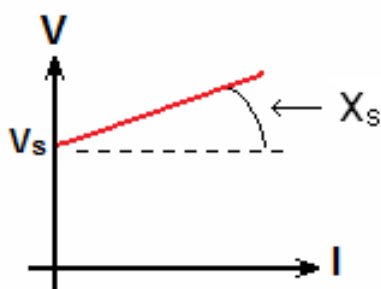


Figura 4.5 - Curva $v \times i$ para os modelos de LCC com RNS pertencentes ao tipo B.

4.3 ARQUITETURAS TIPO A

O funcionamento do RNS como uma chave de controle possibilita que esse dispositivo seja utilizado tal quais as chaves eletrônicas GTO (Gate-Turn-Off) das montagens pertencentes ao rol dos LCC de estado sólido. Nesses termos, praticamente todas as arquiteturas já desenvolvidas para tal tipo de LCC podem ser consideradas como potencialmente viáveis também com a aplicação de um RNS em substituição aos GTO. Entre as diferentes montagens propostas, três arranjos se destacam como os mais promissores para o presente objetivo e estão descritas a seguir.

4.3.1 Arquitetura Tipo A1

O modelo enquadrado nessa categoria é formado de um indutor, X_L , em série com um capacitor, X_C , ao qual está conectado em paralelo o RNS de controle, tal como assinala a Figura 4.6. É importante registrar que essa foi a arquitetura concebida e comercializada pela GEC nos anos 70 do século passado.

O funcionamento de um LCC dispondo do arranjo mostrado na Figura 4.6 obedecerá às seguintes regras:

Condições Normais de Operação - Quando a corrente é igual ou menor que um valor pré-determinado, a tensão nos terminais do RNS é inferior a V_s , de modo que o indutor X_L e o capacitor X_C encontram-se em série no circuito. Nesse caso, duas situações são visualizadas:

- $X_L = X_C$, o circuito é do tipo ressonante em série, de sorte que a impedância do conjunto é nula e, conseqüentemente, o LCC não produzirá qualquer queda de tensão na rede elétrica. Essa foi a proposta do dispositivo comercializado pela GEC;
- $X_L < X_C$, o circuito exibe uma reatância líquida capacitiva, cujo valor deverá ser escolhido para proporcionar, quando desejada, uma compensação série para a rede elétrica. Esta é a novidade que esta montagem oferece em relação ao dispositivo da GEC, podendo este equipamento, projetado desta forma, funcionar como um compensador série ou como um auto regulador magnético de tensão.

Condições de Curto Circuito – Sempre que a tensão nos terminais do capacitor X_C ultrapassar o valor definido para o início de saturação do RNS, V_s , esse dispositivo funcionará como uma chave fechada, produzindo, em conseqüência, um “by-pass” no capacitor X_C . Nessa circunstância, o indutor X_L estará inserido inteiramente no circuito, podendo promover, então, a limitação da corrente em circulação no

mesmo. Para isso, a reatância desse indutor deverá ser definida de sorte a ensejar a redução pretendida na corrente.

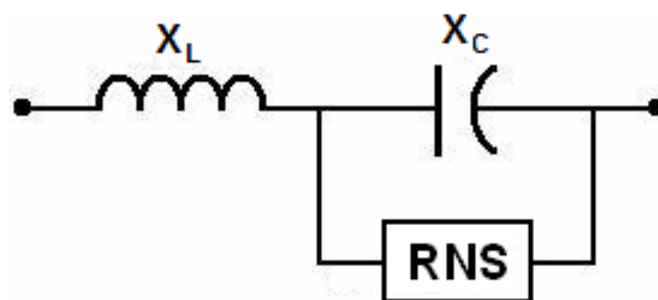


Figura 4.6 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo A1.

4.3.2 Arquitetura Tipo A2

Uma alternativa distinta de conexão dos mesmos elementos da arquitetura anterior é apresentada na Figura 4.7, onde, agora, o capacitor X_C encontra-se em paralelo com o indutor X_L ao invés da ligação série da Figura 4.6. O RNS, por sua vez, posiciona-se em série com o indutor X_L para que exerça o controle de entrada e saída do mesmo.

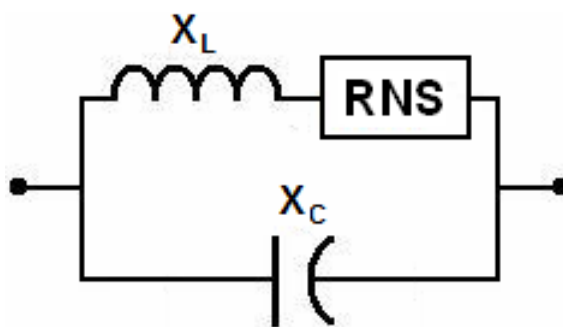


Figura 4.7 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo A2.

Um LCC exibindo essa arquitetura apresentará o seguinte comportamento operacional:

Condições Normais de Operação – Estando a corrente abaixo de um dado valor, a tensão nos terminais do RNS será inferior a V_s e, este, portanto, comportar-se-á como uma chave aberta, mantendo o indutor X_L fora do circuito. O capacitor X_c funcionará, nessa circunstância, como compensação série para a rede, devendo ser, portanto, dimensionado para essa função. O dispositivo montado desta forma só pode ser utilizado em pontos que necessitem de compensação série;

Condições de Curto Circuito – A elevação da corrente da rede elétrica por conta de um curto circuito produzirá o disparo do RNS, exatamente quando a tensão nos terminais do capacitor X_c superar V_s .

$$V_C \geq V_L + V_S \quad (4.4)$$

O indutor X_L será, então, inserido no circuito, o que resultará numa impedância final dada por:

$$jX_{LCC} = \frac{jX_L \cdot jX_C}{jX_L - jX_C} \quad (4.5)$$

$$X_{LCC} = -\frac{X_L \cdot X_C}{X_L - X_C} \quad (4.6)$$

Observa-se na Equação (4.6) que o valor da reatância capacitiva deverá sempre ser superior à reatância indutiva para que resulte num valor de X_{LCC} positivo, ou seja, indutivo. A princípio, essa grandeza poderá se tornar, pela escolha apropriada das impedâncias dos componentes, tão grande quanto se queira e, assim, proporcionar a redução desejada na corrente de curto circuito.

A vantagem desta montagem com relação ao tipo A1 é que as reatâncias do banco de capacitores e do reator linear devem possuir valores menores no tipo A2 quando utilizados nas mesmas circunstâncias, devendo nos dois casos realizarem compensação série.

4.3.3 Arquitetura Tipo A3

Essa arquitetura difere daquela descrita como A2 no tópico anterior pelo uso de dois indutores ao invés de um único. O primeiro, X_{L2} , colocado em idêntica posição do indutor X_L da montagem A2, e o segundo, X_{L1} , posto em série com o conjunto formado pelo capacitor X_C e o primeiro indutor. Esse arranjo está ilustrado na Figura 4.8.

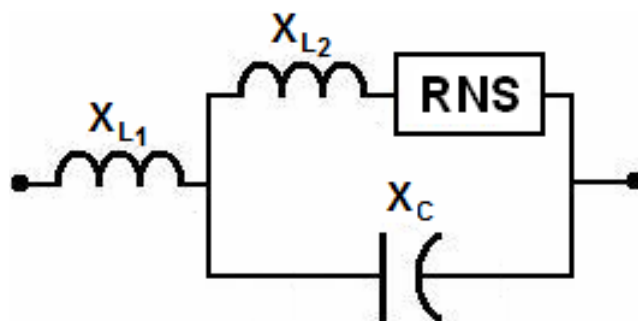


Figura 4.8 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo A3.

Com essa conformação, o LCC será regulado pelas seguintes regras de funcionalidade e possuirá as vantagens inerentes aos dois tipos de arranjo descritos anteriormente:

Condição Normal de Operação – Sendo a corrente da rede elétrica igual ou inferior ao valor limite estipulado, a tensão nos terminais do RNS será inferior a V_s , de modo que esse elemento, por comportar-se como uma chave aberta, manterá o indutor X_{L2} desconectado do circuito. O capacitor X_C , agora combinado com o indutor X_{L1} , poderá exercer um papel duplo, se, como na configuração A1, adotar-se:

- $X_{L1} = X_C$, o circuito será ressonante com impedância nula para rede e, desse modo, não produzindo qualquer efeito sobre o circuito;
- $X_{L1} < X_C$, a reatância líquida será de natureza capacitiva e com um valor selecionada para proporcionar a compensação série desejada para a rede elétrica.

Condição de Curto Circuito – Por ocasião do curto circuito, a elevação da corrente da rede elétrica promoverá a atuação do RNS, através do crescimento da tensão nos terminais do capacitor X_c além do valor de saturação V_s . O indutor X_{L2} , agora inserido no circuito pelo fechamento da chave representada pelo RNS, importará na seguinte impedância à circulação da corrente:

$$X_{LCC} = X_{L1} - \frac{X_{L2}X_C}{X_{L2} - X_C} \quad (4.7)$$

A possibilidade de ajuste do parâmetro X_{L2} na equação acima permitirá que a escolha da magnitude de X_{LCC} seja a mais adequada para cada aplicação. Outro propósito desta montagem é que, podem ocorrer casos em que as montagens A1 e A2 não atendam satisfatoriamente as necessidades desejadas, e como a montagem A3 possui um ajuste melhor de seus parâmetros para realizar as mesmas funções que as outras duas configurações, esta pode ser uma alternativa positiva, apesar de, em princípio, ser uma opção economicamente mais onerosa.

4.4 ARQUITETURAS TIPO B

A família de arquiteturas desse tipo emprega o RNS ora como uma chave aberta, quando fora da saturação, ora como um indutor, quando posto em regime de intensa saturação. Num exame preliminar, tais arquiteturas parecem oferecer vantagens econômicas importantes quando confrontadas com a família do Tipo A, pois dispensaria o uso de indutores limitadores, função agora exercida pela combinação do capacitor e do próprio RNS. Por outro lado, perde um pouco da versatilidade oferecida pelo Tipo A, pois somente as montagens do RNS em paralelo com um capacitor são factíveis, como será descrito a seguir.

4.4.1 Arquitetura Tipo B1

O circuito básico para essa arquitetura é apresentado na Figura 4.9, onde o RNS de reatância X_S está conectado em paralelo com um capacitor X_C .

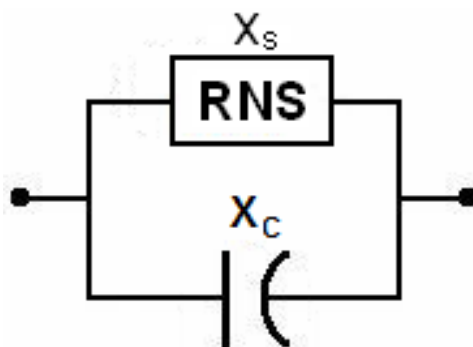


Figura 4.9 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo B1.

A configuração da Figura 4.9 deverá exibir, em termos gerais, o seguinte funcionamento:

Condição Normal de Operação – Estando a corrente no circuito abaixo de um dado limite estabelecido, a tensão nos terminais do capacitor X_C e do RNS será inferior a V_s , de modo que apenas o primeiro estará inserido no circuito. Portanto, a reatância do mesmo deverá ser dimensionada para promover a compensação série desejada para a rede elétrica.

Condição de Curto Circuito – No curto circuito, a elevação da corrente da rede elétrica motivará a entrada em operação do RNS pela ultrapassagem da tensão de saturação V_s . O dispositivo exibirá, agora, uma impedância dada por:

$$X_{LCC} = -\frac{X_S \cdot X_C}{X_S - X_C} \quad (4.8)$$

Essa impedância poderá, então, ser fixada na magnitude tida como a mais indicada para cada local da aplicação, através de uma escolha apropriada do valor da reatância X_S , já que X_C foi fixada para a função de compensação série.

Apesar desta alternativa só poder ser utilizada em pontos que necessitem de compensação série, esta é uma opção economicamente bastante atraente, por dispor de um elemento a menos que as outras montagens.

É verificado que esta é uma proposta inédita quando comparada com as outras montagens que utilizam o RNS como elemento de controle do dispositivo ou que utilizem qualquer técnica para reduzir a corrente de curto, conforme exposto no capítulo 3.

4.4.2 Arquitetura Tipo B2

Essa é uma variante da arquitetura B1, obtida pela inclusão de um indutor adicional X_L em série com a montagem anteriormente apresentada, como está ilustrado na Figura 4.10.

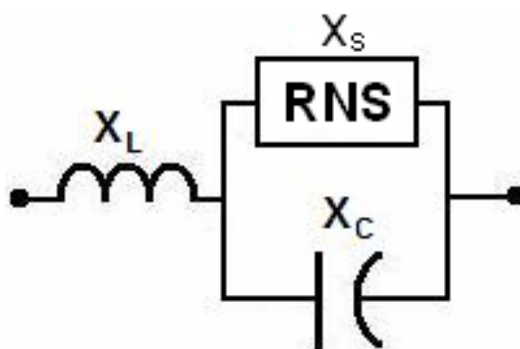


Figura 4.10 - Esquema de montagem da arquitetura do tipo B2.

O comportamento previsto para o circuito da Figura 4.10 estará sujeito às seguintes regras básicas:

Condição Normal de Operação – Sem a presença de qualquer distúrbio na rede elétrica, a corrente através da capacitância X_C é insuficiente para produzir uma tensão nos terminais do RNS superior a V_s , de sorte que o mesmo funcionará como uma chave aberta. A impedância do dispositivo será, portanto, dada pelo indutor X_L em série com o capacitor X_C :

$$X_{LCC} = X_L - X_C \quad (4.15)$$

Esses elementos poderão ser dimensionados de dois modos, como já foi descrito para as arquiteturas A1 e A3:

- $X_L = X_C$, tornando o circuito ressonante e, portanto, sem produzir qualquer queda de tensão na rede;
- $X_L < X_C$, com uma reatância líquida capacitiva e de valor apropriado para exercer o papel de uma compensação série para a rede elétrica.

Condição de Curto Circuito – No curto circuito, a corrente no capacitor X_C será suficiente para elevar a tensão além do valor de saturação V_s e, assim, o RNS comportar-se-á como uma reatância indutiva X_S . Nessas circunstâncias, a impedância do dispositivo será dada por:

$$X_{LCC} = X_L - \frac{X_S \cdot X_C}{X_S - X_C} \quad (4.16)$$

O RNS deverá, então, ser projetado para proporcionar uma reatância X_S suficiente para conter a corrente de curto circuito no patamar desejado.

Essa alternativa pode tornar-se viável na impossibilidade de utilização da opção anterior, já que neste caso é possível obter a reatância X_{LCC} mais precisa. Esta opção também pode ser mais vantajosa com relação as montagens pertencentes ao tipo A, já que nesta opção a maior parte da corrente é reduzida pela reatância proveniente do paralelo entre o RNS e do capacitor, ficando o reator linear responsável por reduzir apenas uma pequena parcela da corrente.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A questão central em todas as arquiteturas propostas para os limitadores é assegurar que o RNS operará tal qual:

- Uma chave, aberta para tensões abaixo de V_s e fechada para valores superiores, para as configurações do Tipo A;
- Ou como uma reatância indutiva, elevada quando a tensão estiver abaixo de V_s e com um dado valor especificado X_S para tensões acima de V_s , situação prevista para as configurações do Tipo B.

Com base no pressuposto de que a GEC viabilizou o funcionamento do RNS como uma simples chave, tal como requerido pelos arranjos do Tipo A, parece óbvio admitir que a segunda performance descrita, como uma reatância variável, é perfeitamente factível. Todavia, torna-se necessário obter-se uma comprovação laboratorial da funcionalidade dos arranjos estabelecidos e consistir os mesmos com simulações no EMTP-ATP.

O senso comum entre os pesquisadores para a condução de investigações dessa natureza consiste, principalmente, na construção de protótipos em tamanho reduzido com a finalidade de:

- Avaliar o desempenho do dispositivo na função para a qual foi concebido através da reprodução em laboratório das situações operacionais impostas ao mesmo nos estudos computacionais;
- Desenvolver ferramentas matemáticas capazes de converter um modelo computacional num componente físico com características similares para comprovação dos resultados experimentais;
- Identificar e equacionar os eventuais pontos de divergência entre a resposta do componente em tamanho reduzido e o comportamento estabelecido para o mesmo nas simulações computacionais.

Como estão evidentes, as metas estipuladas não se circunscrevem, apenas, às verificações experimentais no LCC propriamente dito, mas se estendem, também e principalmente, à avaliação do desempenho desse dispositivo como parte integrante de uma rede elétrica. Para o cumprimento desses objetivos, uma bancada de teste foi construída a qual incorporou, adicionalmente aos protótipos do LCC, também um modelo reduzido do próprio sistema elétrico.

Finalmente, tendo-se em conta que o propósito fundamental do LCC é reduzir a corrente de curto circuito no local de aplicação do mesmo e que os experimentos deverão compreender falhas de várias espécies na vizinhança do LCC, é mister que o modelo reduzido implantado na bancada de teste ofereça os meios necessários para a efetivação desses eventos.

A Figura 4.11 apresenta o leiaute básico para a bancada de teste do LCC, construída de conformidade com os requisitos acima especificados.

A especificação e construção da bancada para experimentação dos protótipos de LCC, bem como a modelagem matemática da mesma serão objetos dos próximos capítulos dessa dissertação.

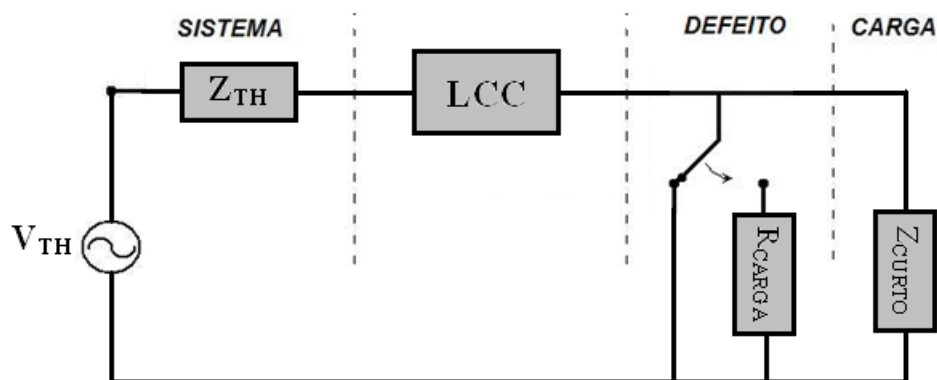


Figura 4.11 - *Leiaute básico para a bancada de teste do LCC.*

5

MODELAGEM DO SISTEMA

5.1 INTRODUÇÃO

Um dos principais tópicos estudados pelos pesquisadores na área da engenharia é a representação de elementos físicos por meio de modelos para que permitam a simulação dos mesmos em algum programa computacional. Como não poderia ser diferente, na Engenharia Elétrica a modelagem de equipamentos ou de circuitos é uma das principais linhas de pesquisa tratada por profissionais da área. Estes estudiosos buscam a melhor maneira de modelar os equipamentos de forma que os resultados obtidos satisfaçam suas pretensões.

Numa abordagem preliminar do tema, pode parecer que o modo mais apropriado de modelar matematicamente qualquer dispositivo é aquela em que os mínimos detalhes do mesmo estão representados. Todavia, um exame mais apurado do assunto mostra que existe uma profunda relação de dependência entre os resultados que se deseja alcançar e a complexidade do modelo. Isso significa que não há necessidade de modelos exageradamente complexos quando os resultados pretendidos são de solução simples. A conclusão, portanto, é de que o modelo de qualquer dispositivo deverá ser o mais simples possível desde que atenda as necessidades do estudo. Essa postura, dentre outras vantagens, reduz substancialmente o tempo gasto na pesquisa do modelo do dispositivo e igualmente do tempo gasto para representação e simulação do mesmo em programas computacionais.

Neste trabalho, os estudos de desempenho do LCC serão desenvolvidos com o auxílio do programa EMTP-ATP, de modo que a primeira parte dessa tarefa consistirá em eleger os modelos matemáticos mais apropriados para representação desse dispositivo no programa citado. Como o LCC é um equipamento pouco usual nos sistemas elétricos de potência, a biblioteca do EMTP-ATP não dispõe de um modelo exclusivo para simular o mesmo, todavia oferece recursos bastantes para esse fim. As alternativas disponíveis

compreendem desde a representação a partir da função de transferência do dispositivo (TACS - *Transient Analysis of Control Systems*), como pelas equações diferenciais que descrevem o comportamento transitório (MODELS – *General Purpose Simulation Language*) ou simplesmente pela montagem de elementos de circuito de modo a reproduzir o mais fielmente possível o arranjo original. Analisando o circuito de cada tipo de LCC a base de RNS descrito no capítulo 4 (Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.9, 4.10), aponta essa última opção como o forma mais eficaz para simular esse dispositivo nos estudos pretendidos.

No presente capítulo, a modelagem dos elementos que compõem o LCC será tratada de forma qualitativa, pois os parâmetros desses modelos somente serão quantificados no próximo capítulo, quando inseridos na configuração de interesse.

5.2 MODELAGEM DA FONTE DE TENSÃO

A fonte de tensão será representada pelo seu *Equivalente de Thévenin*, procedimento derivado do *Teorema de Thévenin* que estabelece que um sistema elétrico linear poderá ser representado em qualquer ponto desejado do mesmo por uma fonte de tensão (tensão do ponto em circuito aberto) em série com uma impedância (impedância do circuito vista do ponto). A Figura 5.1 apresenta o esquema do *Equivalente de Thévenin* que será adotado para representar a fonte de tensão.

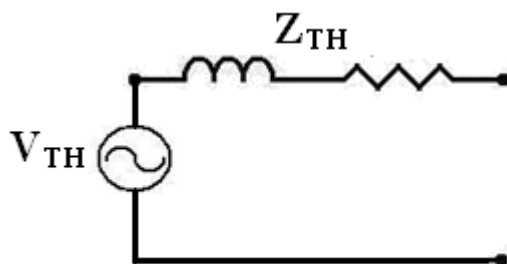


Figura 5.1 - Representação gráfica do modelo da fonte de tensão.

Serão utilizados os elementos *steady-state (cosine) function (type 14)* e *uncoupled lumped series R-L-C (type0)* para simular a fonte e a impedância equivalente respectivamente, no programa EMTP-ATP.

5.3 MODELAGEM DOS ELEMENTOS LINEARES DO LCC

Os componentes lineares do LCC, capacitor e indutor, serão representados por elementos concentrados, já que os fenômenos de interesse podem ser enquadrados na categoria de transitórios de baixa frequência. Além disso, tais elementos serão fisicamente individualizados por fase, ou seja, existe um conjunto distinto de elementos por fase do LCC, o que elimina a iteração entre as fases sãs e as defeituosas.

Por essas razões, o elemento eleito para simular tanto o reator linear como o capacitor do LCC no programa EMTP-ATP foi o *uncoupled lumped series R-L-C (type 0)* da biblioteca desse programa, o qual descreve esses equipamentos pelas parcelas resistiva, indutiva e capacitiva da impedância de seqüência positiva. A resistência relacionada com as perdas ôhmicas e dielétricas desses elementos também foi inserida no modelo do LCC, por considerar-se que a mesma influenciará substancialmente os fenômenos em estudo, amortecendo as eventuais oscilações. Tais resistências foram incluídas em série com o elemento principal, capacitor ou indutor, tal como retrata a Figura 5.2.

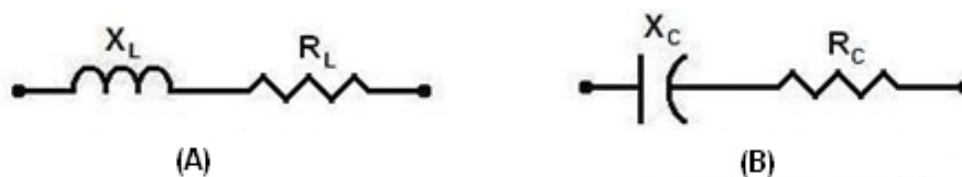


Figura 5.2 - (A) Representação gráfica do modelo do indutor; (B) Representação gráfica do modelo do capacitor.

É prática comum a utilização de pequenos indutores (*da ordem de μH*) em série com o capacitor quando este é submetido a chaveamentos, evitando com isso que correntes de magnitude muito elevada percorram este elemento no momento em que um curto circuito franco é imposto aos seus terminais. Contudo, o uso desses pequenos indutores não se faz necessário nos estudos aqui estabelecidos, pois o RNS como componente de controle do LCC não provoca um curto circuito franco aos terminais do capacitor, já que é impossível a construção de um RNS com inclinação nula na região saturada. Outro ponto a favor da não utilização dos indutores é que as correntes a que os capacitores serão submetidos para realização dos experimentos que fazem parte deste trabalho é de baixa intensidade.

5.4 MODELAGEM DO RNS

O RNS, componente de controle do LCC, não deverá exibir uma estrutura magnética de múltiplos núcleos interligados magnética e eletricamente entre si, tal como ocorre nas aplicações desse dispositivo para a compensação de linhas de transmissão ou para o controle de tensão em sistemas de potência. Se assim for configurado, defeitos monofásicos e bifásicos repercutirão inevitavelmente nas fases sãs, o que ensejará perturbações significativas no funcionamento da rede elétrica. Por isso, a estrutura eletromagnética de um RNS para esse fim deverá ser concebida de modo a assegurar total independência elétrica e magnética entre as diferentes fases do mesmo. Assim, ou cada fase dispõe de uma estrutura magnética própria, como na Figura 5.3(A), ou as três fases serão reunidas num monobloco único, Figura 5.3(B), porém com a garantia de que cada uma das colunas opera de forma autônoma.

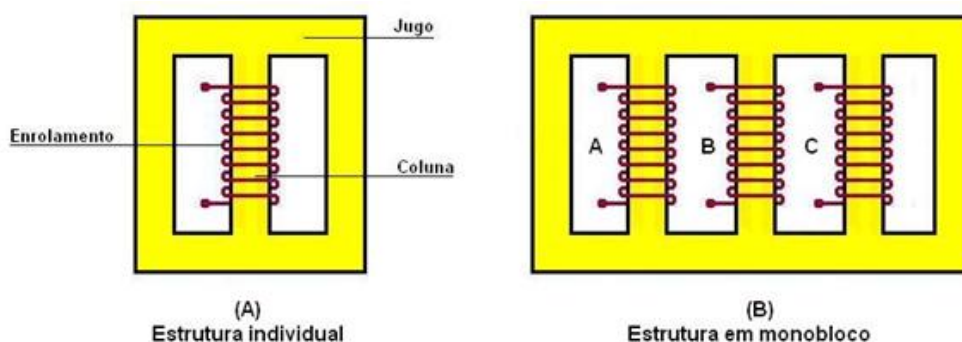


Figura 5.3 - Possíveis estruturas magnéticas para concepção de um RNS para controle de um LCC.

Em ambas as configurações da Figura 5.3, o jugo, peça que circunda as colunas e complementa o circuito magnético, deverá oferecer sempre uma trajetória de baixa relutância para a circulação do fluxo. No caso da estrutura em monobloco, tal condição afiançará a pretendida autonomia das colunas do circuito magnético e, conseqüentemente, eliminará qualquer acoplamento entre as diferentes fases do RNS. Já para a estrutura individual, a conformação do jugo conforme prescrito restringirá a incidência da saturação apenas à região da coluna, permanecendo as demais partes do núcleo isentas desse fenômeno. Assim, para os dois arranjos da Figura 5.3, a característica de magnetização das colunas ditará o comportamento do RNS, o que diminui bastante a complexidade do modelo deste dispositivo. Como um dos objetivos deste trabalho é à análise de

desempenho do RNS como elemento de controle do LCC, o jugo dos circuitos magnéticos da Figura 5.3 poderá ser ignorado, já que oferece uma relutância desprezível à passagem do fluxo, de modo que o modelo deverá retratar, apenas, as características eletromagnéticas das colunas centrais da estrutura.

Como se sabe, um núcleo de material ferromagnético excitado por um enrolamento exibe um comportamento não somente não-linear, mas também multivalorado, como pode ser apreciado no esboço da Figura 5.4, que registra a relação *fluxo de enlace* \times *corrente* ($\lambda \times i$), para esse elemento. Ignorando-se, por ora, as perdas ôhmicas no enrolamento, a área interna da curva, região hachurada da Figura 5.4, representa a energia dissipada para magnetizar o núcleo, a qual compreende uma parcela estática, as conhecidas perdas por histerese, e outra de natureza dinâmica, que é formada pelas perdas clássicas por correntes parasitas e pelas hoje denominadas perdas por excesso [24]. Para cada valor da tensão aplicada ao enrolamento, uma diferente intensidade de indução máxima é estabelecida para o atendimento da *Lei de Faraday* e, correspondentemente, o núcleo obedecerá a uma curva $\lambda \times i$ também distinta. A resposta do dispositivo será, portanto, dada por uma família de laços similares aquele da Figura 5.4, concêntricos entre si e encerrando diferentes áreas internas.

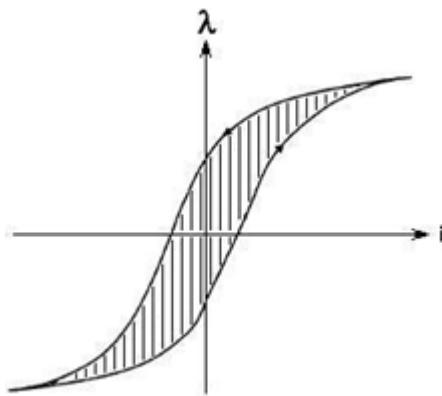


Figura 5.4 - Curva genérica Fluxo de Enlace \times Corrente de um material ferromagnético.

A literatura [25] oferece uma larga variedade de formas para representar o comportamento descrito pela Figura 5.4, algumas de grande simplicidade, outras bastante complexas, todas, porém, satisfatórias para os propósitos definidos pelos autores. Como a diretriz adotada no presente projeto é priorizar o uso de elementos de circuitos para a simulação do núcleo, o modelo adotado é o apresentado na Figura 5.5, onde:

- O indutor não-linear L reproduzirá a curva de magnetização do núcleo;
- O resistor linear R representará as perdas totais no núcleo.

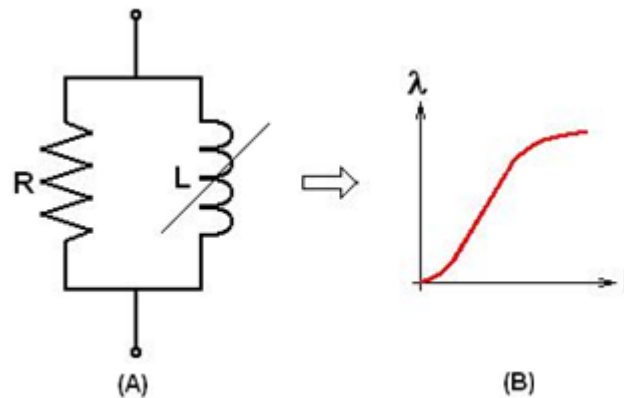


Figura 5.5 - (A) Modelo adotado para o RNS; ainda sem a presença das perdas ôhmicas, (B) Curva de Magnetização do Material.

O valor desta resistência que representa as perdas totais no núcleo é obtida por meio de ensaio no RNS, descrito no Anexo 4.

Para visualizar o efeito da combinação proposta na Figura 5.5(A), uma fonte de tensão senoidal é aplicada aos terminais do circuito, Figura 5.6(A), de modo que tanto no indutor, quanto no resistor, a tensão terá esse mesmo formato:

$$v_R = v_L = V_m \cos(\omega t) \quad (5.1)$$

A corrente através do resistor será:

$$i_R = \left(\frac{V_m}{R} \right) \cos(\omega t) \quad (5.2)$$

Definindo no ramo da resistência, por conveniência, uma grandeza equivalente ao fluxo de enlace da indutância:

$$\lambda = \int v_R \cdot dt = \int V_m \cos(\omega t) \cdot dt = \left(\frac{V_m}{\omega} \right) \text{sen}(\omega t) \quad (5.3)$$

Elevando ao quadrado as expressões (5.2) e (5.3) e, em seguida, procedendo à adição das mesmas obtém-se:

$$(Ri_R)^2 + (\omega\lambda)^2 = V_m^2 (\text{sen}^2 \omega t + \text{cos}^2 \omega t) = V_m^2 \quad (5.4)$$

$$\frac{i_R^2}{\left(\frac{V_m}{R}\right)^2} + \frac{\lambda^2}{\left(\frac{V_m}{\omega}\right)^2} = 1 \quad (5.5)$$

A relação $\lambda \times i$ do ramo da resistência, Equação (5.5), terá, portanto, a forma de uma elipse, Figura 5.6(B), a qual, quando adicionada à relação $\lambda \times i$ do ramo da indutância não linear, Figura 5.6(C), produzirá, para o ramo de excitação do núcleo, Figura 5.6(D), uma curva próxima àquela da Figura 5.4.

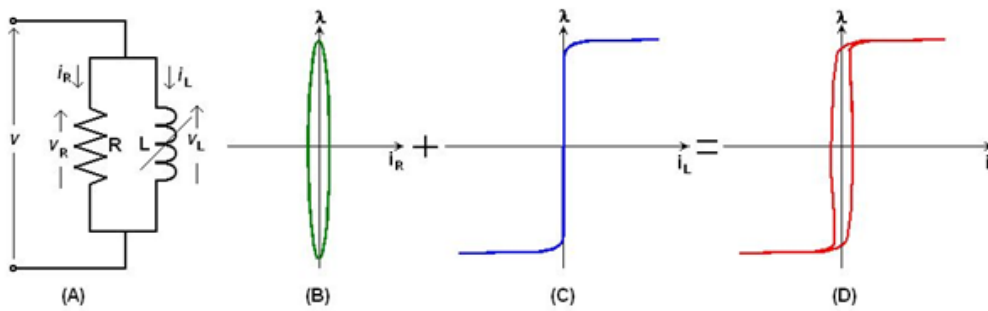


Figura 5.6 - (A) Modelo provisório do RNS; (B) Curva Fictícia $\lambda \times i$ do Ramo do Resistor; (C) Curva $\lambda \times i$ do Ramo do Indutor não linear; (D) Curva de Magnetização Real do Núcleo $\lambda \times i$.

Evidentemente, que o emprego de um resistor linear para simular as perdas totais nas colunas não reproduzirá, exatamente, o comportamento conhecido para essa grandeza como assinala a Figura 5.4, uma vez que, assim modelada, tem-se:

$$P = \left(\frac{1}{R}\right)V^2 \quad (5.6)$$

onde pela *lei de Faraday*:

$$V = 4,44 f N \mathcal{B}_{\max} A = a \mathcal{B}_{\max} \quad (5.7)$$

Substituindo (5.7) em (5.6) obtém-se:

$$P = \left(\frac{1}{R}\right)a^2 \mathcal{B}_{\max}^2 = c \mathcal{B}_{\max}^2 \quad (5.8)$$

Ora, de acordo com [24] e [26], as perdas totais nos materiais ferromagnéticos empregados na atualidade para a fabricação dos dispositivos elétricos exibem um comportamento com respeito à indução dado por:

$$P = P_{Histerese} + P_{Foucault} + P_{Excedentes} = \alpha \mathcal{B}^{1,5-2,5} + \beta \mathcal{B}^2 + \eta \mathcal{B}^{3/2} \quad (5.9)$$

portanto, distinta da relação (5.8) fornecida por uma resistência constante.

Por essa razão e com o intuito de reproduzir com exatidão as perdas totais, alguns autores têm dado preferência ao uso de uma resistência específica para representar cada tipo de fenômeno e, ainda mais, variável com a indução máxima. As dificuldades para concretizar um modelo com essas particularidades decorrem, justamente, da ausência de informações concernentes ao comportamento de cada tipo de perda, já que, habitualmente, os fabricantes fornecem apenas as perdas totais. Justamente por isso, outros pesquisadores empregam uma única resistência não-linear para simular conjuntamente as perdas e com resultados considerados suficientemente precisos, conforme [27].

Por outro lado, os aprimoramentos sucessivos introduzidos no processo de manufatura dos materiais ferromagnéticos reduziram substancialmente as perdas magnéticas, as quais se situam, nos dias atuais, muito abaixo de 1% da potência nominal dos equipamentos elétricos. Essa evolução tornou cada vez mais estreito os ciclos de magnetização $\lambda \times i$ dos núcleos confeccionados com esse tipo de material, como assinala [28]. Ora, no caso do RNS, que opera em regime de intensa saturação, tais ciclos exibirão uma forma ainda mais delgada, já que a estrutura magnética estará submetida a induções acima de 2,0 T. Embora o conhecimento acerca do comportamento das perdas magnéticas em altas induções ainda não tenha registro na literatura disponível, admite-se que, nessa faixa de trabalho, o material magnético assume as características do ar e, conseqüentemente, as perdas cessam de crescer. Nessas circunstâncias, a modelagem das perdas exercerá um papel apenas secundário e o uso de uma resistência linear para representação das mesmas mostrar-se-á certamente adequado para os fins pretendidos.

Desse modo, o resistor, por possuir uma natureza linear, será simulado pelo *uncoupled lumped series R-L-C, type 0* da biblioteca do EMTP-ATP, enquanto o indutor, em face do caráter não-linear, será representado por intermédio do *pseudo-nonlinear reactor, type 98*. Na implementação do modelo do indutor não-linear no EMTP-ATP, o elemento requerido é a característica *fluxo de enlace* \times *corrente* ($\lambda \times i$) do mesmo, a qual

deverá ser determinada diretamente por meio de ensaios no dispositivo com a utilização de uma placa integradora, conforme Anexo 4.

Para concluir a modelagem, resta proceder à inclusão de outra resistência, desta vez em série com o circuito equivalente da Figura 5.5(A) e que reproduzirá as perdas no cobre do enrolamento do RNS. Embora essa parcela seja de uma magnitude aparentemente insignificante, a contribuição para o amortecimento de eventuais oscilações justifica a inserção da mesma no modelo final do RNS, que, assim, tomará a forma mostrada na Figura 5.7.

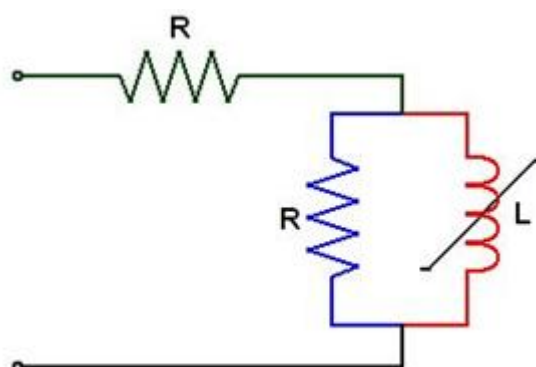


Figura 5.7 - Representação gráfica do modelo do RNS adotado.

5.5 MODELAGEM DA CARGA E DA IMPEDÂNCIA DE CURTO

A carga consumida pelo sistema será considerada, para facilitar a construção dos modelos laboratoriais, com um fator de potência unitário e, portanto, será representada por uma resistência independente para cada fase. Novamente o *uncoupled lumped series R-L-C, type 0* da biblioteca do EMTP-ATP prestar-se-á perfeitamente para esse fim.

O curto circuito imposto ao sistema será considerado com um fator de potência indutivo, sendo formado, portanto por um resistor em série com um indutor linear para cada uma das fases. Outra vez o modelo da biblioteca do EMTP-ATP denominado *uncoupled lumped series R-L-C, type 0* servirá para o presente propósito. Esse curto circuito será aplicado ao sistema por intermédio de uma chave, cujo acionamento se dará num determinado tempo, e sua representação no EMTP-ATP se dará pelo elemento *ordinary switches, type 0*. A Figura 5.8 mostra de forma simplificada como se realizará a montagem da carga e do curto circuito do sistema em estudo.

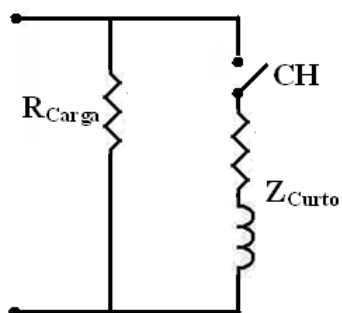


Figura 5.8 - Representação gráfica do modelo da carga nominal e do curto circuito do sistema.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo foi definido os modelos matemáticos para todos os elementos do sistema que será experimentado, procurando sempre a representação de maior simplicidade e fidelidade com os resultados esperados. Embora o objetivo principal do trabalho tenha sido a investigação experimental do desempenho do LCC a base de RNS, a modelagem do sistema se constituiu numa ferramenta importante da pesquisa, uma vez que permitiu uma comprovação computacional dos resultados obtidos em laboratório.

Além de prestar-se como um teste de consistência para os ensaios, a modelagem ora apresentada também será de grande valia para as análises operacionais do LCC nos sistemas elétricos de potência. O comportamento desse dispositivo poderá, então, ser investigado de uma forma mais completa e sua especificação estabelecida com mais precisão para cada aplicação.

6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO

6.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo serão apresentados os resultados experimentais realizados com elementos em tamanho reduzido de um sistema elétrico, inclusive com a aplicação série de RNS funcionando como LCC montados em algumas das configurações propostas neste trabalho, conforme descritas no capítulo 4, e comparando os resultados das alternativas abordadas. Também serão apresentados os resultados das simulações no programa EMTP-ATP para o LCC montado nas mesmas configurações em que foi experimentado e estabelecendo comparações qualitativas entre os resultados experimentais e de simulação.

Foram realizados testes com o sistema em regime normal de operação e com o sistema sob a influência de um curto circuito. É importante analisar o regime normal de operação para comprovar que o LCC não influencia nesta condição de operação. Sob condição de curto circuito é importante analisar o período transitório, para observar a magnitude dos picos de corrente, o tempo de reação do RNS e o período em que o curto circuito atinge o regime permanente, para observar as magnitudes das correntes e tensões impostas a cada elemento que compõe o LCC.

Para a realização das simulações foram empregados os modelos de cada componente apresentados no capítulo 5 conjuntamente, dando origem a modelos de sistema bem mais complexo, principalmente porque envolve elementos não lineares. Não serão realizadas comparações diretas entre os resultados experimentais e de simulações, apenas de forma qualitativa, pois o objetivo principal deste trabalho é analisar o desempenho operacional de novas alternativas que utilizem o RNS como elemento de controle do dispositivos LCC de forma prática, através de ensaios em protótipos de

tamanho reduzido e a simulação vem para agregar valor ao trabalho e elucidar que este equipamento pode ser modelado e conseqüentemente projetado de forma pontual.

6.2 RESULTADOS DA CONFIGURAÇÃO A1

A configuração A1, como foi especificada no capítulo 4, trata-se de uma arquitetura aparentemente parecida com a montagem original proposta pela GEC, mas com diferenças, principalmente em seu modo de operação, que permitem que este possa ser aplicado de outras formas, proporcionando com isso, outros benefícios ao sistema onde for aplicado. O sistema experimental desta configuração foi montado como mostra de maneira simples a Figura 6.1. Nela estão representados: a fonte de tensão do sistema (representada por uma fonte de tensão senoidal e uma impedância equivalente); os diversos componentes do LCC montados de forma a reproduzir a configuração A1; a carga nominal do sistema (representada por uma resistência); e um curto circuito através de uma impedância (representado por um indutor linear).

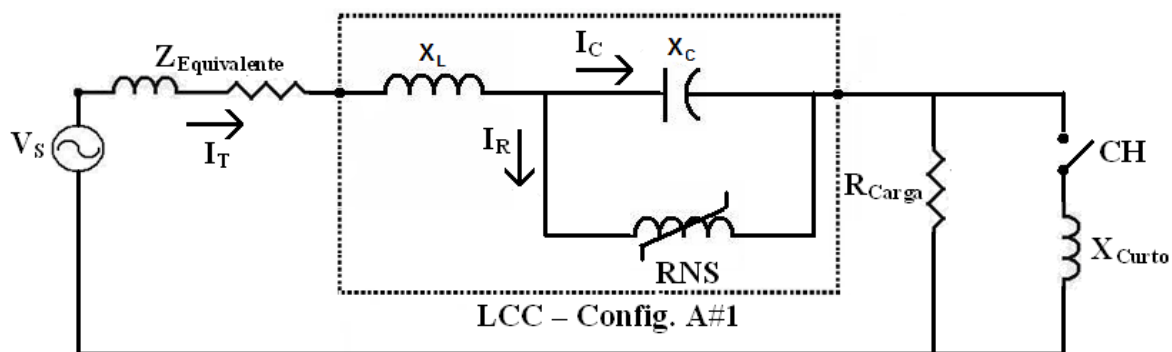


Figura 6.1 - Esquema simplificado de montagem para o ensaio da configuração A1.

A chave eletrônica (CH) é um contator a base de elementos de estado sólido fabricado pela VARIXX INNOVATION que ao receber um comando, só permite o fechamento dos contatos quando a tensão instantânea de controle é igual a zero e só permite a abertura dos contatos quando a corrente instantânea é igual a zero.

A decisão para a escolha dos valores de cada componente desta montagem está associada às restrições do laboratório. A primeira delas é que, em contrario a ordem correta

dos passos para um projeto deste tipo de equipamento, onde cada elemento deve ser individualmente projetado para em seguida ser ensaiado, deveria ser utilizados os dispositivos (indutores lineares, RNS, capacitores e resistores) que o laboratório já dispunha e que não eram de grande variedade. As outras limitações encontradas foram com relação às capacidades dos instrumentos de medição e dos próprios dispositivos, que não suportavam correntes muito elevadas. Portanto, os valores escolhidos como sendo os melhores para cada componente, foram adotados com vistas a essas restrições, agregando-as a um pouco de bom senso.

6.2.1 Obtenção do Equivalente de Thévenin e Escolha dos Elementos que Representam a Carga e o Curto Circuito

A tensão da fonte foi escolhida com o valor de aproximadamente $130 V_{RMS}$, a depender do valor da tensão da rede elétrica do laboratório no instante de realização do ensaio. Esse patamar de tensão é conseguido por meio de um variador de tensão (autotransformador) da marca AUJE, que em seu primário recebe a tensão da rede elétrica ($220 V_{RMS}$) e a transforma para o valor estabelecido ($130 V_{RMS}$). A Figura 6.2 mostra de forma simples a maneira que este variador de tensão foi empregado nos ensaios. O valor de tensão foi estabelecido em $130 V_{RMS}$ para evitar que os indutores lineares utilizados entrassem em processo de saturação, já que estes possuem característica $V \times I$ linear apenas até certo ponto.

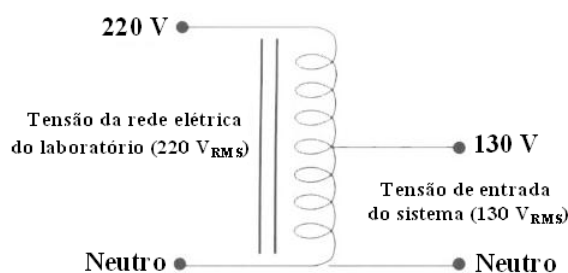


Figura 6.2 - Esquema de ligação do variador de tensão utilizado nos ensaios.

A impedância equivalente do sistema vista do ponto onde o variador de tensão foi conectado foi estimado de acordo com o trabalho [29], que demonstra ser possível estimar a impedância *Equivalente de Thévenin* através de medições realizadas no ponto. Este método foi seguido e suas medidas estão apresentadas no Anexo 1, onde

chegou-se aos valores apresentados na Figura 6.3. Também é exibido na Figura 6.3 o valor da tensão que será utilizado para os experimentos e simulações.

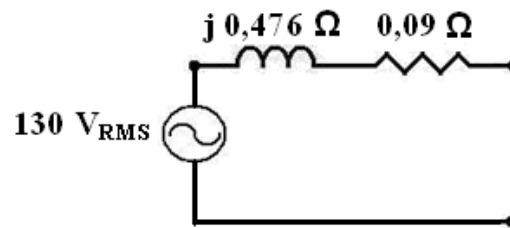


Figura 6.3 - *Equivalente de Thévenin visto do ponto onde foram realizados os ensaios.*

A resistência que representa a carga foi estipulada para absorver uma pequena corrente para o sistema operando em regime normal. Dentre os elementos resistivos a disposição foi escolhido o de valor 59,7 Ω, fabricado pela RR RESISTORES. Este valor exato foi obtido através de ensaio, demonstrado no Anexo 2. Com isso a corrente do sistema em regime normal será de:

$$\frac{130 \text{ V}}{59,6 \Omega} = 2,18 \text{ A} \quad (6.1)$$

A impedância de curto será representada por três indutores lineares de impedância total igual a $0,8 + j9,05 \Omega$, valor obtido através de ensaios evidenciados no Anexo 3. Para os valores obtidos da resistência da carga e da impedância de curto circuito, o valor da impedância total no momento em que a chave (CH) é fechada terá o valor de:

$$\frac{59,6 \cdot (0,8 + j9,05)}{59,6 + 0,8 + j9,06} = \frac{541,48 \angle 84,95^\circ}{61,07 \angle 8,52^\circ} = 8,87 \angle 76,43^\circ = 2,08 + j8,62 \Omega \quad (6.2)$$

Admitindo que a tensão aplicada a esses elementos não é distorcida, a corrente de curto circuito deste sistema sem a presença do LCC será de:

$$\frac{130 \text{ V}_{RMS}}{8,87 \angle 76,43^\circ \Omega} = 14,66 \angle -76,43^\circ \text{ A}_{RMS} \quad (6.3)$$

Foi realizado um ensaio apenas com os elementos valorados até este momento, conforme Figura 6.4, para analisar as correntes e tensões presentes em cada elemento e buscar parâmetros de comparação para os ensaios com a presença do LCC. Também foi realizada uma simulação no programa EMTP-ATP com estes mesmos elementos para avaliar os modelos adotados de cada componente, cujo roteiro está descrito no Apêndice A.1. Os resultados do experimento e das simulações estão apresentados nas Figura 6.5, Figura 6.6 e na Tabela 6.1.

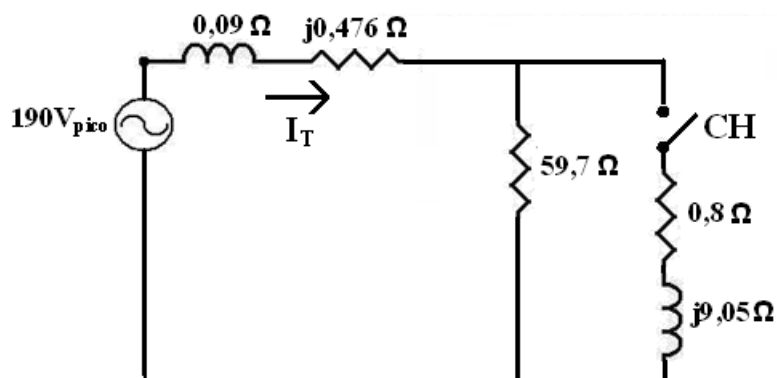


Figura 6.4 - Esquema de montagem para o ensaio de curto com o sistema sem a presença do LCC.

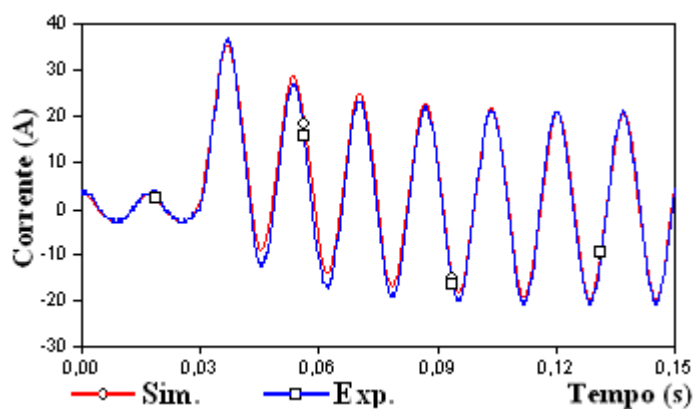


Figura 6.5 - Corrente do sistema em curto sem a presença do LCC.

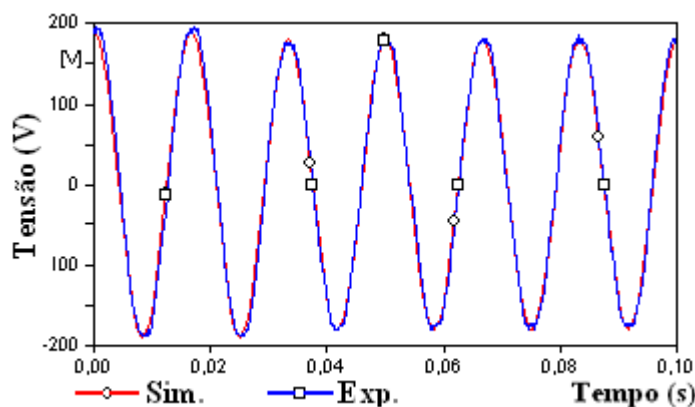


Figura 6.6 - Tensão do sistema em curto sem a presença do LCC.

Tabela 6.1 - Valores de tensão de pico e corrente de pico relativos às Figuras 6.5 e 6.6.

	Experimento	Simulação
$I_{\text{nomial}} (A_{\text{pico}})$	3,20	3,22
$I_{\text{transitório}} (A_{\text{pico}})$	36,80	35,44
$I_{\text{regime}} (A_{\text{pico}})$	20,80	20,36
$V_{\text{carga antes}} (V_{\text{pico}})$	190,00	189,70
$V_{\text{carga após}} (V_{\text{pico}})$	178,00	180,00

Pode ser observado pelos dados apresentados acima que as correntes e tensões obtidas através do experimento e da simulação são praticamente idênticas, tanto em valores como em formas de onda, diferindo um pouco apenas nas correntes do segundo e terceiro pico após o curto circuito, como mostra a Figura 6.5. É interessante frisar também que a corrente eleva-se em cerca de 6,5 vezes em relação ao seu valor nominal, chegando a 11,5 vezes se comparado ao valor do primeiro pico após o curto circuito.

Todos os dados obtidos experimentalmente, neste e em todos os outros ensaios, foram adquiridos através de dois osciloscópios da marca TEKTRONIX tipo RS232.

6.2.2 Escolha dos Valores dos Componentes do LCC

De posse dos dados relativos ao sistema sem a presença do LCC, passou-se a parte principal e árdua deste trabalho, a montagem do LCC fazendo uso apenas dos elementos disponibilizados no laboratório. A maneira correta de projetar um LCC dessa natureza seria a seguinte: sabendo-se de quanto a corrente de curto deve ser reduzida, projeta-se o reator linear (elemento responsável pela redução da maior parte da corrente nesta configuração, como exposto no capítulo 4), a partir deste valor projeta-se o banco de capacitores (que deve ser de valor igual ou maior que o reator linear, a depender da necessidade ou não de compensação série), e por último projeta-se o RNS (que terá uma característica relacionada com todos os outros componentes citados).

Devido a impossibilidade de confecção de novos elementos, neste trabalho a seqüência de desenvolvimento da montagem deu-se em ordem inversa. Primeiramente foi obtido por meio de ensaio as características $\lambda \times i$ de todos os RNS disponíveis no laboratório e escolheu-se a que melhor se adaptava ao projeto. O processo de obtenção da curva $\lambda \times i$ do RNS escolhido encontra-se no Anexo 4. A curva $v \times i$, dado mais simples de se avaliar, está exibida na Figura 6.7. Também está descrito no Anexo 4 o processo de obtenção das perdas ôhmicas (resistência em série com o RNS) e das perdas totais (resistência em paralelo com o RNS). Lembrando que a curva $\lambda \times i$, como explicado no capítulo 5, se faz necessário como entrada de dados para simulação do RNS no EMTP-ATP, mas a curva $v \times i$ torna-se um parâmetro de melhor assimilação para as análises aqui requeridas.

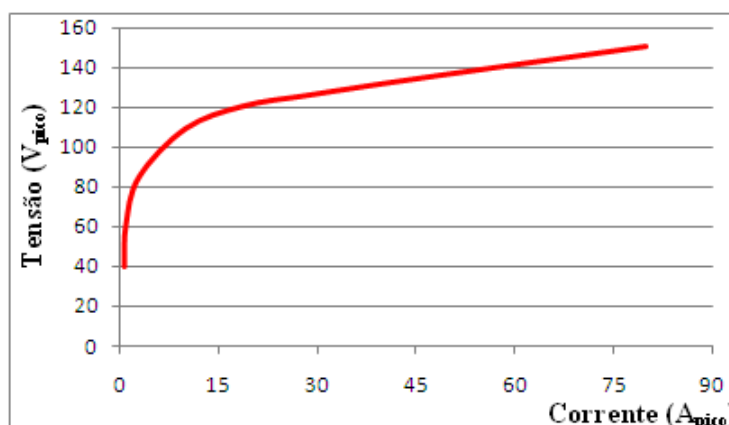


Figura 6.7 - Característica $v \times i$ do RNS escolhido para montagem da configuração A1.

Pela Figura 6.7 nota-se que o dispositivo escolhido entra em processo de saturação quando a tensão em seus terminais atinge aproximadamente $90V_{\text{pico}}$, requerendo assim um banco de capacitores capaz de manter no mínimo essa tensão em seus terminais quando percorrido por uma corrente de aproximadamente $20A_{\text{pico}}$, que é a magnitude da corrente do sistema em curto sem a presença do LCC. Optou-se então pela utilização de um banco de capacitores que totaliza-se aproximadamente 6Ω , pois este valor além de garantir a saturação do RNS, compensa os indutores lineares disponíveis, que são unidades de aproximadamente 3Ω .

Em suma, foram adotados o RNS cuja característica $v \times i$ encontra-se exibido na Figura 6.7, um banco capacitores de $6,05\Omega$ (valor obtido através de ensaio, conforme Anexo 5) e dois reatores lineares associados em série totalizando $6,2\Omega$ (valor obtido através de ensaio, conforme Anexo 6). A Figura 6.8 apresenta o esquema de montagem para o ensaio e simulação de curto para o sistema com LCC confeccionado na configuração A1.

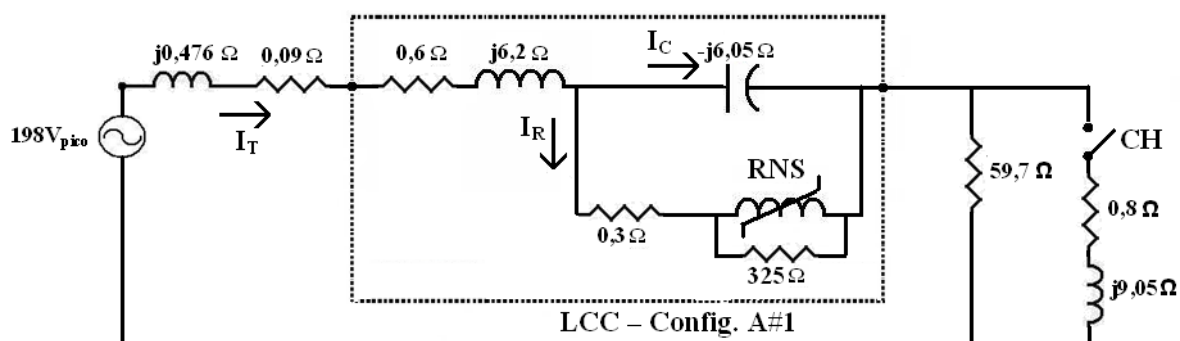


Figura 6.8 - Esquema completo de montagem para o ensaio da configuração A1.

As resistências em série e em paralelo com os indutores mostradas na Figura 6.8 representam as perdas ôhmicas e totais dos próprios indutores, nenhuma resistência foi realmente colocada nestas posições no momento dos ensaios, apenas indicam que também devem ser modeladas para representarem tais perdas nas simulações.

Outro ponto de alta relevância na escolha do RNS de controle do LCC montado na configuração A1 é o fato de que sua característica $v \times i$ não condiz com a característica exigida para RNS utilizados nesta configuração, conforme descrito no capítulo 4. O RNS utilizado nestes experimentos confunde-se com o tipo que é empregado nas configurações intituladas como B, que exigem uma curva $v \times i$ mais inclinada, para que a associação em

paralelo do capacitor e do RNS contribuam no valor total da impedância equivalente do LCC quando a corrente se eleva a níveis indesejáveis. Sendo assim, apesar da impossibilidade de aquisição de RNS com características validas para desempenhar a função de controle dos LCC pertencentes a configuração A, no presente capítulo serão abordados os estudos realizados com a configuração A1, por se tratar do esquema originalmente proposto, e com a configuração B1, por se tratar de um esquema totalmente inovador e que faz uso de RNS que possuem característica $v \times i$ da forma como o RNS utilizado nestes ensaios, já que o mesmo RNS é empregado em todos os ensaios. Poderia a arquitetura A1 neste estudo ser chamada de B2, já que possuem esquemas de montagem iguais e a arquitetura B2 fazer uso de RNS com características semelhantes ao utilizado nestes experimentos, ainda assim será chamado de A1, por se tratar da proposta original para este dispositivo, mas seus resultados podem ser perfeitamente utilizados para analisar o desempenho operacional da configuração B2. Alguns resultados a respeito dos ensaios e simulações realizadas com o LCC montado nas arquiteturas A2 e A3 utilizando o mesmo RNS das configurações A1/B2 e B1 podem ser apreciados no Apêndice B.1 e B.2 respectivamente, e seus *roteiros* encontrados nos Apêndices A.5 e A.6.

6.2.3 Resultados Experimentais

Neste tópico serão apresentados os resultados de ensaio obtidos durante todo o processo de elaboração deste trabalho.

A Figura 6.9 compara a corrente de curto total no experimento para o sistema com e sem a presença do LCC, onde pode ser observado que a redução da corrente ocorre em todos os pontos da curva (período transitório e regime permanente), comprovando que o dispositivo limitador de corrente de curto circuito a base de reatores naturalmente saturados cumpriu a função a que se destina com presteza.

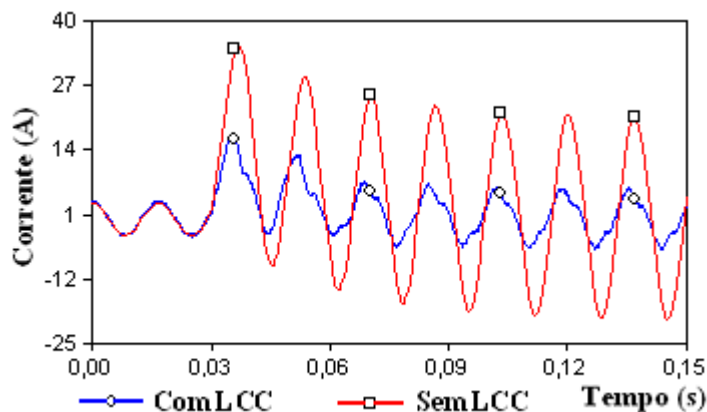


Figura 6.9 - Corrente total, para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A1.

Nota-se ainda da Figura 6.9 que a corrente com a presença do LCC após imposição de um curto circuito é bastante distorcida, entretanto, este não é um fato importante, pois, conforme apresentado na Tabela 2.1, o disjuntor com maior tempo de interrupção nominal atua com 8 ciclos, não permitindo portanto que o sistema fique sujeito a esta distorção por mais que este tempo.

A Figura 6.10 mostra a tensão na carga para o sistema com e sem o LCC após a realização do curto circuito. Pode ser observado que, se a corrente na carga do sistema é reduzida, a tensão nos terminais desta carga também é reduzida, como esperado. A distorção encontrada na forma de onda da tensão também já era esperada, pois sendo a carga um elemento linear, a tensão distorce em consequência da corrente que é distorcida.

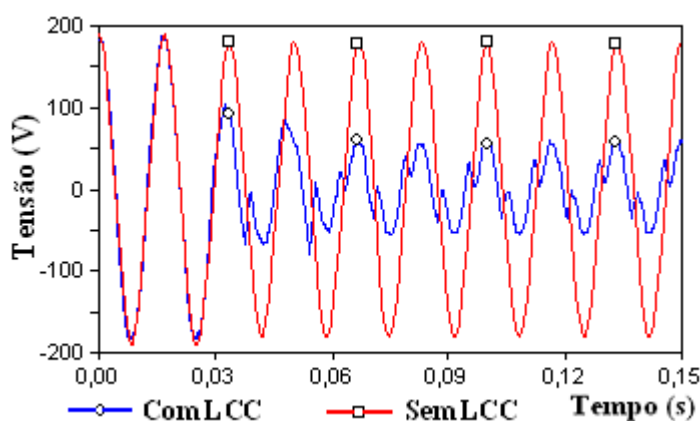


Figura 6.10 - Tensão na carga, para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A1.

A Figura 6.11 mostra a corrente total, a corrente no capacitor e a corrente no RNS. A Figura 6.11(B) detalha o comportamento destas correntes, onde a corrente no capacitor acompanha a corrente total do sistema enquanto a corrente no RNS é nula, passando a se opor a corrente do RNS quando esta produz o pico característico de elementos magneticamente saturados. Este pico de corrente no RNS se dá quando a tensão em seus terminais ultrapassa um valor crítico, chamado tensão de início de saturação, conforme explicado no capítulo 4. Neste momento, a corrente no capacitor que era igual a corrente total, passa a se opor a corrente no RNS e a corrente resultante desta soma é a corrente total. Pode ser observado também que a corrente resultante (total) no intervalo de tempo que o RNS está saturado é basicamente indutiva, já que a corrente no RNS é maior que a corrente no capacitor. Resumindo, em qualquer instante,

$$I_T = I_R + I_C \quad (6.4)$$

e o restante de corrente que não vai para carga, fica oscilando entre o capacitor e o RNS, pois este paralelo torna-se um circuito oscilatório.

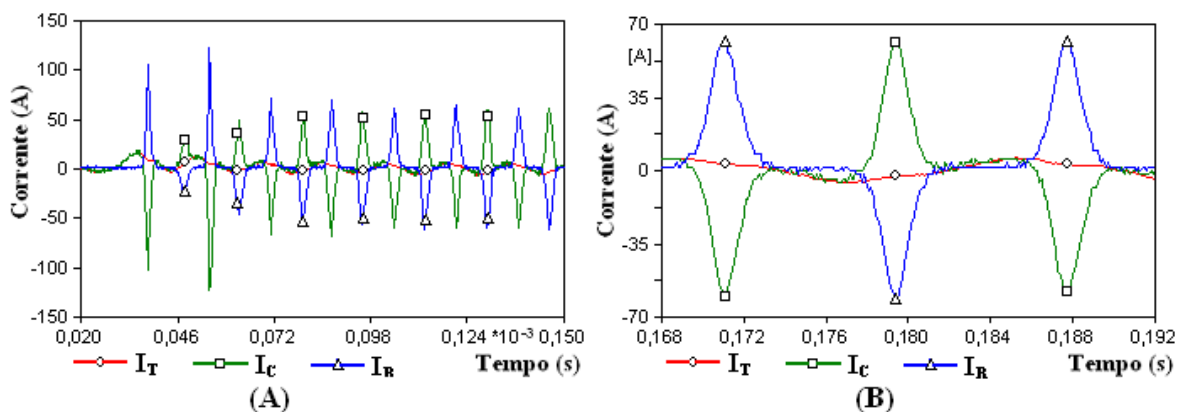


Figura 6.11 - (A) Corrente Total, do Capacitor e do RNS; (B) Detalhe das correntes Total, do Capacitor e do RNS. Para o LCC montado na configuração A1.

A Figura 6.12 mostra a tensão e a corrente nos terminais do RNS, para evidenciar que, apenas quando a tensão ultrapassa o valor crítico de saturação, é permitido a passagem de corrente pelo RNS. É válido lembrar que a corrente no RNS é atrasada 90° em relação a tensão, já que este é um elemento indutivo.

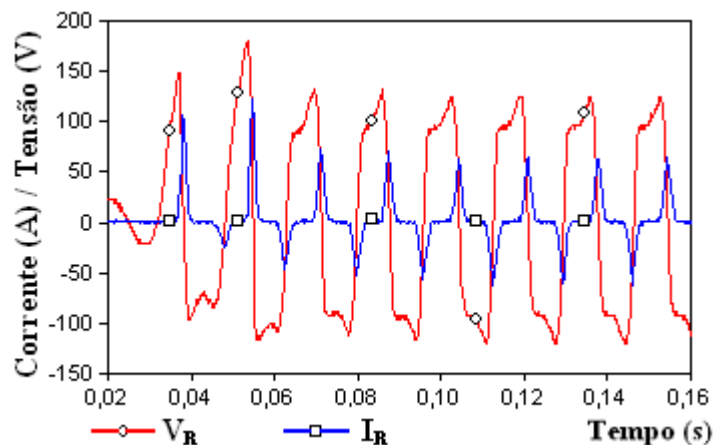


Figura 6.12 - Tensão e corrente no RNS, para o LCC montado na configuração A1.

Tabela 6.2A Tabela 6.2 mostra os valores de pico de tensão e corrente para o sistema com e sem a presença do LCC, com isto pode-se observar com mais clareza o grau de redução que foi estabelecido com a presença do LCC no sistema. A corrente de primeiro pico ($I_{\text{transitório}}$) foi reduzida a 44,6% em relação ao sistema sem LCC e a corrente depois de alcançado o regime (I_{regime}) reduzida a 28,8%. As correntes no RNS e no capacitor são bastante elevadas, devendo estes equipamentos ser projetados para suportá-las, apesar do curto tempo que estes equipamentos precisarão estar submetidos a esta corrente.

Tabela 6.2 - Comparação dos parâmetros do sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A1.

	Sistema sem a presença do LCC	Sistema com a presença do LCC
$I_{\text{nomial}} (A_{\text{pico}})$	3,20	3,40
$I_{\text{transitório}} (A_{\text{pico}})$	36,80	16,40
$I_{\text{regime}} (A_{\text{pico}})$	20,80	6,00
$V_{\text{carga antes}} (V_{\text{pico}})$	190,00	188,00
$V_{\text{carga após}} (V_{\text{pico}})$	178,00	56,00
$V_{\text{reator}} (V_{\text{pico}})$	-----	124,00
$I_{\text{capacitor}} (A_{\text{pico}})$	-----	60,00
$I_{\text{reator}} (A_{\text{pico}})$	-----	62,00

6.2.4 Resultados de Simulação

Neste tópico será efetuada a comparação de alguns parâmetros do sistema com a presença do LCC ensaiado com o simulado para avaliar o modelo utilizado. O roteiro completo deste programa em EMTP-ATP está descrito no Apêndice A.2. Como frisado anteriormente, não é objetivo deste trabalho preparar um modelo que reproduza fielmente todas as variáveis do sistema, mas apenas de um modelo capaz de interpretar o modo de atuação de cada componente, principalmente o RNS.

A Figura 6.13 mostra as correntes totais para o sistema simulado e ensaiado. Pode ser avaliado por esta figura que o modelo está bastante robusto para as pretensões requeridas por hora.

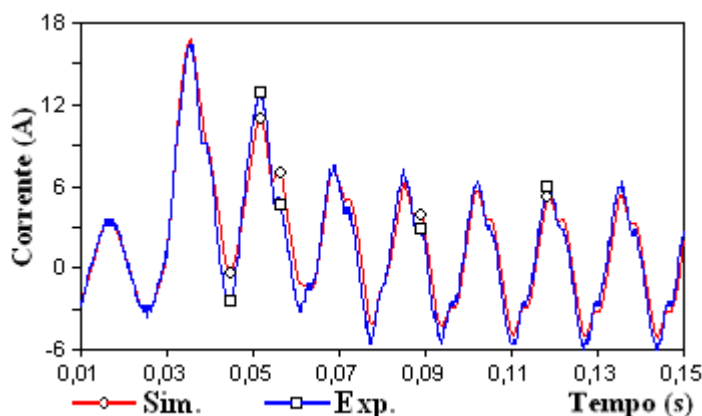


Figura 6.13 - Corrente total, para o sistema simulado e ensaiado, com o LCC montado na configuração A1.

Mas apenas a comparação da corrente total do sistema não demonstra a eficácia do modelo, assim, a Figura 6.14 traz a comparação de outros parâmetros do sistema para comprovar que o modelo utilizado realmente reproduz com bastante clareza a realidade, dentro dos limites pretendidos e pode muito bem ser utilizado para uma primeira estimativa em projetos de LCC desta natureza.

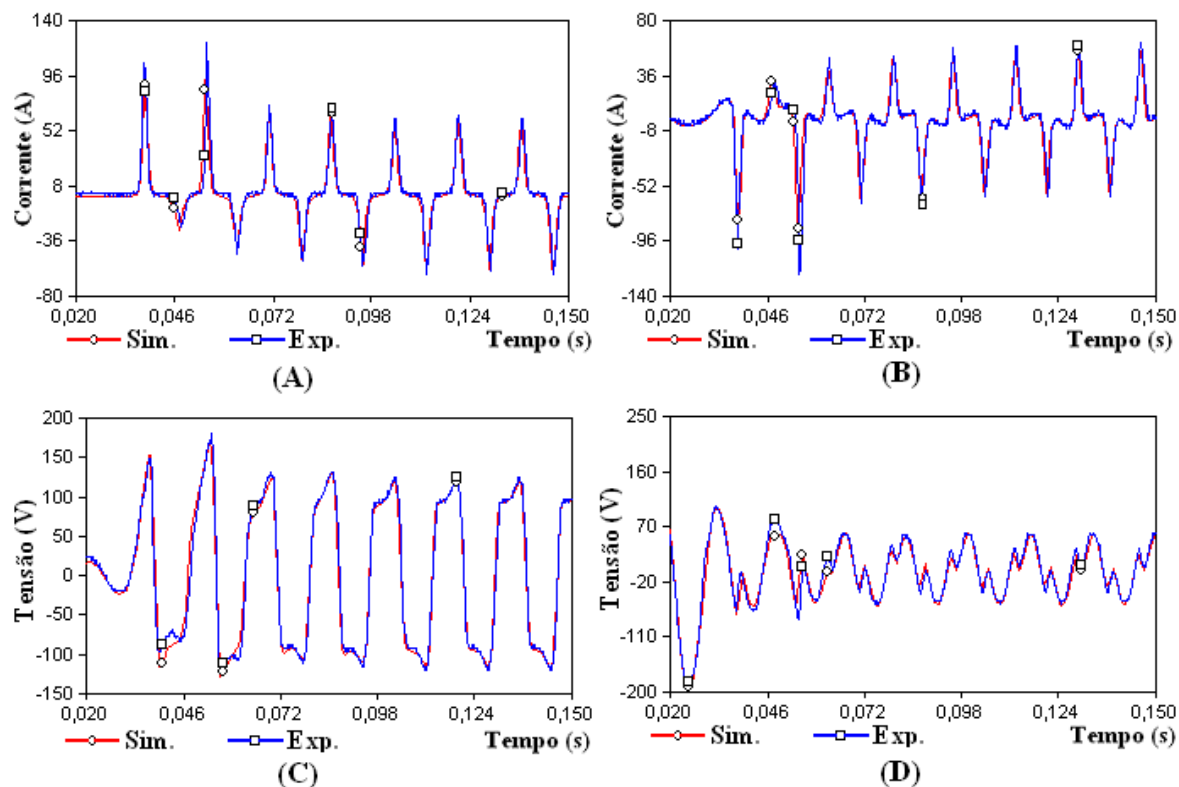


Figura 6.14 - (A) Corrente no RNS; (B) Corrente no Capacitor; (C) Tensão no RNS; (D) Tensão na Carga. Para o sistema simulado e ensaiado com o LCC montado na configuração A1.

A Tabela 6.3 apresenta os valores de pico de alguns parâmetros do sistema com LCC simulado e ensaiado. Desta tabela pode ser observado que o modelo é bastante aceitável para as pretensões do trabalho.

Tabela 6.3 - Valores de pico dos parâmetros do sistema simulado e ensaiado, para o LCC montado na configuração A1.

	Sistema ensaiado com a presença do LCC	Sistema simulado com a presença do LCC	Erro (%)
$I_{\text{nomial}} (A_{\text{pico}})$	3,40	3,41	0,29
$I_{\text{transitório}} (A_{\text{pico}})$	16,40	16,86	2,73
$I_{\text{regime}} (A_{\text{pico}})$	6,00	5,16	14,00
$V_{\text{carga antes}} (V_{\text{pico}})$	188,00	196,00	4,08
$V_{\text{carga após}} (V_{\text{pico}})$	56,00	57,74	3,01
$V_{\text{reator}} (V_{\text{pico}})$	124,00	116,61	5,96
$I_{\text{capacitor}} (A_{\text{pico}})$	60,00	56,39	6,02
$I_{\text{reator}} (A_{\text{pico}})$	62,00	59,68	3,74

6.2.5 Tempo de Resposta do LCC

O tempo que um dispositivo leva para operar quando é chamado a atuar é um ponto que merece destaque especial, seja qual for o equipamento que esteja sendo estudado, pois este dado pode ser um parâmetro decisivo na seleção de um determinado dispositivo. Por isso, um tópico a parte foi separado neste trabalho para discutir o tempo que o LCC leva para operar quando um curto circuito é estabelecido no sistema onde este está instalado.

A Figura 6.15 mostra as formas de onda das correntes e tensões no sistema ensaiado com e sem a presença do LCC. As ondas de tensões foram grafadas junto com as correntes na Figura 6.15(A) para efeito comparativo, já que a chave (CH) que aciona o curto é fechada quando a tensão passa pelo zero. O círculo em destaque na Figura 6.15(A) detalha o momento de fechamento da chave e a Figura 6.15(B) destaca que a corrente do sistema com LCC acompanha a corrente do sistema sem o LCC até certo ponto muito próximo da origem do curto, comprovando que o tempo de resposta do LCC é praticamente nulo.

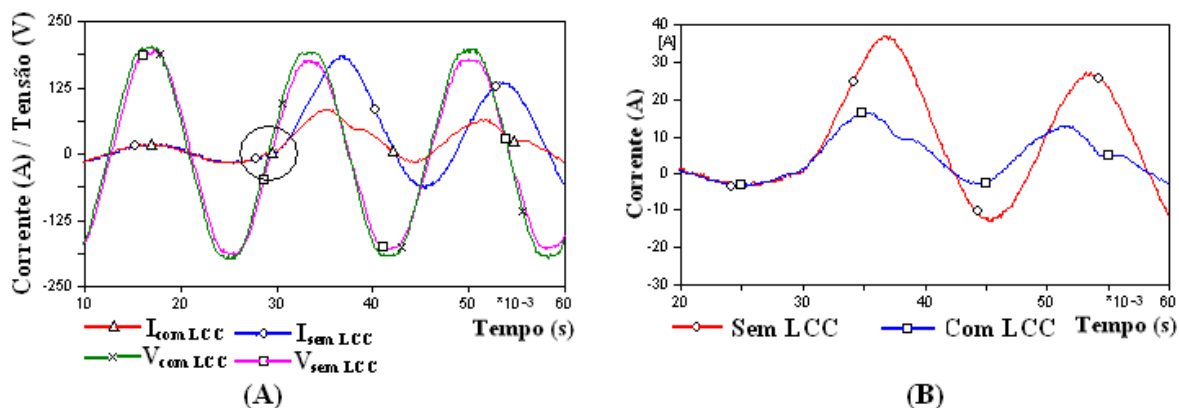


Figura 6.15 - (A) Tensões e correntes no sistema com e sem o LCC; (B) Detalhe das correntes no sistema com e sem LCC. Para o LCC montado na configuração A1. OBS: As correntes em (A) foram multiplicadas por um fator de 5 vezes para melhor visualização.

Para efeito comparativo, foi realizada uma simulação semelhante à descrita anteriormente, colocando no lugar do RNS uma chave ideal (CH_i) para efetuar o controle do LCC, por esta se tratar do dispositivo com o menor tempo de resposta que poderia existir. A simulação com a presença da chave no lugar do RNS foi realizada da seguinte forma: o tempo em que a chave (CH) que impõe o curto no sistema foi colocado o mesmo

na chave (CH_i), para que esta não conduza corrente alguma antes da ocorrência do curto. A Figura 6.16 mostra o diagrama esquemático desta simulação e seu *roteiro* encontra-se no Apêndice A.3.

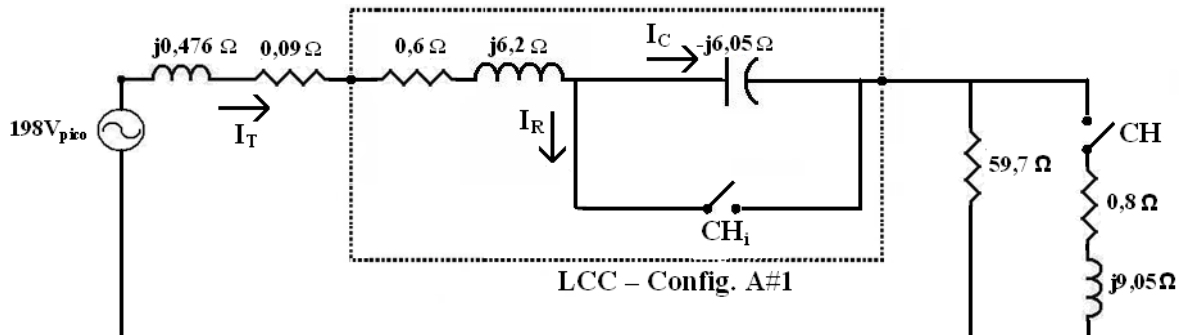


Figura 6.16 - Diagrama esquemático para simulação do LCC com chave ideal para realização de seu controle e montado na configuração A1.

A Figura 6.17 mostra a comparação do tempo de resposta do LCC com RNS, com a chave (CH_i) e sem LCC para o sistema simulado. Como pode ser observado na parte da onda interior ao círculo na Figura 6.17, a onda de corrente para o LCC com RNS acompanha a onda de corrente para o LCC com a chave (CH_i), indicando que o tempo de resposta do LCC a base de RNS assemelha-se com o do LCC utilizando uma chave ideal para efetuar seu controle, ou seja, praticamente nulo.

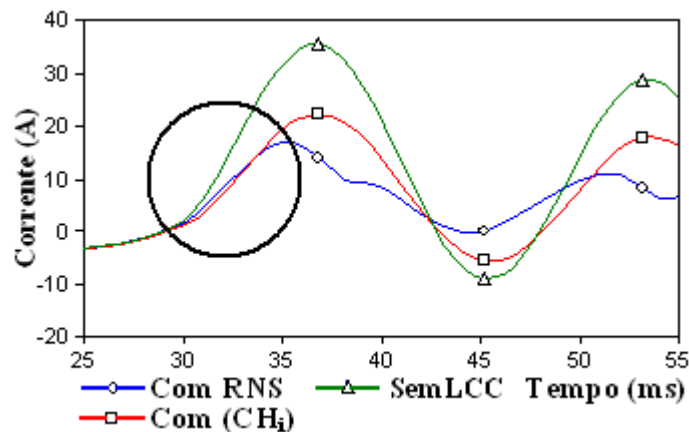


Figura 6.17 - Correntes do sistema simulado para o LCC com RNS, com CH_i e sem LCC.

Outro ponto de destaque da Figura 6.17 é que a onda de corrente para o LCC com RNS acompanha a onda de corrente para o LCC com chave ideal até certo ponto, ficando ainda menor a partir deste ponto, indicando que a associação do capacitor com o RNS produz uma impedância que, somada a impedância do reator linear do LCC, reduz ainda mais a corrente do sistema, fato que não ocorre com a utilização da chave ideal por esta não possuir qualquer impedância. Este fato será melhor abordado no próximo tópico, onde os ensaios são realizados com o mesmo RNS e, apesar desta configuração de LCC não fazer uso de reatores lineares em sua composição, a corrente é bastante reduzida.

6.3 RESULTADOS DA CONFIGURAÇÃO B1

A configuração B1 foi especificada no capítulo 4 como sendo uma arquitetura que não utiliza o reator linear como principal elemento de redução da corrente de curto circuito, esta função é desempenhada pela impedância resultante da associação entre o capacitor e o RNS, que precisa ter uma característica $v \times i$ menos inclinada que os RNS utilizados nas configurações do tipo A. Como descrito no capítulo 4 esta arquitetura só pode ser utilizada em circuitos que necessitem de compensação série, pois não existe o reator linear para tornar nulo o efeito do capacitor enquanto o sistema operar sob regime normal. A Figura 6.18 apresenta o esquema de montagem que será utilizado para ensaiar e simular o LCC montado na configuração B1.

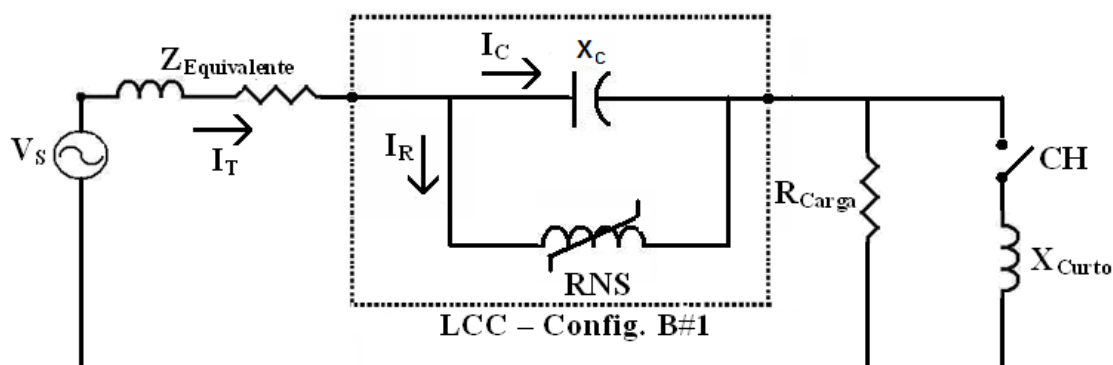


Figura 6.18 - Esquema simplificado de montagem para o ensaio da configuração B1.

6.3.1 Obtenção do Equivalente de Thévenin e Escolha dos Elementos que Representam a Carga e o Curto Circuito

O *Equivalente de Thévenin* e os dados da carga e curto circuito utilizados para os ensaios e simulação desta configuração são exatamente os mesmos que os utilizados na configuração A1. Portanto todos os valores de impedâncias, tensões e correntes estimados nos estudos da configuração A1 serão também utilizados nesta configuração.

6.3.2 Escolha dos Valores dos Componentes do LCC

Como já adiantado, o RNS utilizado para controle do LCC da configuração B1 é o mesmo utilizado na configuração A1, portanto com a característica $v \times i$ apresentada na Figura 6.7.

O valor do banco de capacitores utilizados também foi igual ao utilizado na configuração A1, para conseguir saturar o RNS quando for imposto ao sistema um curto circuito em que a corrente atinja os valores especificados no tópico anterior. Portanto o diagrama esquemático para ensaio e simulação da configuração B1 é como apresentado na Figura 6.19.

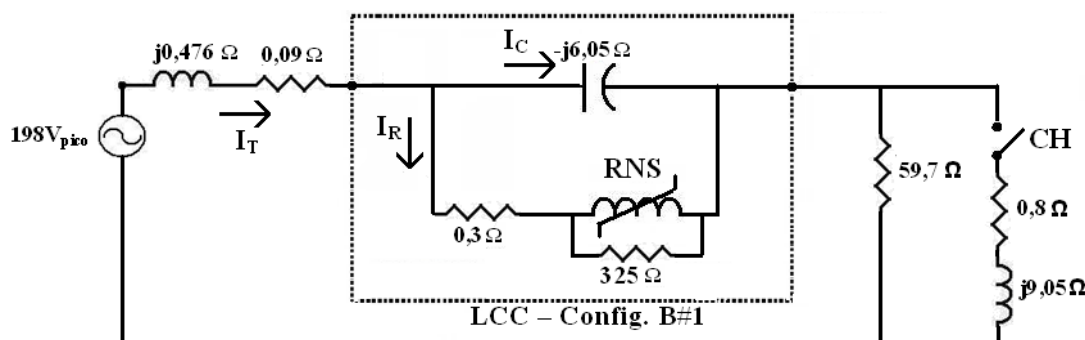


Figura 6.19 - Esquema completo de montagem para o ensaio da configuração B1.

6.3.3 Resultados Experimentais

Neste t3pico ser3o apresentados os resultados dos ensaios realizados com o sistema na presen3a do LCC montado com a arquitetura B1 e ser3o comparados com os resultados da configura33o A1.

A Figura 6.20 mostra a redu33o na corrente do sistema que 3 proporcionada com a inser33o do LCC e a Figura 6.21 mostra a rela33o entre as tens3es na carga para o sistema com e sem a presen3a do LCC.

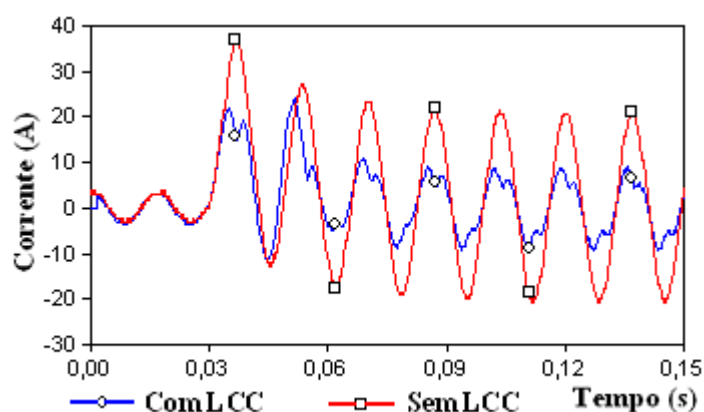


Figura 6.20 - Corrente total, para o sistema com e sem a presen3a do LCC, montado na configura33o B1.

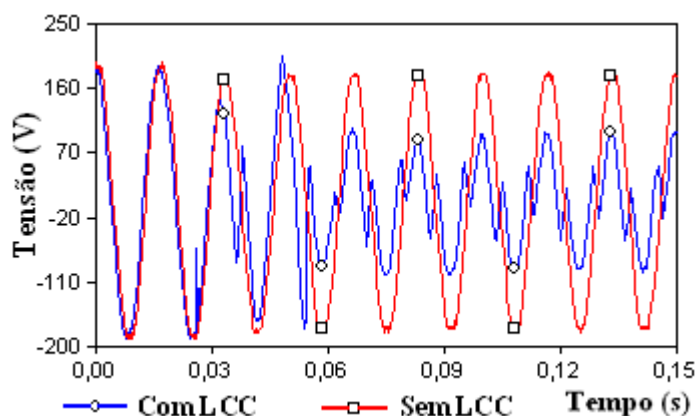


Figura 6.21 - Tens3o na carga, para o sistema com e sem a presen3a do LCC, montado na configura33o B1.

A Figura 6.22(A) mostra a rela33o entre a corrente total, a corrente no capacitor e a corrente no RNS e a Figura 6.22(B) mostra a rela33o entre a tens3o e a corrente no RNS.

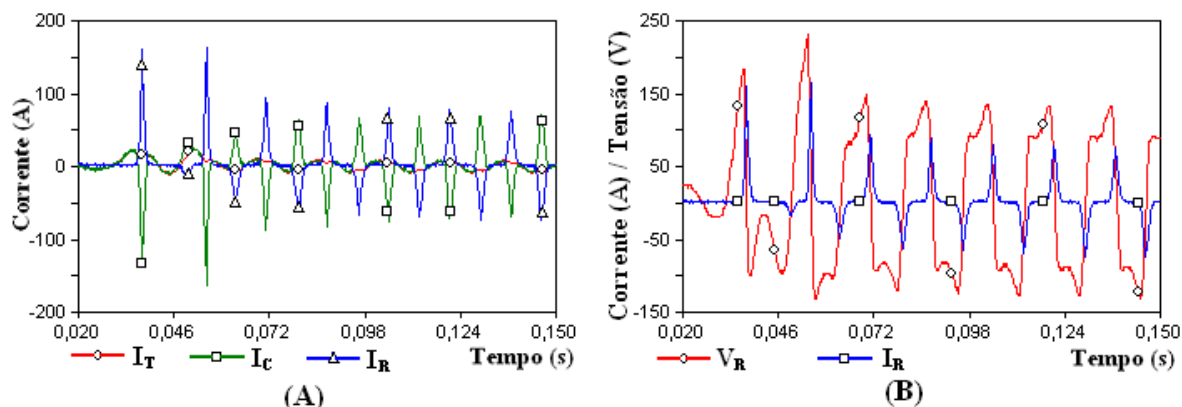


Figura 6.22 - (A) Corrente Total, do Capacitor e do RNS; (B) Tensão e corrente no RNS. Para o LCC montado na configuração B1.

Todas as observações feitas a respeito dos resultados dos ensaios apresentados para configuração A1, são aplicadas a estes resultados.

A Figura 6.23 compara as correntes do sistema sem a presença do LCC e com a presença do LCC montado nas configurações A1 e B1.

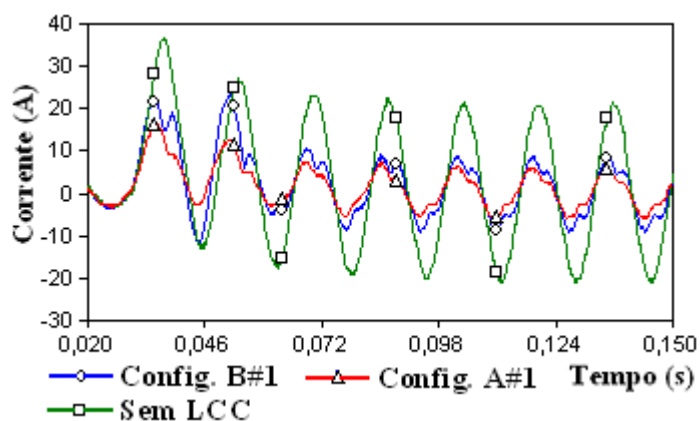


Figura 6.23 - Correntes no sistema sem a presença de LCC e com LCC montado nas configurações A1 e B1.

Como já era esperado, o LCC montado na configuração B1 reduz menos a corrente de curto quando comparado com a configuração A1, devido à presença do reator linear na configuração A1 e, como já comentado, a associação do capacitor com o RNS é responsável pela maior parte da redução da corrente. A Tabela 6.4 apresenta de forma numérica a comparação entre os parâmetros dos sistemas ensaiados.

Tabela 6.4 - Valores de pico dos parâmetros do sistema sem a presença do LCC e com LCC montado nas configurações A1 e B1.

	Sistema sem a presença do LCC	Sistema com a presença do LCC na configuração B#1	Sistema com a presença do LCC na configuração A#1
$I_{\text{nomial}} (A_{\text{pico}})$	3,20	3,40	3,40
$I_{\text{transitório}} (A_{\text{pico}})$	36,80	21,60	16,40
$I_{\text{regime}} (A_{\text{pico}})$	20,80	8,80	6,00
$V_{\text{carga antes}} (V_{\text{pico}})$	190,00	188,00	188,00
$V_{\text{carga após}} (V_{\text{pico}})$	178,00	100,00	56,00
$V_{\text{reator}} (V_{\text{pico}})$	-----	132,00	124,00
$I_{\text{capacitor}} (A_{\text{pico}})$	-----	74,00	60,00
$I_{\text{reator}} (A_{\text{pico}})$	-----	76,00	62,00

Pelos valores expostos na Tabela 6.4 observa-se que a corrente de primeiro pico ($I_{\text{transitório}}$) foi reduzida a 58,7% em relação ao sistema sem LCC e a corrente depois de alcançado o regime (I_{regime}) reduzida a 42,3%. Quando comparados estes mesmos parâmetros para o sistema com LCC montado nas duas configurações estudadas, nota-se que a corrente de primeiro pico ($I_{\text{transitório}}$) e a corrente depois de alcançado o regime (I_{regime}) foram reduzidas respectivamente em 14,1% e 13,5% mais na configuração A1 que na configuração B1.

Estes valores foram conseguidos devido aos dispositivos utilizados para realização dos ensaios, mas, em princípio, qualquer valor de redução de corrente pode ser alcançado, basta realizar o ajuste correto dos valores do capacitor e da inclinação da curva $v \times i$ do RNS. Portanto, esta é uma configuração de LCC que pode trazer uma economia bastante razoável em projetos onde possa ser utilizada, justamente pela diminuição de um elemento em sua composição.

6.3.4 Resultados de Simulação

Neste item serão realizadas comparações entre os resultados de simulação com os resultados experimentais. O roteiro completo deste programa em EMTP-ATP está descrito no Apêndice A.4.

A Figura 6.24 mostra as correntes totais para o sistema simulado e ensaiado.

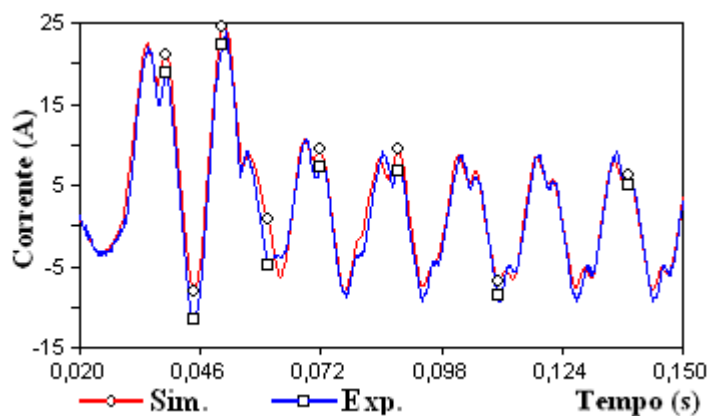


Figura 6.24 - Corrente total, para o sistema simulado e ensaiado, com o LCC montado na configuração B1.

Nota-se da Figura 6.24 que o modelo utilizado para configuração B1 é bastante robusto no que diz respeito a reprodução da corrente total do sistema. A Figura 6.25 e a Tabela 6.5 apresentam comparações de outros parâmetros do sistema ensaiado e simulado para comprovar a eficácia do modelo utilizado.

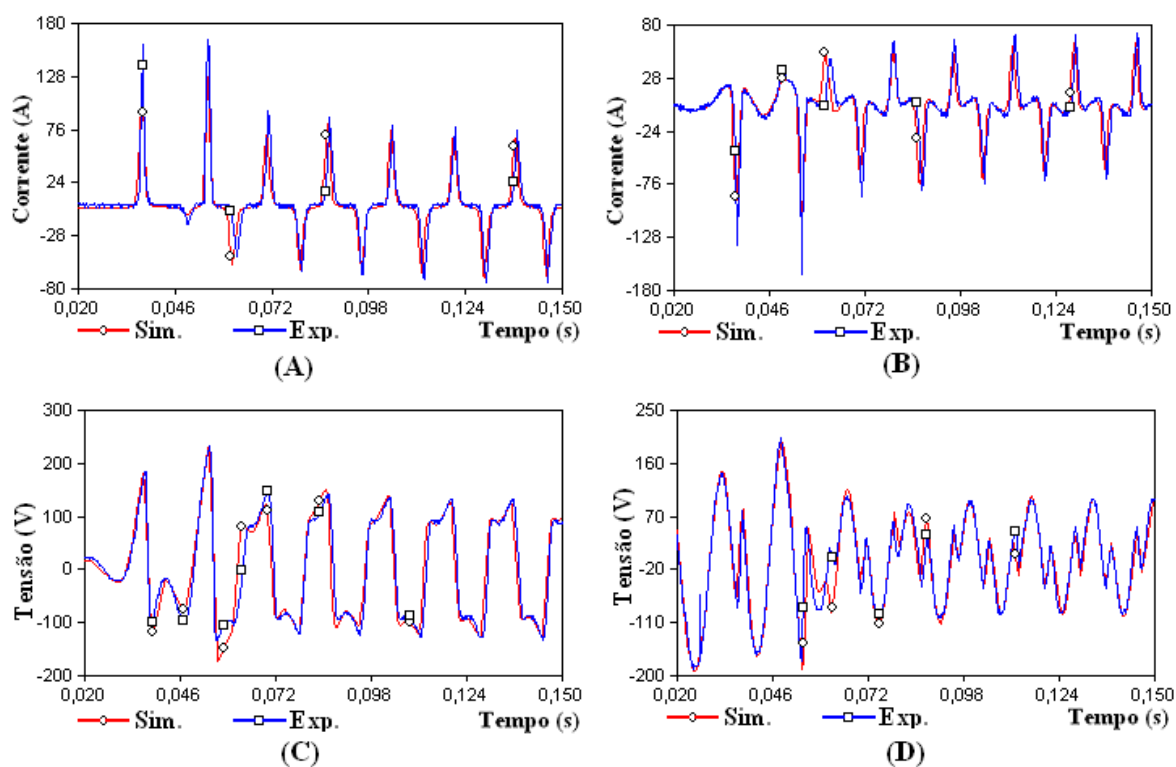


Figura 6.25 - (A) Corrente no RNS; (B) Corrente no Capacitor; (C) Tensão no RNS; (D) Tensão na Carga. Para o sistema simulado e ensaiado com o LCC montado na configuração B1.

Tabela 6.5 - Valores de pico dos parâmetros do sistema simulado e ensaiado, para o LCC montado na configuração B1.

	Sistema ensaiado com a presença do LCC	Sistema simulado com a presença do LCC	Erro (%)
$I_{\text{nomial}} (A_{\text{pico}})$	3,40	3,39	0,29
$I_{\text{transitório}}$	21,60	22,53	4,13
$I_{\text{regime}} (A_{\text{pico}})$	8,80	7,83	11,02
$V_{\text{carga antes}}$	188,00	190,00	1,05
$V_{\text{carga após}}$	100,00	98,74	1,26
$V_{\text{reator}} (V_{\text{pico}})$	132,00	126,12	4,45
$I_{\text{capacitor}} (A_{\text{pico}})$	74,00	62,48	15,57
$I_{\text{reator}} (A_{\text{pico}})$	76,00	67,69	10,93

6.3.5 Tempo de Resposta do LCC

Este tópico é também apresentado para esta configuração para mostrar que o tempo de resposta do LCC independe da arquitetura em que ele esteja montado e sim que este tempo é intrínseco do LCC. A Figura 6.26 mostra as correntes do sistema ensaiado com e sem a presença do LCC e dela comprova-se a velocidade de resposta do LCC.

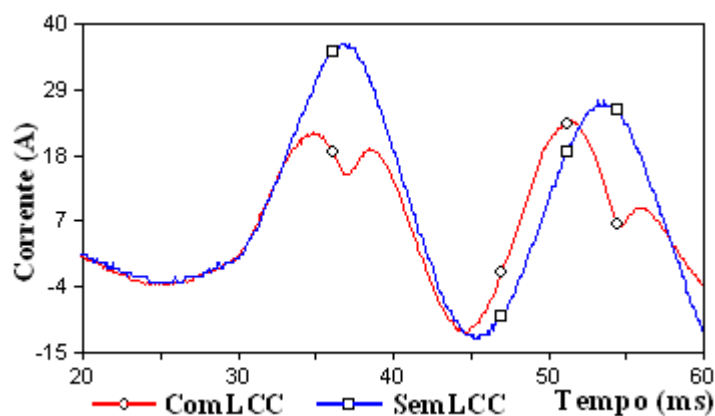


Figura 6.26 - Correntes do sistema experimentado sem e com a presença do LCC, montado na configuração B1.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais obtidos com a aplicação série de RNS montados nas configurações propostas no capítulo 4, denominadas de A1 e B1, mostram que este dispositivo é extremamente eficaz no controle da corrente, desempenhando com êxito a função a que lhes foram destinadas neste trabalho, que é a de operar como limitador de corrente de curto circuito. Outro dado positivo, e esperado, obtido através dos resultados experimentais, é que o dispositivo não causa influência alguma no sistema quando este opera em regime normal, denotando que este dispositivo se enquadra na categoria de elemento ativo, como classificado no capítulo 3. Os resultados dos ensaios apresentados nos Apêndices B.1 e B.2 com o LCC montado nas configurações A2 e A3 respectivamente, reforçam ainda mais a eficiência deste dispositivo e reiteram a informação de que a escolha de uma determinada arquitetura de LCC depende de um estudo de caso, pois todas as configurações apresentaram resultados satisfatórios.

Com relação ao modelo do sistema adotado para simulação, ainda é necessário alguns ajustes para torná-lo uma ferramenta capaz de fornecer resultados apropriados para estudos mais detalhados, como o projeto de um LCC, mas é bastante satisfatório para as pretensões do trabalho, já os resultados indicam que este pode ser modelado através de elementos discretos, facilitando assim sua modelagem.

7 CONCLUSÃO

7.1 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados alcançados com a elaboração deste trabalho mostram que seus objetivos foram alcançados com sucesso.

O primeiro era o de apresentar alternativas inovadoras que aplicassem RNS ligados em série. Este objetivo foi alcançado no capítulo 4, onde foram apresentadas arquiteturas com montagens e funcionalidades inéditas para dispositivos que empregam os RNS como elemento de controle, assim como também, as vantagens e desvantagens inerentes a cada uma delas.

O segundo objetivo também foi alcançado, uma vez que elementos em tamanho reduzido das novas arquiteturas propostas para utilização série de RNS foram construídos e ensaiados em laboratório, o que possibilitou uma análise detalhada do comportamento dos mesmos.

Os resultados experimentais obtidos com a aplicação série de RNS funcionando como LCC, comprovam que este dispositivo é extremamente eficaz na contenção da corrente de curto circuito de sistemas elétricos, podendo promover, em princípio, qualquer nível de redução desejado. A rapidez de resposta do dispositivo também se mostrou exemplar, atuando de forma praticamente instantânea no controle das correntes de defeito. Além disso, o LCC a base de RNS pode incorporar, se assim for pretendido, também o papel de uma compensação série para o sistema elétrico.

O terceiro objetivo do trabalho também foi atingido, já que os resultados das simulações do LCC a base de RNS realizadas no EMTP-ATP indicam que o mesmo pode ser perfeitamente representado por intermédio de elementos discretos de fácil implementação em qualquer programa computacional. Os afastamentos verificados entre as grandezas medidas em laboratório e aquelas obtidas nas simulações podem ser considerados satisfatórios.

Os resultados alcançados com este estudo exprimem mais do que um simples trabalho de mestrado, disponibilizando, para o mercado eletroeletrônico, uma nova tecnologia capaz de concorrer favoravelmente com os LCC disponíveis comercialmente ou em desenvolvimento experimental. Ainda mais, como as empresas brasileiras dominam o processo construtivo de todos os elementos que compõem o LCC, este equipamento pode ser confeccionado em território nacional, gerando empregos e renda dentro do próprio país e eliminando o pagamento a consultorias e royalties pelo uso de uma tecnologia estrangeira.

Os LCC a base de RNS, além das vantagens econômicas e sociais enunciadas anteriormente, possuem algumas vantagens técnicas em relação às tecnologias presentes atualmente no mercado, tais como: menor custo de aquisição; baixo custo com manutenção; operação desassistida; e elevada confiabilidade e durabilidade.

Por tudo isso que foi relatado, pode-se considerar que é perfeitamente factível e economicamente viável o desenvolvimento de limitadores de corrente de curto circuito que adote os reatores com saturação natural como elemento de controle.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de aperfeiçoar o trabalho ora desenvolvido, são propostos alguns temas para trabalhos futuros:

- Desenvolver ferramentas que possibilitem, a partir de uma dada especificação, o dimensionamento de cada elemento do LCC de modo a atender cada um dos requisitos desejados;
- Estabelecer um modelo matemático preciso que leve em consideração a estrutura magnética do reator saturado, especialmente o modo como as lâminas são empilhadas para formação do núcleo;
- Desenvolver uma metodologia para o projeto do tipo particular de RNS requerido pelo LCC em particular da estrutura eletromagnética mais adequada para uma dada aplicação;
- Definir critérios e parâmetros que permitam estabelecer o alcance de cada uma das arquiteturas de LCC ora propostas, destacando as aplicações mais indicadas para cada uma em função do nível pretendido de redução da corrente de curto circuito;
- Pesquisar o nível de distorção harmônica produzida por cada arquitetura de LCC, definindo, quando necessário, os recursos mais indicados para adequar o projeto às exigências normativas;
- Realizar um estudo aprofundado sobre o comportamento do LCC durante a variação de carga que ocorre normalmente nos sistemas elétricos, principalmente quando o LCC for utilizado também como um compensador série;
- Apresentar um estudo comparativo dos custos envolvidos na aquisição, manutenção e operação de cada um dos tipos de LCC propostos.

8 APÊNDICES

8.1 APÊNDICE A

Apêndice A.1 – Roteiro da modelagem do sistema sem a presença do LCC.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW fevereiro, segunda-feira 9, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
C 1.E-6 0.25
C 500 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1>>ref2>> R >> A >> B >>Leng>>>>0
C ***** EQUIVALENTE DE THÉVENIN *****
FONT INDENT 0.090 1.26 3
C ***** CARGA NOMINAL DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
INDENT 59.7 3
C ***** CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
CARNOM 0.800 24.0 3
/SWITCH
C ***** CHAVE DO CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
C < n 1>> n 2>> Tclose >>Top/Tde >> Ie >>Vf/CLOP >> type >
INDENTCARNOM 0.029167 10 0
/SOURCE
C ***** FONTE DO SISTEMA DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
C < n 1>>>> Ampl. >> Freq. >>Phase/T0>> A1 >> T1 >> TSTART >> TSTOP >
14FONT 0 190. 60. -1. 1.E3
/OUTPUT
FONT CAPRNS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Apêndice A.2 – Roteiro da modelagem do sistema com LCC montado na configuração A1.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW fevereiro, segunda-feira 9, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6  0.25
    500    1    1    1    1    0    0    1    0
C      1    2    3    4    5    6    7    8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >> A >> B ><Leng><><>0
C ***** EQUIVALENTE DE THÉVENIN *****
  FONT INDEQV          0.090 1.26                                1
C ***** REATOR LINEAR SERIE DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
  INDEQVINDENT        0.600 16.40                                2
C ***** CAPACITOR DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
  INDENTCAPRNS          438.0                                    3
C ***** REATOR NATURALMENTE SATURADO DA CONFIGURAÇÃO A#1 ***
  INDENTRESRNS          0.300                                    0
  INDRNSCAPRNS          325.0                                    0
98RESRNSCAPRNS          0.0  0.0                                0
    0.7000          0.1050
    0.9000          0.1600
    2.9000          0.2250
   10.0000          0.2900
   18.7000          0.3200
   28.8000          0.3350
   47.6000          0.3600
   80.0000          0.4000
    9999
C ***** CARGA NOMINAL DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
  CAPRNS          59.7                                          3
C ***** CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
  CARGCC          0.80  24.0                                    3
C
/SWITCH
C ***** CHAVE DO CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CAPRNSCARGCC  0.029167    1.E3                                0
C
/SOURCE
C ***** FONTE DO SISTEMA DA CONFIGURAÇÃO A#1 *****
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT  0    198.    60.    -1.    1.E3
/OUTPUT
  FONT CAPRNS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Apêndice A.3 – Roteiro da modelagem do sistema com LCC montado na configuração A1, com chave (CH_i) no lugar do RNS.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW fevereiro, segunda-feira 9, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6    0.25
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C ***** EQUIVALENTE DE THÉVENIN *****
  FONT INDEQV          0.090 1.26                                1
C ** REATOR LINEAR SERIE DA CONFIGURAÇÃO COM CHAVE (CHi) **
  INDEQVINDENT        0.600 16.40                                2
C ***** CAPACITOR DA CONFIGURAÇÃO COM CHAVE (CHi) *****
  INDENTCAPRNS        438.0                                     3
C ***** CARGA NOMINAL DA CONFIGURAÇÃO COM CHAVE (CHi) *****
  CAPRNS              59.0                                     3
C ***** CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO COM CHAVE (CHi) *****
  CARGCC              0.80 24.0                                3
C
/SWITCH
C* CHAVE DO CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO COM CHAVE (CHi)*
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CAPRNSCARGCC 0.029167      1.E3                                0
C *** CHAVE COLOCADA NO LUGAR DO RNS DA CONFIGURAÇÃO A#1 ***
  INDENTCAPRNS 0.029167      1.E3                                0
C
/SOURCE
C *** FONTE DO SISTEMA DA CONFIGURAÇÃO COM CHAVE (CHi) *****
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0      198.      60.                                -1.      1.E3
/OUTPUT
  FONT CAPRNS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Apêndice A.4 - Roteiro da modelagem do sistema com LCC montado na configuração B1.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW fevereiro, segunda-feira 9, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6    0.25
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>> R >> A >> B ><Leng><><>0
C ***** EQUIVALENTE DE THÉVENIN *****
  FONT INDENT          0.090 1.26                                1
C ***** CAPACITOR DA CONFIGURAÇÃO B#1 *****
  INDENTCAPRNS          438.0                                    3
C **** REATOR NATURALMENTE SATURADO DA CONFIGURAÇÃO B#1 ***
  CHVRNSRESRNS          0.300                                    0
  INDRNSCAPRNS          325.0                                    0
98RESRNSCAPRNS          0.0    0.0                                0
    0.7000          0.1050
    0.9000          0.1600
    2.9000          0.2250
    10.0000         0.2900
    18.7000         0.3200
    28.8000         0.3350
    47.6000         0.3600
    80.0000         0.4000
      9999
C ***** CARGA NOMINAL DA CONFIGURAÇÃO B#1 *****
  CAPRNS          59.7                                          3
C ***** CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO B#1 *****
  CARGCC          0.80 24.0                                      3
C
/SWITCH
C ***** CHAVE DO CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO B#1 *****
C < n 1>> n 2>> Tclose >>Top/Tde >> Ie >>Vf/CLOP >> type >
  CAPRNSCARGCC 0.029167      1.E3                                0
C
/SOURCE
C ***** FONTE DO SISTEMA DA CONFIGURAÇÃO B#1 *****
C < n 1>><> Amp1. >> Freq. >>Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0      198.      60.                                -1.      1.E3
/OUTPUT
  FONT CAPRNS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Apêndice A.5 - Roteiro da modelagem do sistema com LCC montado na configuração A2.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW fevereiro, segunda-feira 9, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6    0.25
    500    1    1    1    1    0    0    1    0
C      1    2    3    4    5    6    7    8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>> R >> A >> B ><Leng><><>0
C ***** EQUIVALENTE DE THÉVENIN *****
  FONT INDENT    0.090 1.26    1
C ***** CAPACITOR DA CONFIGURAÇÃO A#2 *****
  INDENTCAPRNS    438.0    3
C **** REATOR NATURALMENTE SATURADO DA CONFIGURAÇÃO A#2 ***
  CHVRNSRESRNS    0.600 8.10    0
  INDRNSCAPRNS    325.0    0
98RESRNSCAPRNS    0.0 0.0    0
    0.7000    0.1050
    0.9000    0.1600
    2.9000    0.2250
    10.0000    0.2900
    18.7000    0.3200
    28.8000    0.3350
    47.6000    0.3600
    80.0000    0.4000
    9999
C ***** CARGA NOMINAL DA CONFIGURAÇÃO A#2 *****
  CAPRNS    59.7    3
C ***** CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#2 *****
  CARGCC    0.80 24.0    3
C
/SWITCH
C ***** CHAVE DO CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#2 *****
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CAPRNSCARGCC 0.029167    1.E3    0
C
/SOURCE
C ***** FONTE DO SISTEMA DA CONFIGURAÇÃO A#2 *****
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0 196. 60. -1. 1.E3
/OUTPUT
  FONT CAPRNS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Apêndice A.6 - Roteiro da modelagem do sistema com LCC montado na configuração A3.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW fevereiro, segunda-feira 9, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6      0.25
    500      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>> R >> A >> B >>Leng><><>0
C ***** EQUIVALENTE DE THÉVENIN *****
  FONT INDEQV      0.090 1.26      1
C ***** REATOR LINEAR SERIE DA CONFIGURAÇÃO A#3 *****
  INDEQVINDENT      0.300 8.40      2
C ***** CAPACITOR DA CONFIGURAÇÃO A#3 *****
  INDENTCAPRNS      438.0      3
C **** REATOR NATURALMENTE SATURADO DA CONFIGURAÇÃO A#3 ***
  CHVRNSRESRNS      0.600 8.10      0
  INDRNSCAPRNS      325.0      0
98RESRNSCAPRNS      0.0 0.0      0
    0.7000      0.1050
    0.9000      0.1600
    2.9000      0.2250
    10.0000     0.2900
    18.7000     0.3200
    28.8000     0.3350
    47.6000     0.3600
    80.0000     0.4000
      9999
C ***** CARGA NOMINAL DA CONFIGURAÇÃO A#3 *****
  CAPRNS      59.7      3
C ***** CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#3 *****
  CARGCC      0.80 24.0      3
C
/SWITCH
C ***** CHAVE DO CURTO CIRCUITO DA CONFIGURAÇÃO A#3 *****
C < n 1>> n 2>> Tclose >>Top/Tde >> Ie >>Vf/CLOP >> type >
  CAPRNSCARGCC 0.029167      1.E3      0
C
/SOURCE
C ***** FONTE DO SISTEMA DA CONFIGURAÇÃO A#3 *****
C < n 1>>>> Ampl. >> Freq. >>Phase/T0>> A1 >> T1 >> TSTART >> TSTOP >
14FONT 0      194.      60.      -1.      1.E3
/OUTPUT
  FONT CAPRNS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```


8.2 APÊNDICE B

Apêndice B.1 – Resultados dos ensaios e simulações com o LCC montado na configuração A2.

- **Correntes do sistema e tensão na carga para os ensaios com e sem a presença do LCC.**

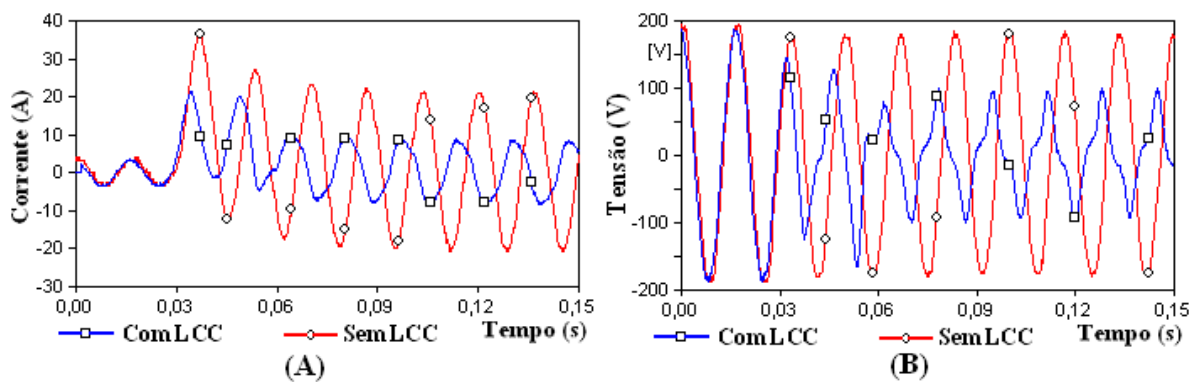


Figura 8.1 – (A) Correntes do sistema; (B) Tensão na carga. Para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A2.

- **Outros parâmetros do sistema ensaiado com a presença do LCC.**

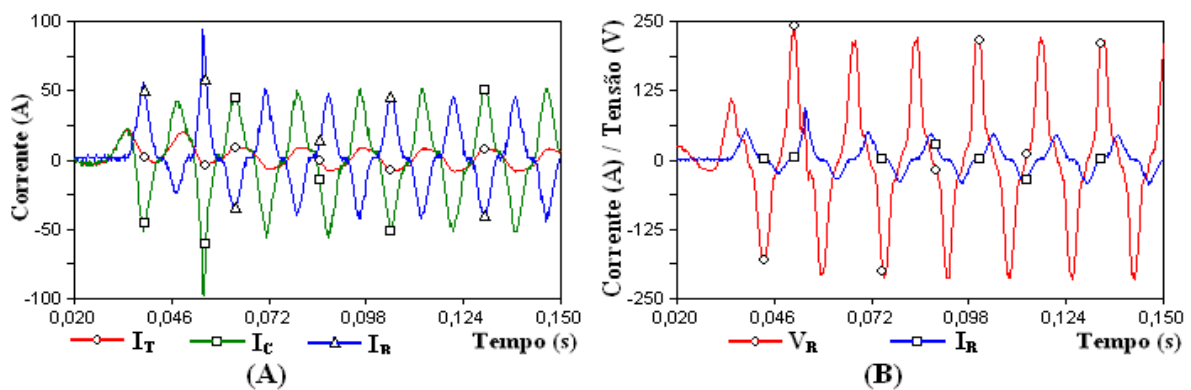


Figura 8.2 – (A) Corrente Total, no Capacitor e no RNS; (B) Tensão e corrente no RNS. Para o sistema ensaiado com a presença do LCC, montado na configuração A2.

➤ **Comparação do sistema ensaiado e simulado com a presença do LCC.**

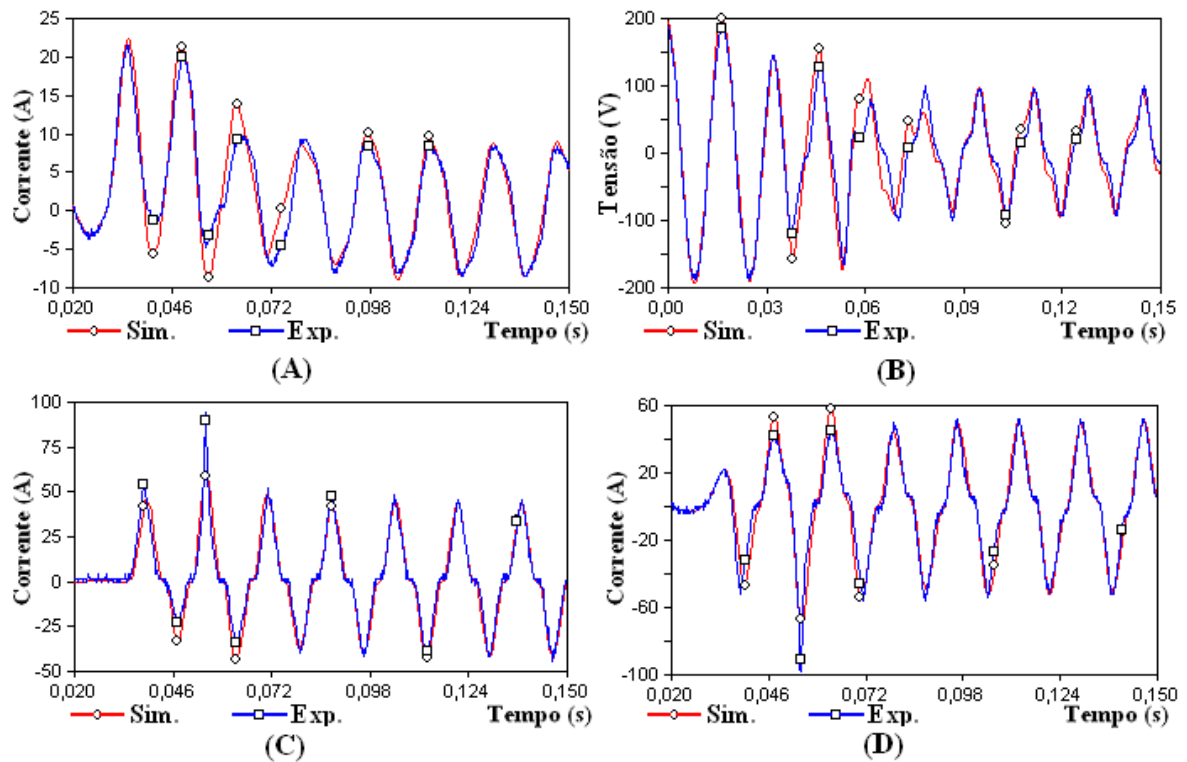


Figura 8.3 – (A) Corrente Total; (B) Tensão na Carga; (C) Corrente no RNS; (D) Corrente no Capacitor. Para o sistema ensaiado e simulado com a presença do LCC, montado na configuração A2.

Tabela 8.1 – Resultados para o sistema com LCC ensaiado, simulado e sem a presença de LCC. Montado na configuração A2.

	Sistema sem a presença do LCC	Sistema Ensaado com a presença do LCC montado na configuração A#2	Sistema Simulado com a presença do LCC montado na configuração A#2
$I_{nomial} (A_{pico})$	3,20	3,20	3,34
$I_{transitório} (A_{pico})$	36,80	21,60	22,36
$I_{regime} (A_{pico})$	20,80	8,40	8,80
$V_{carga\ antes} (V_{pico})$	190,00	188,00	193,24
$V_{carga\ após} (V_{pico})$	178,00	96,00	93,80
$I_{capacitor} (A_{pico})$	-----	52,00	51,22
$I_{reator} (A_{pico})$	-----	44,00	42,74

Apêndice B.2 – Resultados dos ensaios e simulações com o LCC montado na configuração A3.

- **Correntes do sistema e tensão na carga para os ensaios com e sem a presença do LCC.**

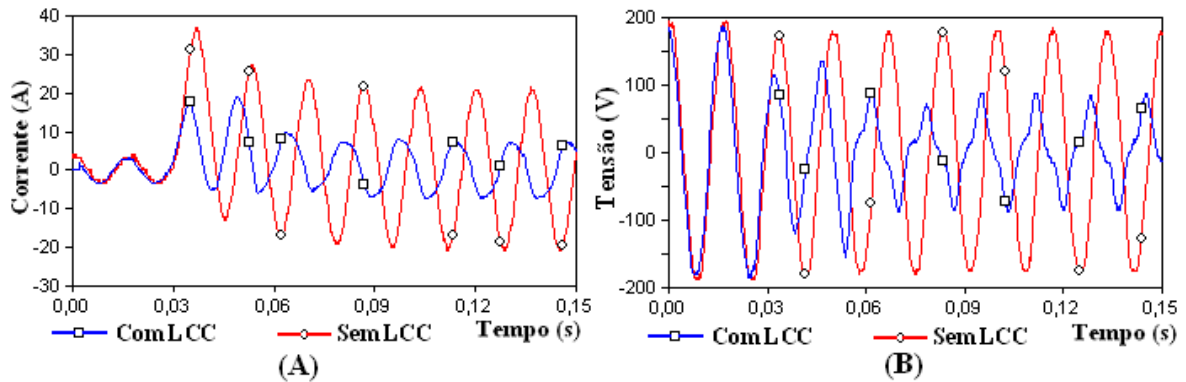


Figura 8.4 – (A) Correntes do sistema; (B) Tensão na carga. Para o sistema com e sem a presença do LCC, montado na configuração A3.

- **Outros parâmetros do sistema ensaiado com a presença do LCC.**

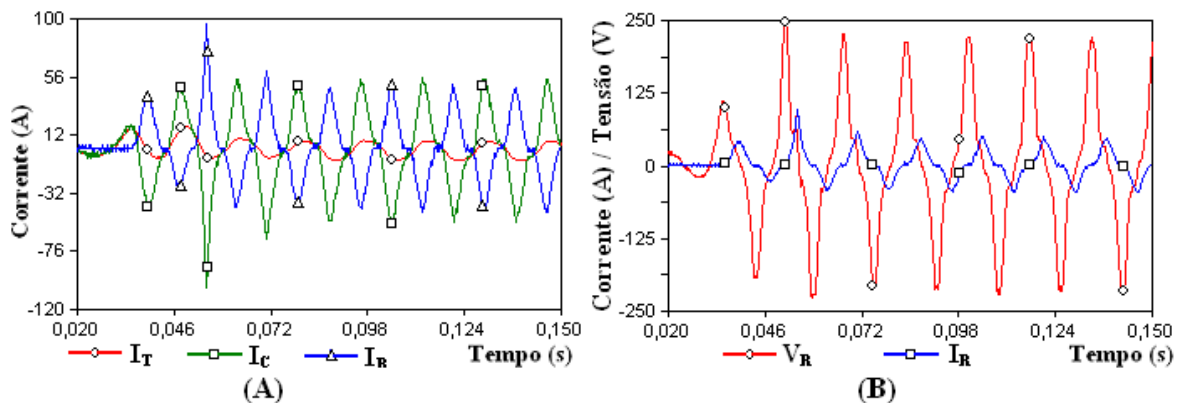


Figura 8.5 – (A) Corrente Total, no Capacitor e no RNS; (B) Tensão e corrente no RNS. Para o sistema ensaiado com a presença do LCC, montado na configuração A3.

➤ **Comparação do sistema ensaiado e simulado com a presença do LCC.**

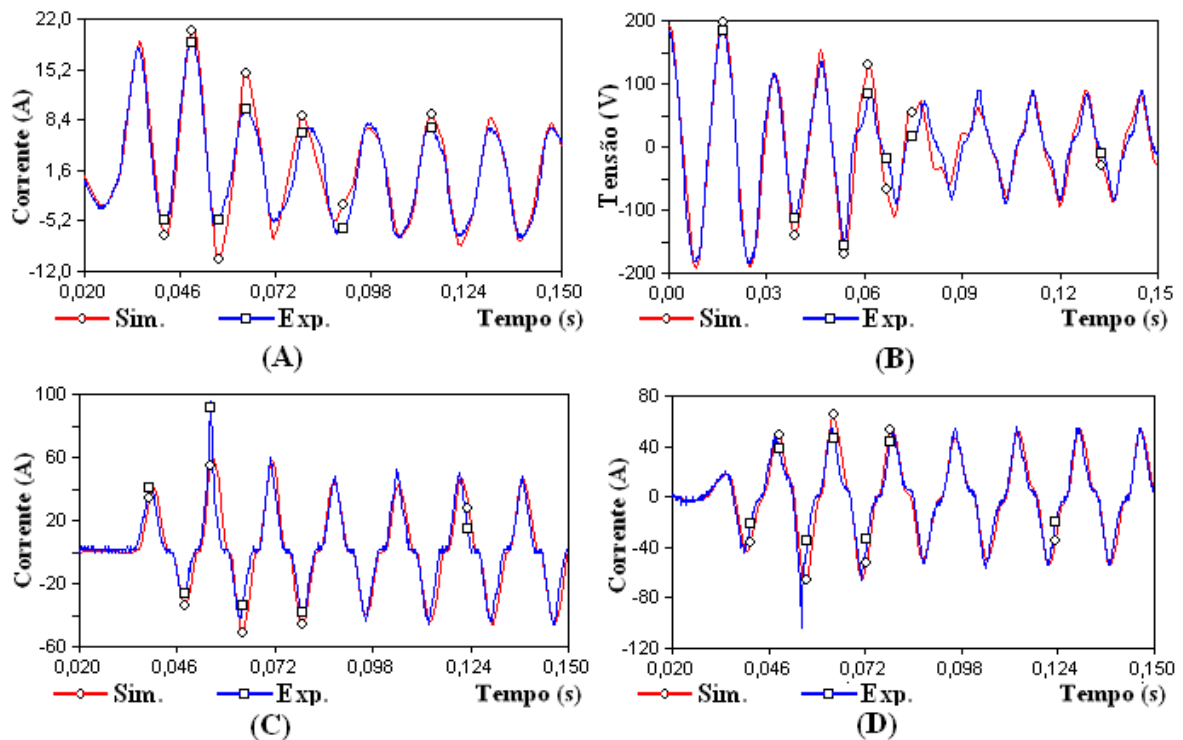


Figura 8.6 – (A) *Corrente Total*; (B) *Tensão na Carga*; (C) *Corrente no RNS*; (D) *Corrente no Capacitor*. Para o sistema ensaiado e simulado com a presença do LCC, montado na configuração A3.

Tabela 8.2 – Resultados para o sistema com LCC ensaiado, simulado e sem a presença de LCC. Montado na configuração A3.

	Sistema sem a presença do LCC	Sistema Ensaiado com a presença do LCC montado na configuração A#3	Sistema Simulado com a presença do LCC montado na configuração A#3
$I_{\text{nomial}} (A_{\text{pico}})$	3,20	3,10	3,31
$I_{\text{transitório}} (A_{\text{pico}})$	36,80	18,20	18,94
$I_{\text{regime}} (A_{\text{pico}})$	20,80	7,20	8,13
$V_{\text{carga antes}} (V_{\text{pico}})$	190,00	184,00	197,37
$V_{\text{carga após}} (V_{\text{pico}})$	178,00	88,00	83,76
$I_{\text{capacitor}} (A_{\text{pico}})$	-----	54,00	52,57
$I_{\text{reator}} (A_{\text{pico}})$	-----	48,00	45,08

9 ANEXOS

Anexo 1 – Ensaio para obtenção do *Equivalente de Thévenin*

A obtenção do *Equivalente de Thévenin* visto do ponto onde os ensaios foram realizados torna-se importante para que as simulações representem da melhor forma os resultados experimentais. Apesar de se ter idéia de que a impedância equivalente vista daquele ponto seria de valor muito baixo em relação aos valores dos componentes utilizados nos experimentos, decidiu-se obter o equivalente para eliminar erros de modelagem neste ponto, por mais que este erro seja pequeno.

Para obter o *Equivalente de Thévenin* foi seguido o processo de ensaio determinado em [29], como mostra a Figura 9.1. Os resultados destes ensaios estão apresentados nas Tabela 9.1 e Tabela 9.2.

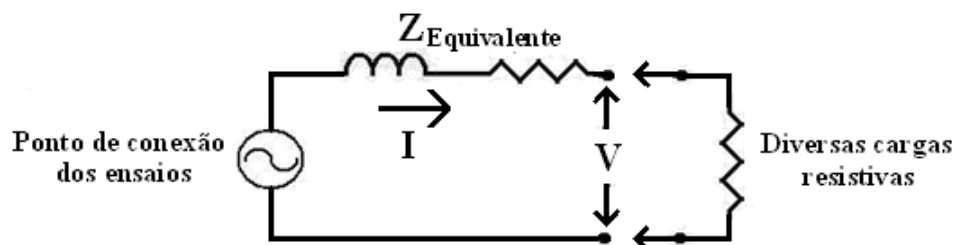


Figura 9.1 - Esquema de montagem do ensaio para obter a impedância equivalente.

Tabela 9.1 - Resultado das medidas do ensaio para obter o *Equivalente de Thévenin*.

	Tensão antes de colocar a carga (V_{VAZIO}) - (V)	Tensão após colocar a carga (V_{CARGA}) - (V)	Corrente da Carga (I_{CC}) - (A)
Medida 1	226,7	224,6	30,31
Medida 2	226,5	224,8	23,28
Medida 3	226,5	225,1	18,58
Medida 4	226,5	225,5	12,83

Tabela 9.2 - Resultado da impedância equivalente.

	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
Cálculo 1	0,085	0,492
Cálculo 2	0,085	0,474
Cálculo 3	0,084	0,452
Média	0,085	0,473

Portanto, o valor da impedância equivalente do sistema com arredondamento de duas casas decimais é:

$$Z_{\text{Equivalente}} = 0,09 + 0,47 \Omega \quad (9.1)$$

Todos os valores das medidas foram obtidos através de um analisador de qualidade de energia tipo 435 da marca FLUKE (*power quality analyzer, 435 - FLUKE*). Foram utilizadas as próprias garras de tensão que acompanha o equipamento e garras de corrente tipo TC – 80i-110s da FLUKE.

Anexo 2 – Ensaio para obtenção da resistência que representa a carga

Foi colocado em série com o resistor (da fabricante RR RESISTORES) um variador tensão (da marca AUJE), como mostrado na Figura 2.1. Em seguida foi sendo variados os valores de tensão e com isso a corrente que circula no circuito. Os valores de tensão e corrente foram obtidos através de um analisador de qualidade de energia tipo 435 da marca FLUKE (*power quality analyzer, 435 - FLUKE*). Foram utilizadas as próprias garras de tensão que acompanha o equipamento e garras de corrente tipo TC – 80i-110s da FLUKE.

De posse dos valores de tensão e corrente medidos no ensaio, foram calculados os valores da resistência ponto a ponto. Os resultados deste ensaio são mostrados na Tabela 9.3 e na Figura 9.3, onde pode ser observado que o valor da resistência pode ser considerado constante em toda faixa de ensaio.

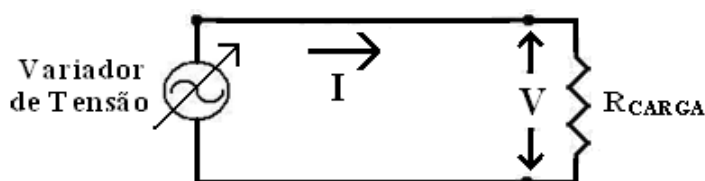
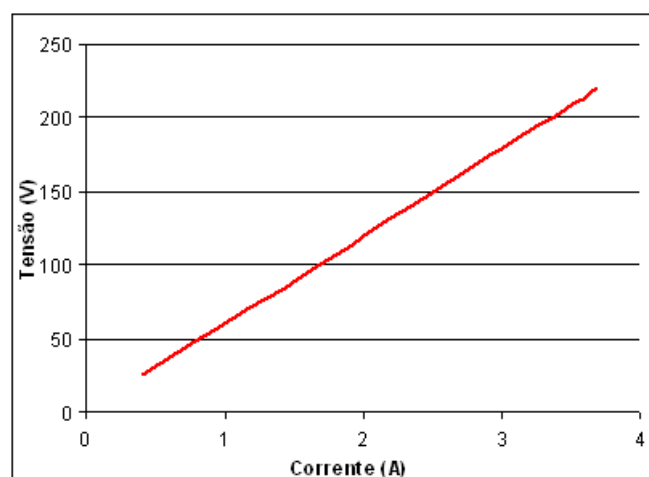


Figura 9.2 - Esquema de montagem do ensaio para obter a resistência de carga.

Tabela 9.3 - Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência de carga.

	Tensão aplicada nos terminais do resistor - (V)	Corrente do circuito - (A)	Resistencia calculada - (Ω)
Medida 1	24,75	0,41	60,33
Medida 2	40,00	0,67	60,00
Medida 3	55,70	0,92	60,34
Medida 4	70,35	1,18	59,64
Medida 5	84,90	1,44	59,13
Medida 6	100,20	1,69	59,21
Medida 7	114,30	1,92	59,44
Medida 8	132,30	2,21	60,00
Medida 9	147,80	2,49	59,42
Medida 10	167,00	2,79	59,75
Medida 11	184,00	3,08	59,80
Medida 12	205,60	3,46	59,40
Medida 13	220,20	3,69	59,64
Média			59,70

Figura 9.3 – Característica $v \times i$ do resistor que representa a carga.

Portanto a resistência que representa a carga nas simulações foi adotada com o valor igual a:

$$R_{CARGA} = 59,7 \Omega \quad (9.2)$$

Anexo 3 – Ensaio para obtenção da reatância indutiva que representa o curto circuito.

O ensaio para levantar as características dos reatores lineares que são responsáveis por impor um curto circuito ao sistema através de uma impedância foi dividido em duas partes. A primeira parte do ensaio consistiu em obter a resistência de perdas ôhmicas do enrolamento dos reatores e está descrita a seguir.

Foi colocada em série com o reator linear uma fonte de tensão DC variável, como mostra a Figura 9.4. Em seguida a fonte de tensão DC foi sendo variada e foram anotados os valores de tensão e corrente do circuito. A Tabela 9.4 mostra os resultados dos ensaios.

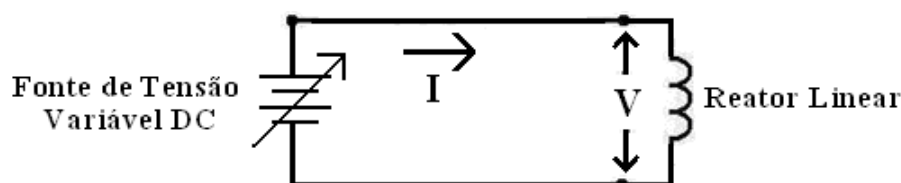


Figura 9.4 - Esquema de montagem do ensaio para obter a resistência dos indutores de curto circuito.

Tabela 9.4 - Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência dos indutores de curto circuito.

	Medidas do reator linear 1			Medidas do reator linear 2			Medidas do reator linear 3			Soma
	Tensão nos terminais do reator linear - (V_{cc})	Corrente no circuito - (A_{cc})	Resistência do reator linear (Ω)	Tensão nos terminais do reator linear - (V_{cc})	Corrente no circuito - (A_{cc})	Resistência do reator linear à 20 - $^{\circ}C$ (Ω)	Tensão nos terminais do reator linear - (V_{cc})	Corrente no circuito - (A_{cc})	Resistência do reator linear à 20 - $^{\circ}C$ (Ω)	
Medida 1	0,140	0,512	0,273	0,110	0,408	0,270	0,155	0,580	0,267	
Medida 2	0,220	0,829	0,265	0,230	0,875	0,263	0,285	1,090	0,261	
Medida 3	0,390	1,483	0,263	0,385	1,455	0,265	0,415	1,580	0,263	
Medida 4	0,650	2,484	0,262	0,510	1,920	0,266	0,576	2,210	0,261	
Média			0,266			0,266			0,263	0,795

A segunda parte do ensaio para obter as características dos reatores lineares, foi levantar suas curvas $v \times i$. O ensaio é semelhante ao realizado para obter a característica da resistência da carga (vide Anexo 2), colocando no lugar da resistência de carga, o reator linear de curto circuito, conforme Figura 9.5.

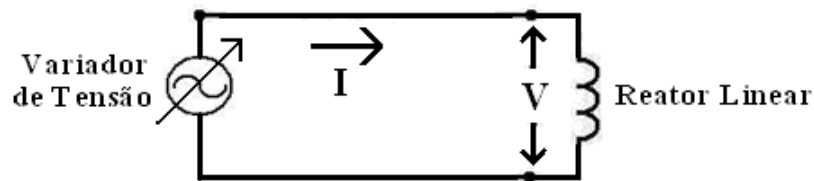


Figura 9.5 - Esquema de montagem do ensaio para obter a reatância dos indutores de curto circuito.

Os resultados deste ensaio estão apresentados na Tabela 9.5 e na Figura 9.6.

Tabela 9.5 - Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos indutores de curto circuito.

	Medidas do reator linear 1			Medidas do reator linear 2			Medidas do reator linear 2			Soma
	Tensão nos terminais do reator linear - (V)	Corrente no circuito - (A)	Reatância do reator linear (Ω)	Tensão nos terminais do reator linear - (V)	Corrente no circuito - (A)	Reatância do reator linear (Ω)	Tensão nos terminais do reator linear - (V)	Corrente no circuito - (A)	Reatância do reator linear (Ω)	
Medida 1	4,750	1,717	2,766	4,010	1,370	2,927	4,789	1,620	2,956	
Medida 2	9,460	3,290	2,875	9,610	3,147	3,054	13,900	4,500	3,089	
Medida 3	14,810	5,063	2,925	16,930	5,480	3,089	19,800	6,420	3,084	
Medida 4	23,770	8,040	2,956	24,750	7,880	3,141	26,900	8,680	3,099	
Medida 5	30,930	10,490	2,949	31,590	10,120	3,122	34,000	10,980	3,097	
Medida 6	35,700	12,110	2,948	38,700	12,480	3,101	40,100	12,930	3,101	
Medida 7	41,070	13,980	2,938	46,100	14,900	3,094	48,800	15,710	3,106	
Medida 8	48,900	16,710	2,926	54,800	18,010	3,043	57,100	18,580	3,073	
Medida 9	57,250	19,760	2,897	62,300	20,500	3,039	65,200	21,160	3,081	
Média			2,909			3,068			3,076	9,053

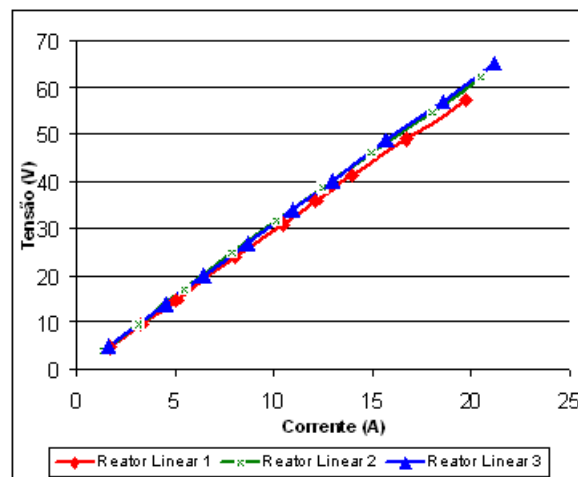


Figura 9.6 – Característica $v \times i$ do indutor que representa o curto circuito.

Portanto o valor da impedância de curto circuito utilizada nas simulações é a soma dos valores das resistências e reatâncias obtidas no ensaio.

$$Z_{Curto} = 0,80 + 9,05 \Omega \quad (9.3)$$

Os valores de tensão e corrente CA e CC obtidos durante todo este ensaio foram adquiridos através de multímetros tipo 289 da marca FLUKE.

Anexo 4 – Ensaio para obtenção das características do Reator Naturalmente Saturado.

O valor das perdas ôhmicas do RNS foi obtido através de ensaio semelhante ao realizado na primeira parte do ensaio com os reatores lineares de curto circuito (vide Anexo 3). O resultado deste ensaio está mostrado na Tabela 9.6.

Tabela 9.6 - *Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência do RNS.*

	Tensão nos terminais do reator linear - (V_{CC})	Corrente no circuito - (A_{CC})	Resistência do reator linear (Ω)
Medida 1	0,220	0,780	0,282
Medida 2	0,350	1,220	0,287
Medida 3	0,550	1,850	0,297
Medida 4	0,750	2,600	0,288
Média			0,289

Portanto o valor da resistência que representa as perdas ôhmicas do RNS será de $0,3\Omega$.

Outro ensaio realizado no RNS foi para obter o valor das perdas totais no ferro. O circuito montado para realização deste ensaio é mostrado na Figura 9.7. Este ensaio consiste em adquirir os dados de tensão, corrente e potência ativa do RNS. De posse do valor da resistência de perdas ôhmicas deste dispositivo, conseguido na primeira parte deste ensaio ($0,289 \Omega$), basta diminuir as perdas ôhmicas (RI^2) da potência total medida no ensaio, obtendo assim o valor das perdas totais no ferro. O roteiro de cálculo para obter a resistência que representa as perdas totais no ferro é realizado da seguinte forma:

$$P = P_{\hat{O}hmicas} + P_{Ferro} \quad (9.4)$$

$$P_{\hat{O}hmicas} = R_{\hat{O}hmica} \cdot I^2 \quad (9.5)$$

$$P_{Ferro} = P_{Total} - R_{\hat{O}hmica} \cdot I^2 \quad (9.6)$$

Então,

$$R_{Ferro} = \frac{V^2}{P_{Ferro}} \quad (\Omega) \quad (9.7)$$

Os resultados deste ensaio são mostrados na Tabela 9.7.

Tabela 9.7 - Resultado das medidas do ensaio para obter as perdas totais no ferro do RNS.

	Tensão nos terminais do RNS - (V)	Corrente no circuito - (A)	Potência ativa total do RNS (W)	Perdas ôhmicas $R \cdot I^2$ - (W)	Perdas no Ferro - (W)	Resistência das perdas totais no ferro (Ω)
Medida 1	21,350	0,116	1,640	0,003	1,637	278,530
Medida 2	30,850	0,196	3,270	0,010	3,260	291,931
Medida 3	40,380	0,390	5,400	0,039	5,361	304,163
Medida 4	51,100	1,415	9,000	0,517	8,483	307,801
Medida 5	60,800	3,240	14,000	2,708	11,292	327,379
Medida 6	69,300	5,610	22,000	8,120	13,880	345,996
Medida 7	73,850	7,630	30,000	15,020	14,980	364,073
Medida 8	78,000	9,840	41,000	24,981	16,019	379,799
Média						324,959

Portanto o valor da resistência que representa as perdas totais no ferro do RNS será de 325,0 Ω .

O esquema de montagem do circuito para levantar a curva característica do RNS é o mesmo que foi utilizado para levantar a curva característica dos reatores lineares (vide Anexo 3), conforme Figura 9.7.

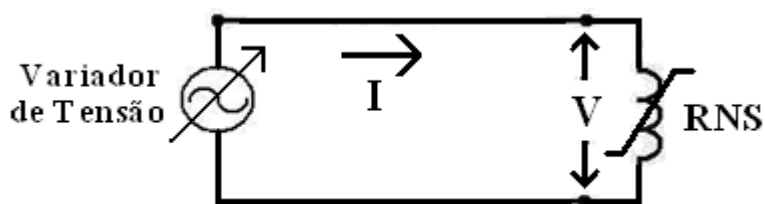


Figura 9.7 - Esquema de montagem do ensaio para obter a característica $\lambda \times i$ e das perdas no ferro do RNS.

A diferença é que neste ensaio a curva característica obtida é a $\lambda \times i$. Portanto uma bobina de prova, com relação de espiras de dez vezes menos que o enrolamento de alimentação do RNS, foi colocada em torno da estrutura ferromagnética do RNS para que se possa medir a tensão induzida pelo fluxo de enlace nessa bobina. Esta bobina de prova foi então conectada a entrada de uma placa integradora, onde a saída desta placa produz um sinal que é o próprio fluxo de enlace. Esta placa integradora realiza de forma prática as seguintes relações:

$$\lambda = \int v \cdot dt \quad (9.8)$$

Se,

$$v = V_M \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (9.9)$$

Então,

$$\lambda = -\frac{V_M}{\omega} \cdot \cos(\omega t) = -\lambda_M \cdot \cos(\omega t) \quad (9.10)$$

O sinal negativo da equação anterior quer dizer apenas que a onda do fluxo é defasada de 90° em relação a onda de tensão. Portanto o valor lido na saída da placa integradora é o próprio valor de pico do fluxo de enlace. A partir do valor do fluxo de enlace obtido pela placa integradora foi calculada a tensão de pico, utilizando as equações descritas acima em ordem inversa, como segue:

$$v = \frac{d\lambda}{dt} \quad (9.11)$$

Se,

$$\lambda = \lambda_M \cdot \cos(\omega t) \quad (9.12)$$

Então,

$$v = -\lambda_M \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t) = -V_M \cdot \cos(\omega t) \quad (9.13)$$

Portanto,

$$V_{\text{pico}} = \lambda_{\text{pico}} \cdot \omega \quad (9.14)$$

Os valores obtidos no ensaio e calculados através destes, estão descritos na Tabela 9.8 e grafados nas Figura 9.8 e Figura 9.9.

Tabela 9.8 - Resultado das medidas do ensaio para obter as características $\lambda x i$ e $v x i$ do RNS.

	Corrente de pico do circuito - (A _{Pico})	Fluxo de enlace - (Wb.esp)	Tensão de pico - (V _{Pico}) - λ^*377
Medida 1	0,700	0,105	39,585
Medida 2	0,900	0,160	60,320
Medida 3	2,900	0,225	84,825
Medida 4	10,000	0,290	109,330
Medida 5	18,700	0,320	120,640
Medida 6	28,800	0,335	126,295
Medida 7	47,600	0,360	135,720
Medida 8	80,000	0,400	150,800

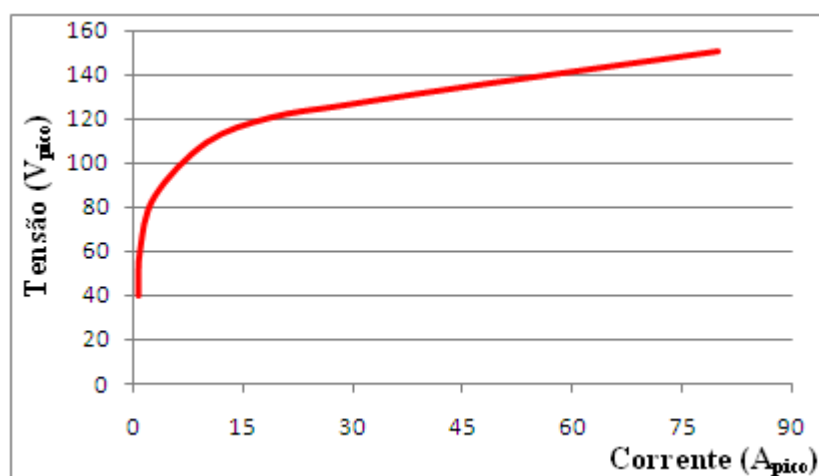


Figura 9.8 – Característica $v x i$ do RNS.

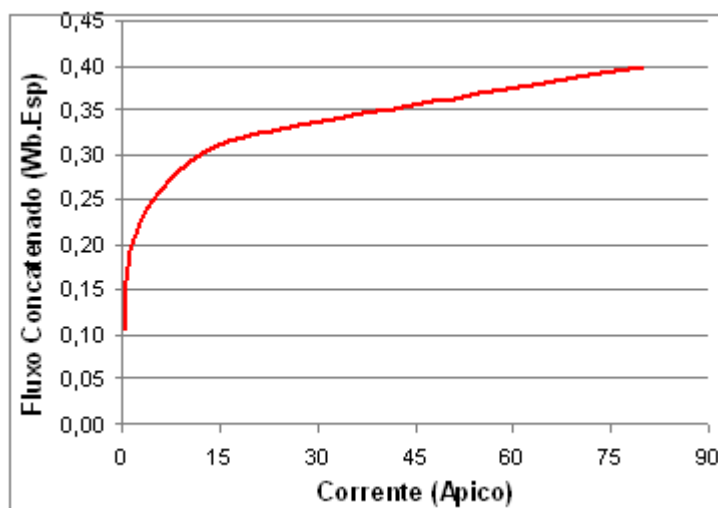


Figura 9.9 – Característica $\lambda \times i$ do RNS.

Foram utilizados neste ensaio os seguintes equipamentos de medição:

- Multímetros FLUKE tipo 289.
- Osciloscópio TEKTRONIX tipo TPS 2024.

Anexo 5 – Ensaio para obtenção da reatância capacitiva do banco de capacitores.

Foram utilizados em todos os ensaios um banco de capacitores composto de sete células, cujas placas de identificação de cada uma contém as seguintes informações:

- Marca: WEG;
- Capacitância – 61,2 μF ;
- Potência Nominal de 3,33 Kvar em 380 Volts/60Hz;
- Erro: $\pm 5\%$.

Portanto o valor de sua reatância capacitiva nominal total seria de 6,19 Ω .

Para evitar erros com a simulação deste componente, foi levantada sua característica $v \times i$. O circuito para realização deste ensaio está mostrado na Figura 9.10 e o ensaio é realizado de maneira similar ao processo descrito para obter a característica $v \times i$ dos reatores lineares de curto circuito (vide Anexo 3). Os resultados estão mostrados na Tabela 9.9 e na Figura 9.11.

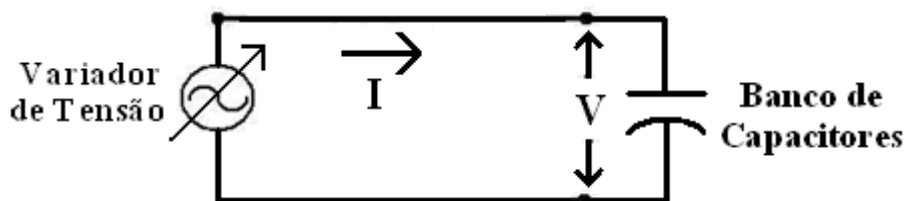


Figura 9.10 - Esquema de montagem do ensaio para obter a reatância capacitiva do banco de capacitores.

Tabela 9.9 - Resultado das medidas do ensaio para obter a reatância capacitiva do banco de capacitores.

	Tensão nos terminais do banco de capacitores - (V)	Corrente no circuito - (A)	Reatância total do banco de capacitores (Ω)
Medida 1	25,500	4,200	6,071
Medida 2	75,500	12,510	6,035
Medida 3	119,500	19,700	6,066
Medida 4	150,000	24,850	6,036
Média			6,052

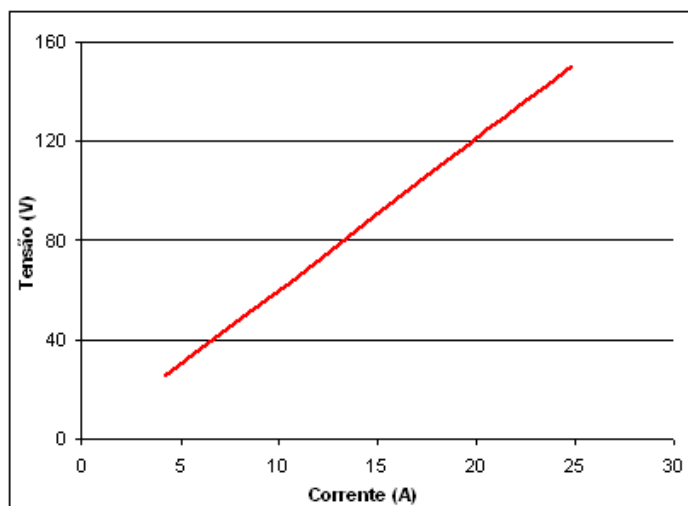


Figura 9.11 – Característica $v \times i$ do banco de capacitores.

Portanto, o valor da reatância capacitiva utilizada em todas as simulações é de valor igual a:

$$X_C = 6,05 \Omega \quad (9.15)$$

Os equipamentos de medição utilizados para adquirir os dados neste ensaio são os mesmos utilizados no ensaio dos reatores lineares responsáveis pelo curto circuito (vide Anexo 3).

Anexo 6 – Ensaio para obtenção da reatância indutiva que representa o reator linear que compõe o LCC.

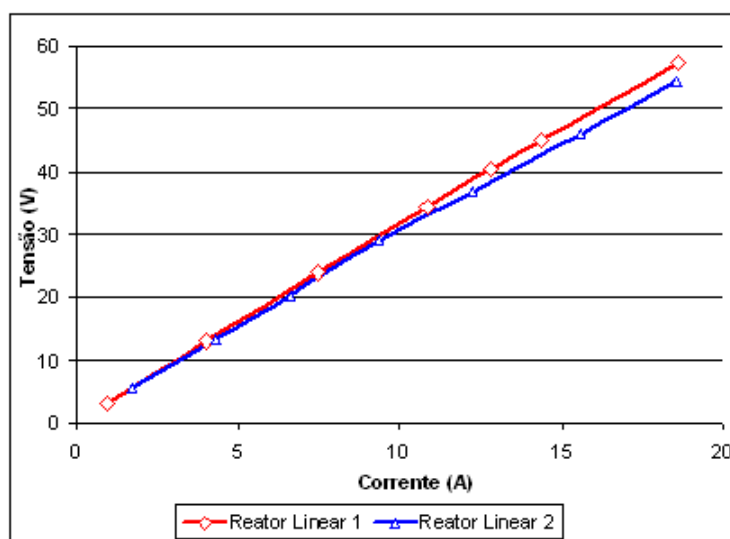
O ensaio para obter as características dos reatores lineares que compõem o LCC é exatamente igual ao ensaio realizado com os reatores lineares responsáveis pelo curto circuito (vide Anexo 3), inclusive os equipamentos de medição utilizados. Os resultados deste ensaio estão mostrados nas Tabela 9.10 e Tabela 9.11 e na Figura 9.12.

Tabela 9.10 - *Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência dos indutores lineares do LCC.*

	Medidas do reator linear 1			Medidas do reator linear 2		
	Tensão nos terminais do reator linear - (V_{cc})	Corrente no circuito - (A_{cc})	Resistência do reator linear (Ω)	Tensão nos terminais do reator linear - (V_{cc})	Corrente no circuito - (A_{cc})	Resistência do reator linear à 20 - °C (Ω)
Medida 1	0,130	0,480	0,271	0,110	0,330	0,333
Medida 2	0,260	0,810	0,321	0,230	0,820	0,280
Medida 3	0,420	1,430	0,294	0,385	1,200	0,321
Medida 4	0,710	2,450	0,290	0,510	1,800	0,283
Média			0,294			0,304

Tabela 9.11 - Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos indutores lineares do LCC.

	Medidas do reator linear 1			Medidas do reator linear 2		
	Tensão nos terminais do reator linear - (V)	Corrente no circuito - (A)	Reatância do reator linear (Ω)	Tensão nos terminais do reator linear - (V)	Corrente no circuito - (A)	Reatância do reator linear (Ω)
Medida 1	3,200	0,998	3,206	5,550	1,740	3,190
Medida 2	13,100	4,042	3,241	13,380	4,300	3,112
Medida 3	24,000	7,450	3,221	20,320	6,610	3,074
Medida 4	34,400	10,830	3,176	28,980	9,350	3,099
Medida 5	40,300	12,840	3,139	36,830	12,260	3,004
Medida 6	45,050	14,370	3,135	45,980	15,600	2,947
Medida 7	57,400	18,600	3,086	54,450	18,550	2,935
Média			3,172			3,052

Figura 9.12 – Característica $v \times i$ dos reatores lineares do LCC.

Portanto as impedâncias dos reatores lineares que fazem parte do LCC serão simuladas com valores iguais a:

$$Z_{L1} = 0,3 + 3,17 \Omega \quad (9.16)$$

$$Z_{L2} = 0,3 + 3,05 \Omega \quad (9.17)$$

Referências Bibliográficas

- [1] REICHENSTEIN, H. W.; GOMEZ, J. C. Relationship of X/R , I_p , and I_{rms} to Asymmetry in Resistance/Reactance Circuits. *Industry Applications Society Annual Meeting*, Mexico City, Mexico, vol. IA-21, p. 481-492, March/April 1985.
- [2] HARTMANN, G. N. Understanding Asymmetry. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1A-21, n°.4, p. 842-848, July/August 1985.
- [3] ONS. *Diretrizes e critérios para estudos elétricos*. Submódulo 23.3. ONS, 2007.
- [4] ONS. *Estudos de curto-circuito – Período 2008-2011 – Volume 1*. ONS, 2009.
- [5] CIGRÉ WORKING GROUP A3.10. Fault Current Limiters – System Demands. In: WORKING GROUP 10 OF STUDY COMMITTEE A3 (HIGH VOLTAGE EQUIPMENT). *Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems*. Part C, p. 44-59, Feb. 2003.
- [6] SON, K. S.; RAMACHANDARAMUTHY, K. V.; AZIZAN, A. W. Fault Level Due to Interconnection of Embedded Generator. *3rd International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD'06)*, Dublin, Ireland, vol. 514, p. 307-311, 2006.
- [7] KOEPPL, G.; BLAHOUS, L.; HAGER, H. Short-Circuit Current Partitioning in HV Substation in Ring-bus Arrangement with Redundancy. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, n° 9, p. 2651-2658, Sept 1984.
- [8] AMON, J. F.; FERNANDEZ P. C.; Rose E. H. et al. Brazilian Successful Experience in the Usage of Current Limiting Reactors for Short-Circuit Limitation. *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, Montreal, Canada, paper n° IPST05-215, June 2005.

- [9] FERREIRA, C. S. Solução do Problema de Superação de Disjuntores pela Alocação Ótima de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto Circuito Utilizando Algoritmos Genéricos. *Revista Controle & Automação*, vol. 18, nº 4, p. 501-512, Nov/Dez 2007.
- [10] CIGRÉ WORKING GROUP A3.10. Fault Current Limiters – State of the Art. In: WORKING GROUP 10 OF STUDY COMMITTEE A3 (HIGH VOLTAGE EQUIPMENT). *Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems*. Part B, p. 22-42, Feb. 2003.
- [11] NOE, M.; STEURER, M. High-Temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status. *Superconductor Science and Technology*, Florida, USA, p. 15-29, Jan 2007.
- [12] SUGIMOTO, S.; KIDA, J.; ARITA, H. et al. Principle and Characteristics of a Fault Current Limiter with Series Compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, nº 2, p. 842- 847, Apr 1996.
- [13] KARADY, G. G. *Principles of Fault Current Limitation by a Resonant LC Circuit*. *IEE Proceedings-C*, vol. 139, nº 1, p. 1-6, Jan 1992.
- [14] LI, X. A Novel Fault Current Limiter with Series Compensation. *International Conference on Power System Technology (PowerCon2002)*, Kunming, China, vol. 3, p. 1467-1471, Apr 2002.
- [15] SMITH, R. K.; SLADE, P. G.; SARKOSI M. et al. Solid State Distribution Current Limiter and Circuit Breaker: Application Requirements and Control Strategies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Pittsburgh, PA, vol. 8, nº 3, p. 1155-1164, July 1993.
- [16] SIEMENS, S. A. *Limitação da Corrente de Curto Circuito*, 2008.
- [17] RENZ, K.; THUMM, G.; WEISS, S. Thyristor Control for Fault Current Limitation. *IEE Colloquium on Fault Current Limiters – A Look at Tomorrow*, London, England, June 1995.

- [18] THANAWALA, H. L.; YOUNG, D. J. Saturated Reactors: Some Recent Applications in Power Systems. *Energy International*, vol. 7, nº 11, p. 1155-1164, Nov 1970.
- [19] CHONG, E.; RASOLONJANAHARY, J. L.; STURGESS, J. et al. A Novel Concept for a Fault Current Limiter. *8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC2006)*, London, England, p. 251-255, Mar 2002.
- [20] FONTE, L. A. M. *Reator Saturado: Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto*. Recife, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco.
- [21] FRIEDLANDER, E. Principle and Analysis of a Stabilized Phase Multiplier Type of Magnetic Frequency Convertor. *Electrical Energy*, vol.1, p. 55-66, Oct 1956.
- [22] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. *Aplicação de um Protótipo do Supressor Magnético Rápido de Flutuação de Tensão na Rede CELPE*. Recife, 2009.
- [23] LEÃO, S. E. C. C. *Análise do Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) para Controle da Tensão em Redes de Distribuição de 13,8 KV*. Recife, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco.
- [24] BOGLIETTI, A.; CAVAGNINO, A.; LAZZARI, M. et al. Prediction Iron Losses in Soft Magnetic Materials with Arbitrary Voltage Supply: An Engineering Approach. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, nº 2, p. 981-989, Mar 2003.
- [25] MARTINEZ, J. A.; MORK, B. A. Transformer Modeling for Low and Mid-Frequency Transients – A Review. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, nº 2, p. 1625-1632, Apr 2005.

[26] LEON, de F.; SEMLYEN, A. A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, n° 1, p. 315-321, Jan 1995.

[27] NEVES, W. L. A.; DOMMEL, H. W. On Modeling Iron Core Nonlinearities. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, n° 2, p. 417-425, May 1993.

[28] DICK, E. P.; WATSON, W. Transformer Models for Transient Studies Based on Field Measurement. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, n° 1, p. 401-419, Jan 1981.

[29] TSAI, S. J. S.; WONG K. H. On-line Estimation of Thevenin Equivalent with Varying Systems States. *Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, p. 20-24, July 2008.