



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DISPOSITIVOS LIMITADORES DA CORRENTE DE CURTO-  
CIRCUITO  
Estado da Arte e Estudo de Caso**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO  
POR

WIDNEY FIDELIX PESSOA PONTES

Orientador: Prof. Luiz Antônio Magnata da Fonte

RECIFE, 08 / 2014

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

P814d Pontes, Widney Fidelix Pessoa.  
Dispositivos limitadores da corrente de curto-circuito: estado da arte e estudo de caso / Widney Fidelix Pessoa Pontes. - Recife: O Autor, 2014.  
xii, 64 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Magnata da Fonte.  
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Limitador de corrente de curto-circuito. 3. Reator com saturação natural. 4. Disjuntor. 5. Modelos computacionais. I. Fonte, Luiz Antônio Magnata da. (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2014-219

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter iluminado todo o meu caminho durante esta longa e difícil jornada.

Aos meus pais, Willis Pontes e Crisleide Pontes, que sempre estiveram ao meu lado, dando apoio e as condições necessárias para prosseguir com meus estudos.

Ao prof. Luiz Antônio Magnata, pela orientação e por seus conhecimentos que foram de extrema importância para realização deste trabalho.

Aos professores José Maurício e Gustavo Medeiros, por suas críticas e sugestões que ajudaram a engrandecer ainda mais este trabalho.

Ao prof. Fabrício Bradaschia, pelas suas dicas e sugestões que também contribuíram para realização do trabalho.

A todos os meus colegas de curso e amigos, por suas colaborações e apoio.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal proceder a um estudo sumário do estado da arte dos dispositivos empregados para a limitação da corrente de curto-circuito, enfocando com especial atenção os limitadores que fazem uso do reator com saturação natural (RSN). O tratamento do tema inicia-se com uma análise das características da corrente de curto-circuito e dos critérios adotados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para avaliação dos equipamentos de disjunção em operação. Em seguida, as técnicas de limitações da corrente de curto-circuito, tanto de caráter temporária como definitivas, são descritas juntamente com uma revisão bibliográfica dos dispositivos utilizados com esta finalidade. Finalmente, com o intuito de verificar o efetivo desempenho do dispositivo de limitação eleito, uma rede elétrica foi modelada no programa *Eletro-Magnetic Alternative Transient Program - Alternative Transient Program* (EMTP-ATP) com base em informações reais disponibilizadas pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF). Simulações de curto-circuito de várias naturezas foram realizadas com e sem a presença do limitador de corrente de curto-circuito (LCC) a base do RSN. Os resultados obtidos nestas simulações estão compilados no corpo deste trabalho e ratificam a eficácia do LCC escolhido.

Palavras-chave: limitador de corrente de curto-circuito, reator com saturação natural, disjuntor, modelos computacionais.

## **ABSTRACT**

This work aims to conduct a short study of the state of the art in devices used for limiting short-circuit current, with special attention focused on the limiters that make use of the reactor with natural saturation. The treatment of the subject begins with an analysis of the short-circuit characteristics and the criteria adopted by the Operador Nacional do Sistema (ONS) for evaluation of circuit-breakers in operation. After that, the short-circuit limitation techniques for both temporary and permanent short-circuit are described and a literature review of devices used for this purpose are performed. Finally, in order to evaluate the performance of the limitation device that has been selected, an electrical network was modelled in Electro-Magnetic Transient Program Alternative Program - Alternative Transient Program (EMTP-ATP) based on actual data provided by the Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF). Several types of short-circuit simulations were performed with and without the presence of the short-circuit current limiter (SCL) based on reactor with natural saturation. The results obtained in these simulations are compiled in the body of this work and ratify the effectiveness of the SCL chosen.

Keywords: short-circuit current limiter, reactor with natural saturation, circuit-breaker, computational models.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivo .....	1
1.3. Estrutura do trabalho.....	1
<b>2. ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO E CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DOS DISJUNTORES .....</b>	<b>3</b>
2.1. Introdução .....	3
2.2. Disjuntor .....	3
2.3. Corrente de Curto-Circuito .....	4
2.4. Critérios de Estudos Adotados pela ONS para a Avaliação dos Estados dos Disjuntores .....	8
<b>3. SOLUÇÕES PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....</b>	<b>11</b>
3.1. Introdução .....	11
3.2. Solução de caráter temporário .....	11
3.3. Soluções de caráter definitivo.....	12
<b>4. DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO .....</b>	<b>13</b>
4.1. Introdução .....	13
4.2. Características Fundamentais de um LCC.....	13
4.3. Benefícios Relacionados à Utilização do LCC.....	14
4.4. Técnicas para Limitação da Corrente de Curto-Circuito .....	14
4.4.1. Reator Linear com Núcleo de Ar .....	14
4.4.2. Dispositivos Pirotécnicos .....	16
4.4.3. Limitadores a Base de Elementos de Estado Sólido .....	17
4.4.4. Limitadores a Base de Supercondutores.....	20
4.4.5. IPC (Interphase Power Controllers).....	24
4.4.6. Limitadores a Base de Materiais Ferromagnéticos .....	25
<b>5. ESTUDO DE CASO ENVOLVENDO O LCC COM O RSN.....</b>	<b>32</b>
5.1. Introdução .....	32
5.2. Caracterização do Sistema em Estudo.....	32
5.3. Modelagem dos Componentes do Sistema.....	33
5.3.1. Linhas de Transmissão.....	34
5.3.2. Transformadores.....	35

5.3.3.	Máquinas Síncronas.....	36
5.3.4.	Dispositivos Estáticos de Controle de Tensão.....	38
5.3.5.	Cargas .....	38
5.3.6.	Equivalentes externos.....	39
5.3.7.	Limitador de Corrente de Curto-Circuito .....	39
5.4.	Simulações e Análises dos Resultados .....	45
5.4.1.	Regime Permanente.....	46
5.4.2.	Curto-Circuito Trifásico .....	46
5.4.3.	Curto Circuito Bifásico.....	48
5.4.4.	Curto-Circuito Monofásico .....	50
5.4.5.	Análise Final dos Resultados.....	51
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
6.1.	Conclusões gerais .....	53
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros .....	53
<b>7.</b>	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>54</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fases da interrupção da corrente nos disjuntores [1] .....	4
Figura 2.2– Circuito RL em série .....	5
Figura 2.3 – Característica da corrente de curto-circuito longe do gerador .....	6
Figura 2.4 – Roteiro para avaliação dos disjuntores em operação [5].....	9
Figura 2.5 – Roteiro para determinar os disjuntores superados por corrente de curto-circuito simétrica .....	10
Figura 4.1 – Formas de ligação do reator linear com núcleo de ar [8].....	15
Figura 4.2 – Dispositivo Pirotécnico desenvolvido pela ABB[7] .....	16
Figura 4.3 – Esquema de montagem da configuração em paralelo do LCC a base de elementos de estado sólido.....	18
Figura 4.4 – Esquema de montagem da configuração em série do LCC a base de elementos de estado sólido .....	18
Figura 4.5 – Esquema de montagem da configuração em série/paralelo do LCC a base de elementos de estado sólido.....	19
Figura 4.6 – Limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo.....	21
Figura 4.7 – Limitador de corrente de curto-circuito supercondutor indutivo .....	22
Figura 4.8 – Esquema de montagem do limitador de corrente de curto-circuito supercondutor com ponte de diodos [13].....	23
Figura 4.9 – Características dos diodos e sentido da corrente no limitador [13] .....	23
Figura 4.10 – Modelo genérico do IPC .....	24
Figura 4.11 – Limitador de corrente de curto-circuito com material ferromagnético duro [7] ....	25
Figura 4.12 – Ciclo de Histerese dos materiais ferromagnéticos [7].....	26
Figura 4.13 – Característica $B \times \mathcal{H}$ ou $V \times I$ do material ferromagnético do RSN .....	27
Figura 4.14 – Curva $V \times I$ para limitadores de corrente de curto-circuito com RSN do tipo A e B [7] .....	27
Figura 4.15 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo A1.....	28
Figura 4.16 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo A2.....	29
Figura 4.17 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo A3.....	29
Figura 4.18 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo B1.....	30
Figura 4.19 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo B2.....	31
Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema simulado.....	33
Figura 5.4 – Modelo da linha de transmissão.....	34
Figura 5.5 – Componente LINEZT_3.....	34
Figura 5.6 – Componente LINESY_3 .....	35
Figura 5.2 – Modelo do Transformador .....	36
Figura 5.3 – Componente SATTRAFO.....	36
Figura 5.7 – Modelo da máquina síncrona.....	37
Figura 5.8 – Componente ACSOURCE .....	37
Figura 5.9 – Componente RLC3.....	37
Figura 5.10 – Modelo dos dispositivos estático de controle de tensão.....	38
Figura 5.11 – Modelo da carga .....	39
Figura 5.12 – Modelo do LCC com RSN tipo A .....	39
Figura 5.13 – Modelo do indutor e do capacitor do RSN .....	40
Figura 5.14 – Modelo do RSN tipo A.....	42
Figura 5.15 – Componente NLININD.....	43

<b>Figura 5.16 – Instante de aplicação do curto-circuito</b> .....	45
<b>Figura 5.17 – Tensão aplicada a carga com e sem o LCC</b> .....	46
<b>Figura 5.18 – Corrente de curto-circuito trifásico franco nas fases A, B e C com e sem o LCC.</b> .....	47
<b>Figura 5.19 – Tensão e corrente sobre o RSN, antes e durante o curto-circuito</b> .....	48
<b>Figura 5.20 – Corrente que circula pelo RSN quando a tensão de saturação não é superada</b> ...	48
<b>Figura 5.21 – Corrente de curto-circuito bifásico franco</b> .....	49
<b>Figura 5.22 – Tensão sobre os terminais do LCC</b> .....	49
<b>Figura 5.23 – Tensão sobre os terminais do LCC</b> .....	50
<b>Figura 7.1 – Modelagem do sistema – parte 1</b> .....	54
<b>Figura 7.2 – Modelagem do sistema – parte 2</b> .....	55
<b>Figura 7.3 – Modelagem do sistema – parte 3</b> .....	56
<b>Figura 7.4 – Modelagem do sistema – parte 4</b> .....	57
<b>Figura 8.1 – Settings do ATPDraw</b> .....	61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 5.1 – Parâmetros do indutor e do capacitor do LCC com RSN tipo A .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 5.2 – Parâmetros de especificação do RSN tipo A .....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 5.3 – Características do RSN tipo A .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 5.4 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito trifásico franco .....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 5.5 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito bifásico franco sem terra .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 5.6 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito bifásico franco para terra .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 5.7 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito monofásico franco .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 8.1 – Parâmetros das linhas de transmissão modeladas pelo componente LINEZT_3 .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 8.2 – Parâmetros das linhas de transmissão modeladas pelo componente LINESY_3 .....</b>	<b>58</b>
<b><i>Tabela 8.3 – Parâmetros dos transformadores .....</i></b>	<b>59</b>
<b><i>Tabela 8.4 – Parâmetros dos dispositivos estáticos de controle de tensão .....</i></b>	<b>59</b>
<b><i>Tabela 8.5 – Parâmetros das máquinas síncronas .....</i></b>	<b>60</b>
<b><i>Tabela 8.6 – Parâmetros das cargas .....</i></b>	<b>60</b>
<b><i>Tabela 8.7 – Parâmetros dos equivalentes externos .....</i></b>	<b>60</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

LCC	Limitador de Corrente de Curto-Circuito
RSN	Reator com Saturação Natural
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
CA	Corrente Alternada
CLR	Reator com Núcleo de Ar
CC	Corrente Contínua
GEC	General Electric Company
LDSP	Laboratório Digital de Sistemas de Potência
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
EMTP-ATP	<i>Electro-Magnetic Transient Program - Alternative Transient Program</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v$	Tensão elétrica [V]
$i$	Corrente elétrica [A]
$R$	Resistência elétrica [ $\Omega$ ]
$L$	Indutância [H]
$E_M$	Tensão de pico [V]
$\omega$	Frequência angular [rad/s]
$\theta$	Ângulo de fase entre tensão e corrente.
$\varphi$	Ângulo de fase da tensão.
$i_{ca}$	Componente simétrica da corrente de curto-circuito
$i_{cc}$	Componente assimétrica da corrente de curto-circuito.
$I_M$	Corrente de pico [A]
$T$	Constante de tempo de decaimento da componente assimétrica [s]
$I_{ef}$	Corrente elétrica eficaz [A]
$i_p$	Máxima corrente de pico durante o curto-circuito [A]
$t_p$	tempo em que a corrente de curto-circuito atinge a máxima corrente de pico [s]
$f_n$	frequência nominal [Hz]
$C$	Capacitância [F]
$X_{CC}$	Reatância de curto-circuito [ $\Omega$ ]
$V_{ef}$	Tensão eficaz [V]
$S_{CC}$	Potência de curto-circuito [VA]
$X_{LCC}$	Reatância do LCC [ $\Omega$ ]
$X_L$	Reatância indutiva [ $\Omega$ ]
$X_C$	Reatância capacitiva [ $\Omega$ ]

$X_{RSN}$	Reatância do RSN [ $\Omega$ ]
$\lambda$	fluxo magnético de enlace [Wb/esp]
$\lambda_M$	pico do fluxo magnético de enlace [Wb/esp]
$Q_A$	Potência Reativa [VAr]
$V_S$	Tensão de saturação do RSN [V]
$P_f$	Potência das perdas no ferro [w]
$R_N$	Resistência que representa as perdas no cobre do RSN [ $\Omega$ ]
$X_{NS}$	Reatância não saturada do RSN [ $\Omega$ ]
$I_S$	Corrente no RSN com a tensão de saturação aplicada [A]
$R_C$	Resistência que representa as perdas no cobre do RSN [ $\Omega$ ]

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

Sabe-se que os equipamentos destinados a proteção dos sistemas elétricos de potência devem atuar corretamente quando solicitados, para evitar danos de grandes proporções aos componentes do mesmo.

Um dos principais fatores que resultam na falha de tais equipamentos está relacionado com a intensidade da corrente de curto-circuito, pois quando esta supera os valores limites estipulados no projeto dos mesmos, a garantia de um funcionamento correto é perdida.

Uma alternativa para contornar este problema reside no uso de dispositivos limitadores da corrente de curto-circuito (LCC). Tais dispositivos, além de reduzir a corrente de falta a níveis satisfatórios ao desempenho dos equipamentos, podem trazer outros benefícios, como será visto neste trabalho.

Entre os dispositivos LCC's, destaca-se um modelo que, além de apresentar bons resultados, possui baixo custo de produção. Trata-se do limitador que faz uso de reator com saturação natural (RSN).

## 1.2. Objetivo

Este trabalho tem como finalidade apresentar o desempenho do LCC com base no RSN através de um estudo de caso realizado em um sistema elétrico, parte integrante da rede elétrica nacional.

## 1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho se encontra estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentadas as características da corrente de curto-circuito para o tipo de estudo proposto, considerando um curto distante das unidades geradoras. Uma breve descrição acerca do funcionamento dos equipamentos de disjunção em alta tensão é também realizada, assim como os critérios definidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para avaliar a situação de tais equipamentos.

No Capítulo 3 são apresentadas algumas propostas para redução dos níveis de curto-circuito, levando em consideração os impactos ocasionados por tais soluções e/ou os custos gerados pela implementação das mesmas.

No Capítulo 4 são apresentadas as características solicitadas pelos dispositivos LCC e as técnicas propostas para redução de tal corrente.

No Capítulo 5 é realizado um estudo de caso baseado em um sistema elétrico real, consistindo de simulações computacionais para avaliação do desempenho do LCC escolhido.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

No Capítulo 7 se encontram os anexos com os dados utilizados para subsidiar as simulações, a versão do programa computacional usado para realizar das mesmas e os roteiros de modelagem desenvolvidos.

## 2. ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO E CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DOS DISJUNTORES

### 2.1. Introdução

O crescimento da demanda energética no cenário brasileiro nos últimos anos, bem como a inclusão de novas fontes de geração de energia ao Sistema Interligado Nacional (SIN), principalmente as de origem térmicas e eólicas, têm trazido grande impactos ao sistema elétrico brasileiro.

Uma das repercussões mais importante diz respeito ao aumento da corrente de curto-circuito do sistema, levando a superação de alguns equipamentos, como o disjuntor, responsável pela interrupção dos circuitos.

Entres os fatores que influenciam o crescimento da corrente de curto-circuito estão o aumento das fontes de geração e a inclusão de novas linhas de transmissão/distribuição, deixando o sistema mais “malhado” e reduzindo a impedância equivalente do sistema.

Este capítulo pretende expor as principais características da corrente de curto-circuito nas redes elétricas de alta tensão e os critérios que os Agentes responsáveis pela transmissão da energia elétrica devem adotar para avaliação dos disjuntores, em consonância com as regras vigentes no Brasil.

### 2.2. Disjuntor

A principal função dos disjuntores é a interrupção das correntes de curto-circuito da maneira mais rápida possível, a fim de minimizar os possíveis danos causados aos equipamentos devido a passagem de elevadas correntes pelos mesmos.

A interrupção da corrente nos disjuntores é realizada em quatro etapas distintas [1], como pode ser visto na Figura 2.1, cada uma delas sendo influenciada por um fenômeno físico distinto.

No primeiro instante uma elevada corrente começará a circular pelos contatos do disjuntor, porém o processo de abertura ainda não será iniciado.

Em seguida, na fase 2, o disjuntor iniciará o processo de separação dos contatos, contudo a corrente continuará circulando, estabelecendo-se, então, um arco-elétrico entre os contatos do mesmo.

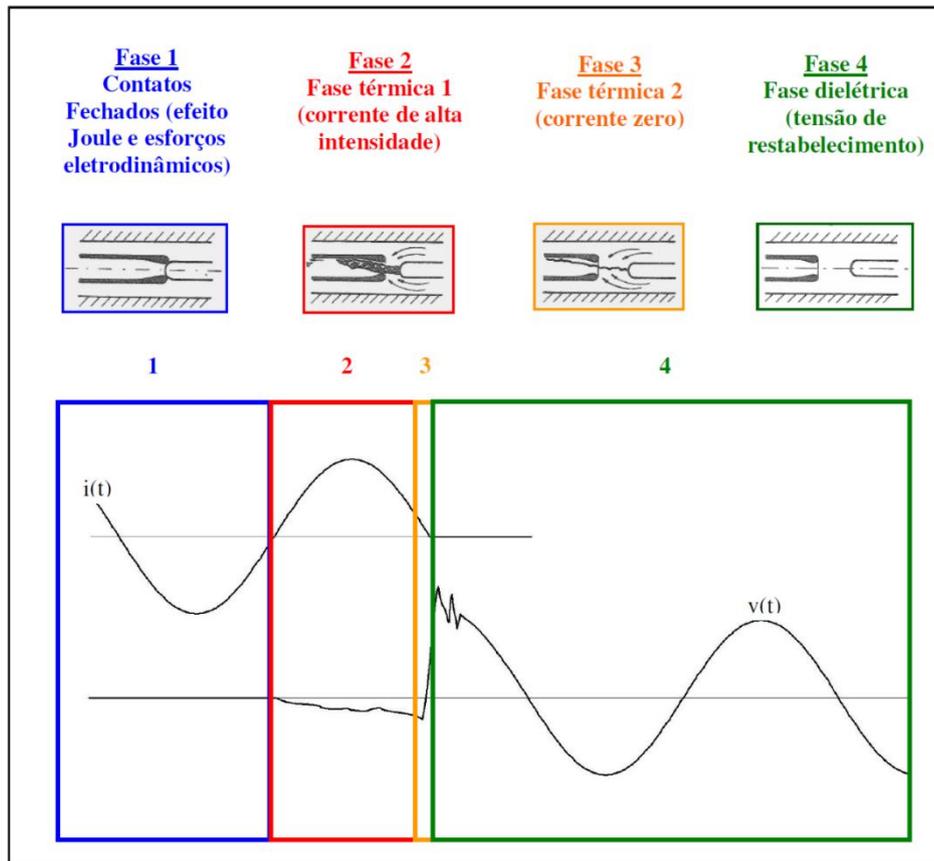


Figura 2.1 - Fases da interrupção da corrente nos disjuntores [1]

À medida que o disjuntor continua a separação dos seus contatos, a corrente aproximará-se do valor nulo e o arco-elétrico tornar-se-á cada vez mais fraco. Finalmente na passagem da corrente por zero, o arco-elétrico é extinto e a corrente interrompida.

Após a abertura do disjuntor e da extinção da corrente, uma diferença de potencial irá, naturalmente, surgir entre seus contatos. Durante os primeiros instantes, esta diferença de potencial poderá atingir picos elevados de tensão capazes de reacender o arco-elétrico e ocasionar a circulação de corrente. Tal diferença de potencial, que surge durante o período transitório, é denominada de tensão de restabelecimento transitória (TRT).

### 2.3. Corrente de Curto-Circuito

O curto-circuito é caracterizado por uma ligação de baixa impedância entre dois pontos com potenciais elétricos diferentes. Essa ligação pode ser realizada pelo contato físico entre dois materiais condutores, denominado curto-circuito franco, ou através de um arco-elétrico, situação mais comum nos sistemas de potência de alta tensão.

Para a determinação de uma expressão para a corrente de curto-circuito, conforme [2] e [3], serão considerados apenas os efeitos resistivos e indutivos da linha. Esta situação está representada na Figura 2.2, onde a chave, simulando a ocorrência do defeito, se encontra na posição aberta e, em  $t = 0$ , é fechada e o circuito passa a conduzir a corrente de falta. Para efeito desta análise, a corrente inicial na indutância da linha será desprezada.

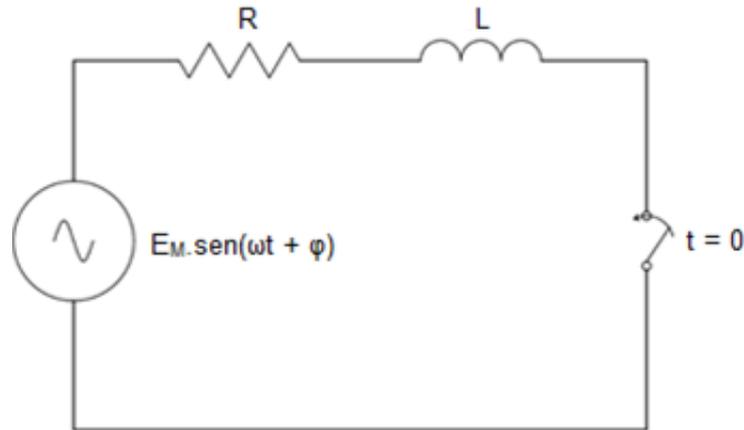


Figura 2.2– Circuito RL em série

A equação diferencial que descreve o sistema, no instante em que a chave é fechada, é representada pela equação 2.1.

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} = E_M \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

Mediante as condições impostas, a solução de (2.1) é, de acordo com [4], como segue:

$$i(t) = i_{CA}(t) + i_{CC}(t) \quad (2.2)$$

$$i(t) = I_M \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) - I_M \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.3)$$

em que,

$$I_M = \frac{E_M}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (2.4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega \cdot L}{R} \right) \quad (2.5)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.6)$$

Como visto na em (2.2), a corrente de curto-circuito é composta por duas componentes, uma CA (corrente alternada), denominada componente de regime permanente, e outra CC (corrente contínua), conhecida como componente de regime transitório. A componente CC é proveniente da reação indutiva do circuito a variação brusca da corrente no momento do curto, tornando a mesma assimétrica e com um decaimento determinado pela constante de tempo  $\tau$  do circuito. Após o transcurso de cerca de 5 constantes de tempo, esta componente praticamente se anulará, passando apenas a existir a componente CA e, a partir deste momento, a corrente de curto-circuito assumirá a forma simétrica.

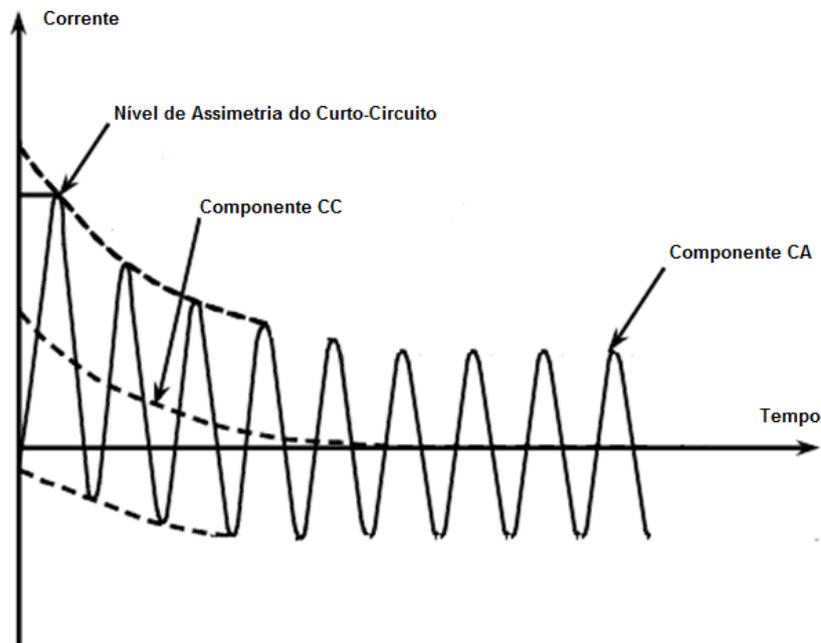


Figura 2.3 – Característica da corrente de curto-circuito longe do gerador

Um ponto importante a ser destacado é que (2.3) só é válida para um curto-circuito longe da unidade geradora, pois os geradores interferem de forma significativa no formato da onda da corrente de curto-circuito.

Neste caso, (2.3) será reescrita em termos da corrente eficaz como:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) - \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.7)$$

em que,

$$I_{ef} = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

Devido à natureza indutiva das linhas de transmissão/distribuição, temos que a reatância indutiva da linha é muito superior a resistência da mesma,  $\omega L \gg R$ , logo o valor do ângulo  $\theta$  é muito próximo de  $90^\circ$ . Então, a maior corrente assimétrica que pode surgir no sistema ocorrerá quando um curto-circuito se estabelecer na passagem da tensão por zero, ou seja,  $\varphi$  igual a  $0^\circ$ , qualquer que seja o valor de  $\tau$ . Esta situação de maior gravidade para os disjuntores, pois é onde ocorre o maior valor de pico da corrente de curto e, conseqüentemente, o maior esforço dinâmico imposto ao mesmo.

O máximo valor instantâneo de pico da corrente de curto-circuito assimétrica poderá ser obtido a partir de (2.7)

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot (1 + e^{-\frac{t_p}{\tau}}) \quad (2.9)$$

O tempo em que a corrente atinge o maior valor de pico depende da frequência de operação do sistema e é determinada por (2.10)

$$t_p = \frac{1}{2 \cdot f_n} \quad (2.10)$$

Para sistemas cuja frequência de operação é 60 Hz,  $t_p$  é igual a 8,33 ms. Já para sistema que operam em 50 Hz,  $t_p$  é igual a 10 ms.

Nos sistemas trifásicos, os curtos-circuitos são classificados como:

- Trifásico – ocorre quando as três fases do sistema entram em contato ao mesmo tempo, através de uma baixa impedâncias ou em contato direto com o solo;
- Bifásico – ocorre quando duas fases do sistema entram em contato, através de uma baixa impedância;
- Bifásico para terra – ocorre quando duas fases do sistema entram simultaneamente em contato com o solo;
- Monofásico – ocorre quando uma das fases do sistema entra em contato direto com o solo, ou através de baixa impedância.

Dentre os tipos de curto-circuito citados, os monofásicos são os que ocorrem com maior frequência, já os trifásicos são os de menor número de ocorrências.

## 2.4. Critérios de Estudos Adotados pela ONS para a Avaliação dos Estados dos Disjuntores

O Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelece, no Submódulo 11.3 dos procedimentos de rede, os critérios para a avaliação dos disjuntores. Estes estudos são importantes para avaliar se os disjuntores têm ou terão capacidade de interromper a corrente de curto-circuito, quando solicitados. A rotina para avaliação dos disjuntores está representada no fluxograma da Figura 2.4

Pode-se observar na Figura 2.4, que dois parâmetros são importantes para a realização dos estudos: a constante de tempo  $\tau$  de decaimento da componente CC da corrente de curto-circuito e o máximo valor da corrente de curto-circuito.

Quanto maior a constante de tempo  $\tau$ , maior será o tempo de duração da assimetria da corrente de curto-circuito e, conseqüentemente, os esforços dinâmicos serão maiores. Para valores de  $\tau$  maiores que 120 ms, os disjuntores devem ser analisados com mais detalhes pelos Agentes para verificar se os mesmos estão superados.

Também com relação a alguns valores de  $\tau$ , deve-se analisar o máximo valor da corrente de curto-circuito com relação a capacidade de interrupção dos disjuntores ( $I_{ccn}$ ), se a corrente de curto superar um certo valor percentual da capacidade de interrupção dos disjuntores, os mesmos serão considerados em situação de risco e um estudo mais detalhado pelos Agentes deve ser realizado.

Os disjuntores indicados para uma análise mais profunda, os Agentes devem avaliar os seguintes critérios para determinar se os mesmos estão ou não superados [5]:

- Corrente de carga;
- Corrente de curto-circuito assimétrica;
- Crista da corrente de curto-circuito;
- Tensão de Restabelecimento Transitória.

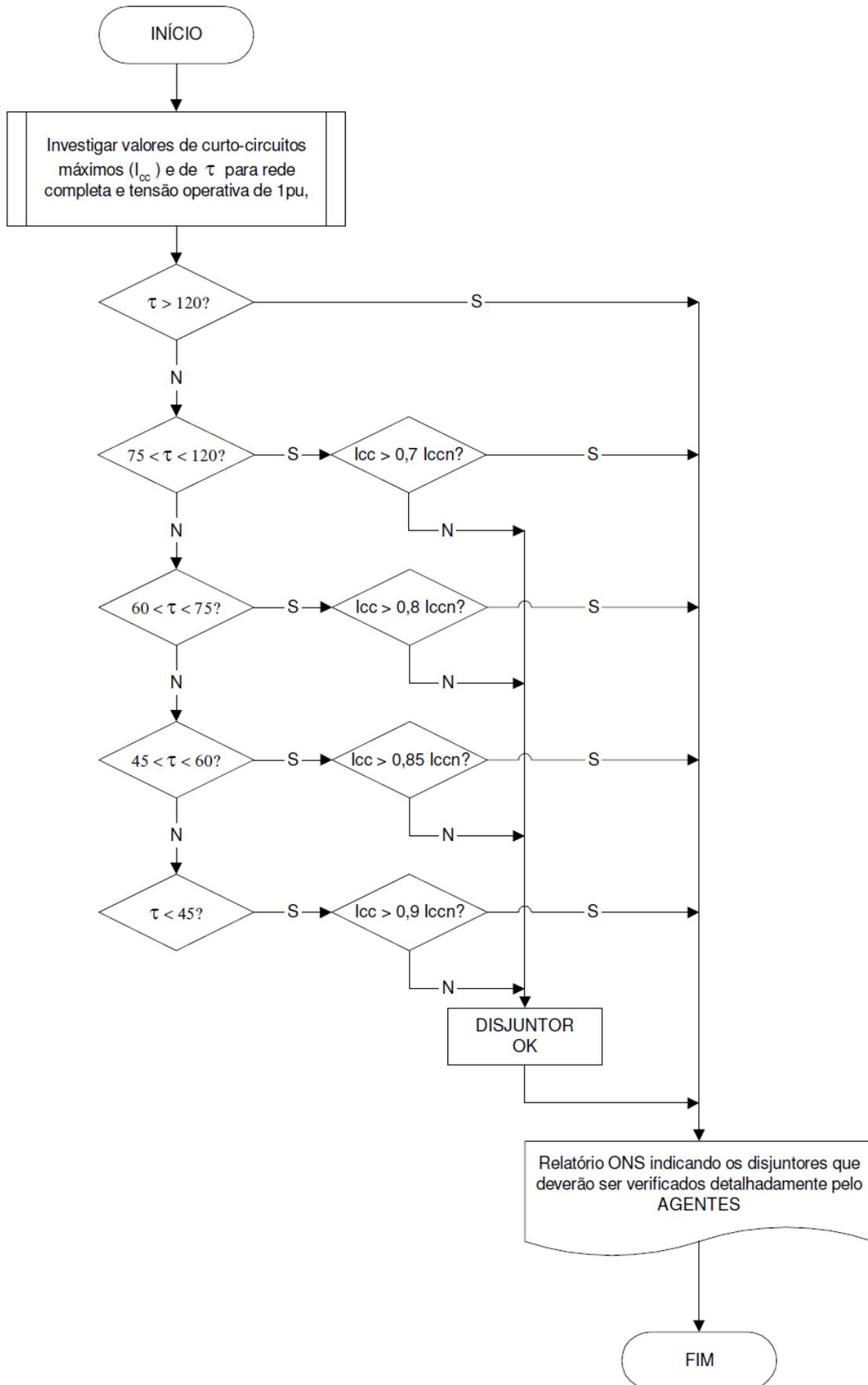


Figura 2.4 – Roteiro para avaliação dos disjuntores em operação [5]

Nesta análise também deve constar a avaliação dos disjuntores com relação a sua capacidade de interrupção de corrente simétrica. Se em um curto-circuito na barra, a qual o disjuntor está conectado, a corrente de curto-circuito atingir 100% de sua capacidade de interrupção simétrica, um estudo mais detalhado deverá ser realizado para certificar-se quanto ao valor efetivo de corrente passando pelo disjuntor. Caso a corrente de curto-circuito no disjuntor seja maior que 100% de sua capacidade de interrupção simétrica, o disjuntor será considerado superado. Quando a corrente de curto estiver entre 90% e 100% da capacidade de interrupção simétrica, o disjuntor será considerado em estado de alerta. Nas demais situações, o disjuntor estará em condições de uso. A rotina de avaliação dos disjuntores em relação a capacidade de interrupção simétrica pode ser observada no fluxograma da Figura 2.5.

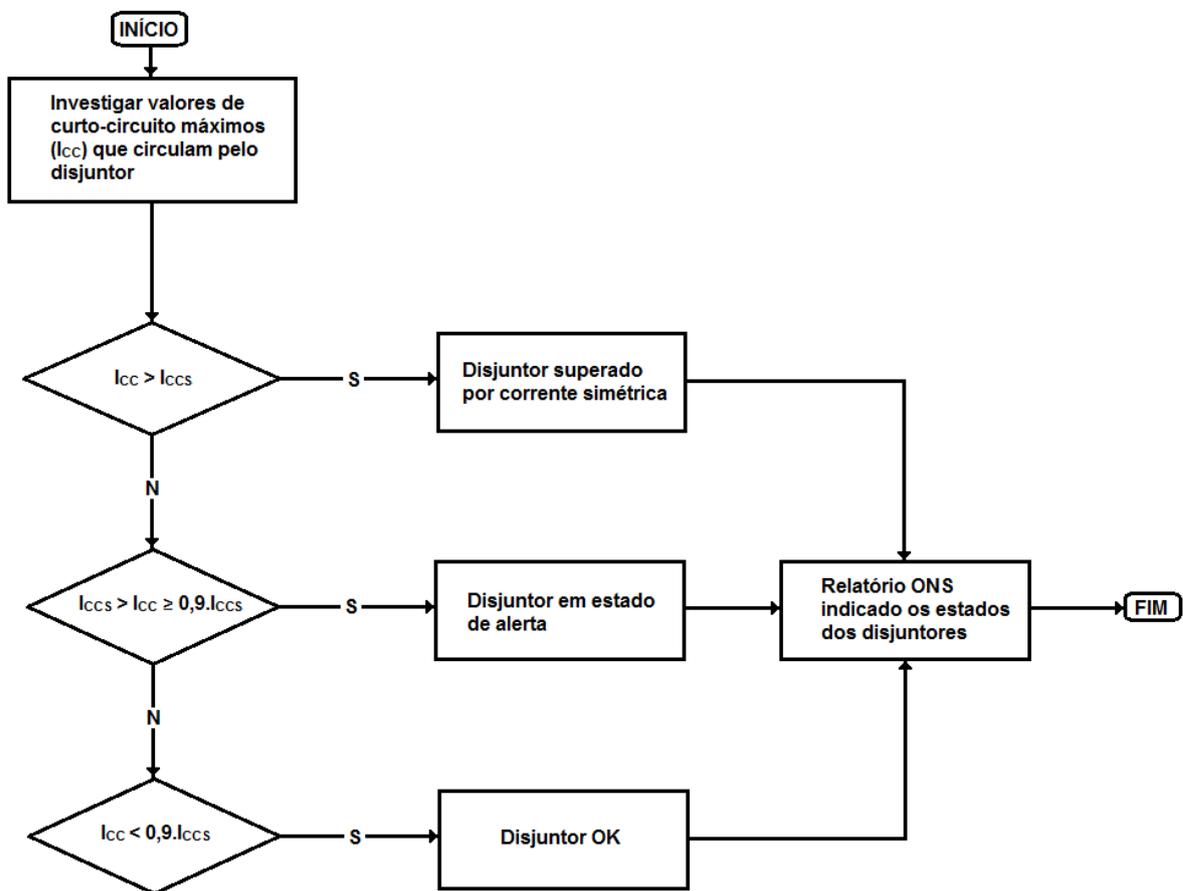


Figura 2.5 – Roteiro para determinar os disjuntores superados por corrente de curto-circuito simétrica

## 3. SOLUÇÕES PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

### 3.1. Introdução

Quando os níveis da corrente de curto-circuito ultrapassam os valores máximos suportáveis pelos componentes do sistema elétrico, seja por conta do valor de pico de corrente ou pelo valor simétrico, tais componentes serão considerados inadequados para operação, pois o risco de graves acidentes será iminente.

Porém, não é em todos os casos que os equipamentos superados por corrente de curto-circuito devem ser substituídos. Neste capítulo serão comentadas algumas soluções que podem dar sobrevida aos componentes superados.

### 3.2. Solução de caráter temporário

Como o próprio nome já diz, são soluções aplicadas de maneira passageira, cujo intuito é sanar o problema da superação dos equipamentos no curto prazo e na ocorrência de emergências. Como, em geral, tais medidas produzem uma redução na confiabilidade do sistema e até podem comprometer sua estabilidade, deverão ser sempre seguidas de um estudo mais aprofundado para identificação de soluções de caráter definitivo.

As principais soluções de caráter provisório são indicadas a seguir e implicam em restrições de operação ao sistema ou modificações do mesmo [6]. No primeiro caso temos:

- Seccionamento de barras: Essa medida visa eliminar as contribuições do curto-circuito provindas da barra seccionada;
- Radialização de circuitos: Tem como principal objetivo aumentar a impedância entre as fontes e o local de ocorrência do curto-circuito pela eliminação dos circuitos alternativos de alimentação (Malhas);
- Desligamentos sequenciais de LT's: Consiste no seccionamento das LT's numa sequência tal que reduza a corrente de curto-circuito nos disjuntores superados;
- Desligamentos de compensadores síncronos: Os compensadores síncronos contribuem para a elevação da corrente de curto-circuito, pois os mesmos atuam como uma fonte de alimentação para o curto, logo, sua retirada faz com que essa contribuição seja nula.

Como modificação sugerida para o sistema consta a alteração do aterramento de transformadores. Muitas vezes, para reduzir as correntes de curto-circuito oriundas de faltas

para a terra, é inserida uma impedância nos aterramentos dos transformadores, modificando a rede de sequência zero. Tal medida reduz de fato as correntes de curto-circuito para esses tipos de faltas, contudo elas tendem a aumentar as tensões induzidas nas fases “sadias” durante o curto.

### **3.3. Soluções de caráter definitivo**

De acordo com [6], tais soluções se restringem a:

- Uso de limitadores de corrente de curto-circuito;
- Recapacitação ou substituição dos equipamentos superados.

É importante destacar que a utilização de dispositivos limitadores apresenta, na sua grande maioria, uma solução economicamente mais viável comparado a recapacitação ou substituição das instalações superadas e, ainda mais, é de fácil execução. A substituição dos equipamentos é caracterizada, muitas vezes, como uma atividade longa e cansativa. A depender do equipamento que se pretenda substituir, o tempo de permanência do sistema fora de operação poderá ser proibitivo devido aos impactos ocasionado pela interrupção do fornecimento de energia.

## 4. DISPOSITIVOS LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

### 4.1. Introdução

A necessidade de reduzir a corrente de curto-circuito a níveis suportáveis pelos disjuntores, para que os mesmos sejam capazes de seccionar o circuito e interromper a corrente de curto-circuito, ou, até mesmo, para evitar danos maiores a outros equipamentos do sistema, como motores, geradores e transformadores, por exemplo, têm incentivado a criação de dispositivos capazes de reduzir a corrente de curto-circuito.

Neste capítulo serão abordadas as características que um limitador de corrente de curto-circuito (LCC) deve possuir para desempenhar seu papel de maneira satisfatória, sem causar grandes impactos ao sistema elétrico, assim como apresentar alguns tipos destes limitadores.

### 4.2. Características Fundamentais de um LCC

De acordo com [7], um LCC deve contemplar as seguintes características para operar de forma satisfatória:

- A impedância do LCC em condições normais de operação do sistema deve ser a menor possível com o intuito de reduzir as perdas resistivas e reativas produzidas pelo mesmo, além de evitar quedas de tensão elevadas. Entretanto, sua impedância deve ser elevada no momento do curto-circuito;
- O tempo de atuação do LCC deve ser o mais rápido possível para evitar as maiores correntes nos instantes iniciais do curto-circuito.
- Seu tempo de reestabelecimento deve ser o menor possível após sua atuação, e, ainda mais, deve ter a capacidade de atuar seguidamente várias vezes.
- O LCC deve ter um alto nível de confiabilidade, pois o mesmo irá atuar entre longos intervalos de tempo (podendo ser até de anos).

Além disso, os seguintes aspectos devem ser avaliados na confecção e implementação de um LCC:

- Condição normal de operação;
- Condição de sobre carga;
- Condição de curto-circuito:
  - Corrente a ser limitada;

- Sobretensão durante a operação;
- Transitórios causados pela operação;
- Proteção:
  - Seletividade;
  - Interação com as técnicas de proteção já existentes;
  - Interação com as novas/futuras técnicas de proteção;
  - Limite da falta de energia que o prejudique;
  - Promover um local de trabalho seguro.
- Segurança e impactos ao meio ambiente:
  - Interferências eletrodinâmicas.
- Vida útil e manutenção do equipamento.
- Custos (operação, instalação, manutenção, etc)

### 4.3. Benefícios Relacionados à Utilização do LCC

Outros benefícios ao sistema elétrico de potência oriundos da aplicação de LCC's, além da redução da corrente de curtos-circuitos aos níveis aceitáveis para operação dos disjuntores, são os seguintes [7]:

- Melhorias na qualidade de energia:
  - Reduz os afundamentos de tensão;
  - Reduz os harmônicos;
  - Reduz as sobretensões temporárias devido à conexão de produtores independentes de energia.
- Evita altos investimentos e sobre dimensionamento de equipamentos
- Evita custos recorrentes.

### 4.4. Técnicas para Limitação da Corrente de Curto-Circuito

Nos tópicos a seguir, serão apresentadas algumas técnicas para limitação da corrente de curto-circuito com base no uso de dispositivos LCC's. Algumas delas já utilizadas na prática há muito tempo e outras ainda em fase de estudo.

#### 4.4.1. Reator Linear com Núcleo de Ar

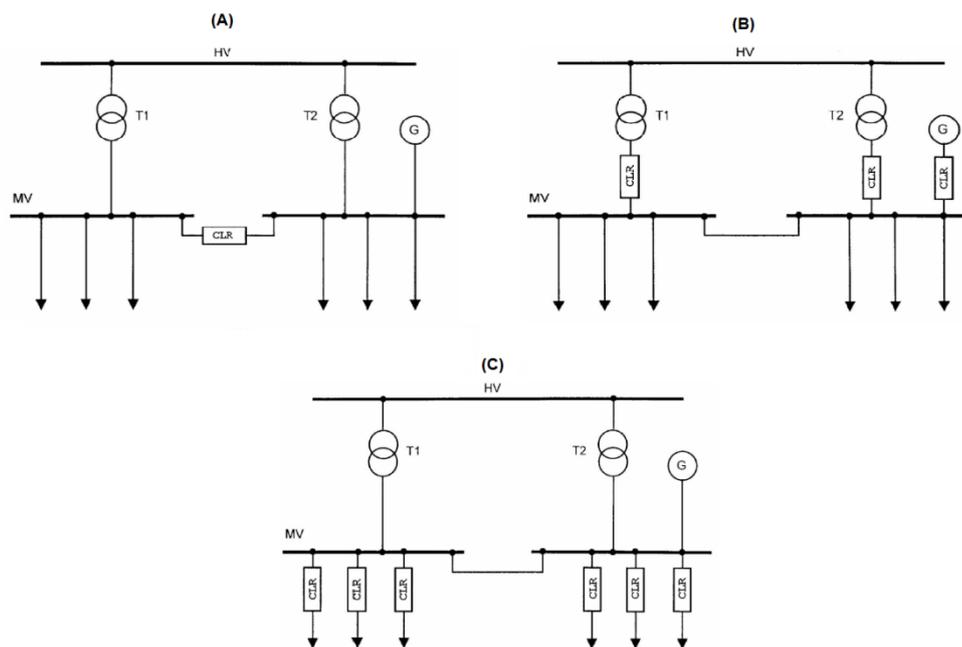
O uso de reatores lineares configura uma das técnicas mais antigas para a limitação da corrente de curto-circuito. Além de sua fácil implementação no sistema, esta técnica

apresenta os menores custo em relação as demais, tornando-a, por isso, atrativa para as empresas.

No Brasil, por exemplo, algumas Subestações dispõem desse tipo de limitador, incluindo subestações de 500 kV, como é o caso da UHE (Usina Hidroelétrica) de Tucuruí [6].

Apesar do custo reduzido, o uso de tal dispositivo acarreta em grandes perdas ao sistema, além de dificultar a regulação da tensão. Outro fato importante é o espaço necessário para a instalação do dispositivo, pois o campo magnético produzido pelo mesmo pode causar interferências no sistema, por isso, o mesmo deverá ser instalado a certa distância dos condutores de fase, não sendo viável seu uso em subestações compactas.

Os parâmetros para a construção do reator linear levam em consideração os estudos de curto-circuito do sistema, o fluxo de potência e os transitórios eletromagnéticos existentes [6]. A seguir, pode-se observar na Figura 4.1 as diversas formas, sugeridas em [8], para inserção do reator (CLR) no sistema, bem como suas vantagens e desvantagens.



**Figura 4.1 – Formas de ligação do reator linear com núcleo de ar [8]**

A configuração da Figura 4.1(A) permite uma melhor distribuição da corrente de carga do sistema e reduz a impedância equivalente do mesmo, além, é claro, de reduzir a corrente de curto-circuito. Contudo, esta configuração não reduz a contribuição individual produzida por uma, ou mais, das fontes de alimentação (transformadores e gerador).

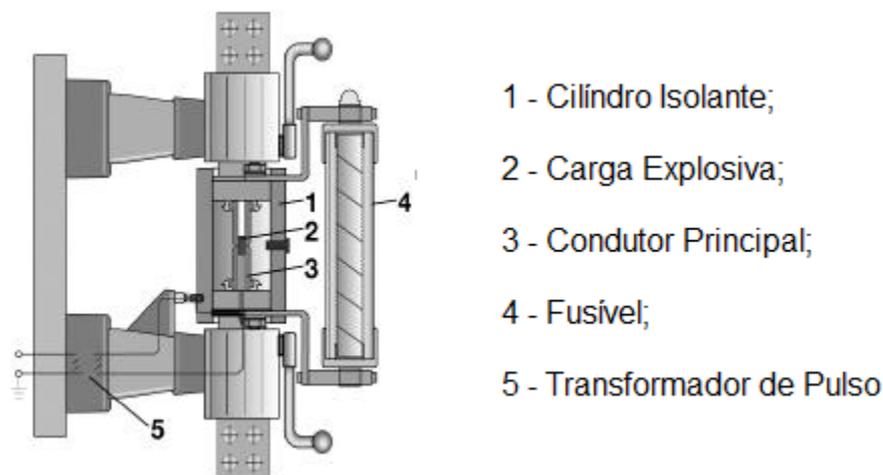
Já a configuração da Figura 4.1(B) possui as mesmas vantagens da anterior e ainda soluciona o problema das contribuições individuais, porém ela apresenta maiores perdas e dificuldades na regulação de tensão.

A configuração da Figura 4.1(C) é a que mais se destaca em relação as outras, pois além resolver o problema da contribuição individual das fontes, ela proporciona perdas menores e possibilita um controle mais adequado da tensão.

#### 4.4.2. Dispositivos Pirotécnicos

Desenvolvido em 1955, este equipamento pode ser utilizado tanto em sistemas de corrente contínua, quanto em sistemas de corrente alternada, principalmente em sistemas trifásicos [7].

Os dispositivos pirotécnicos são equipamentos capazes de interromper correntes de curto-circuito elevadas, em tempos extremamente rápidos, menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo [6]. Isto se deve ao fato de que tais dispositivos possuem como elemento de interrupção da corrente de curto, cargas explosivas e elementos fusíveis. A Figura 4.2 mostra de maneira simplificada sua arquitetura e seus principais componentes.



**Figura 4.2 – Dispositivo Pirotécnico desenvolvido pela ABB[7]**

Em condições normais de operação do sistema, a corrente circula pelo condutor principal de resistência desprezível. Ocorrendo um curto-circuito, a carga explosiva irá atuar, interrompendo o caminho de circulação da corrente e fazendo-a circular pelo fusível em paralelo ao condutor principal. Este, num curto espaço de tempo, cerca de 5 ms, irá fundir-se e interromper a passagem da corrente.

Uma desvantagem desse dispositivo é a necessidade de reposição da carga explosiva e do fusível, após sua atuação. Neste intervalo de tempo, o fornecimento de energia será prejudicado, principalmente se o dispositivo for localizado em interligações de barramentos de subestações.

É importante ressaltar que tal dispositivo não elimina a necessidade da utilização dos equipamentos de manobras, como os disjuntores e as chaves seccionadoras, pois este limitador somente atuará para correntes superiores à capacidade de interrupção dos disjuntores. Em condições normais e para correntes de curto circuitos menores, quem deve atuar é o disjuntor.

#### **4.4.3. Limitadores a Base de Elementos de Estado Sólido**

Os limitadores de estado sólido com compensação série, além de limitarem as correntes de curto-circuito, aumentam a capacidade de transmissão do sistema. Estes dispositivos possuem um baixo tempo de atuação devido aos elementos de estado sólido, assim como, um baixo tempo de reestabelecimento após sua atuação.

Em condições normais de operação do sistema, a corrente de carga não circula pelos dispositivos de estado sólido, portanto nenhuma perda é inserida no sistema nesta situação.

Diferentemente dos outros LCC's, que somente têm utilidade na ocorrência de uma falta, este limitador pode funcionar como um compensador série do sistema em condições normais.

Nos próximos subtópicos serão exibidos os principais arranjos do dispositivo.

##### **4.4.3.1. Configuração em Paralelo com Compensação Série**

Para esta topologia do limitador, proposta em [9], é utilizado um circuito LC ressonante, conforme a configuração da Figura 4.3, o qual deve ser conectado em série com sistema a ser protegido. A frequência de ressonância do dispositivo deve ser a mesma de operação do sistema, para que, no momento do curto, a impedância vista pelo sistema seja praticamente infinita, limitando a corrente de curto-circuito para atuação dos disjuntores.

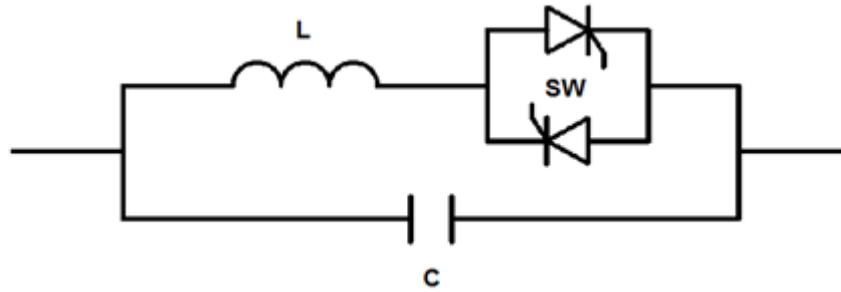


Figura 4.3 – Esquema de montagem da configuração em paralelo do LCC a base de elementos de estado sólido

Em condições normais de operação do sistema, os tiristores não devem conduzir e somente o capacitor está ligado em série ao sistema para realizar a compensação série. Durante o curto, os tiristores recebem um pulso de gatilho e passam a conduzir, conectando o indutor ao sistema. A inserção do indutor no circuito deve ser realizada de maneira rápida, em alguns milissegundos, para garantir a boa atuação do equipamento.

#### 4.4.3.2. Configuração em Série com Compensação

Este arranjo do limitador é proposto em [10]. Diferentemente do arranjo anterior, aqui o indutor  $L$  deve ser ligado em série com o capacitor  $C$ , de forma que, em condições normais de operação do sistema, a reatância líquida vista pelo mesmo será a combinação dos dois, ou seja, se o indutor predominar sobre o capacitor, a reatância equivalente será indutiva, caso contrário, a reatância equivalente será capacitiva. Por outro lado, se o indutor e o capacitor estiverem em ressonância, a reatância equivalente será nula. Como na configuração anterior os tiristores não devem conduzir na operação normal do sistema.

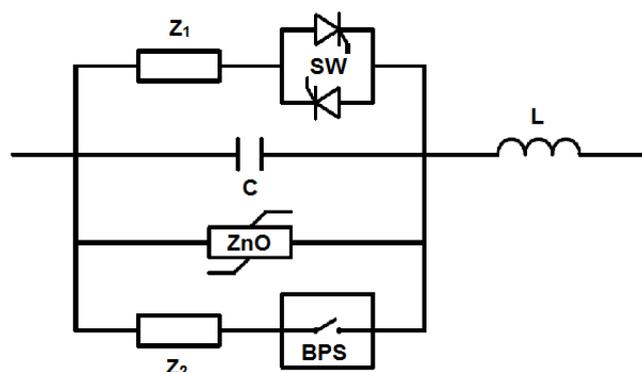


Figura 4.4 – Esquema de montagem da configuração em série do LCC a base de elementos de estado sólido

Para que a compensação série possa ser realizada, é desejável que o capacitor  $C$  predomine sobre o indutor  $L$ . Na ocorrência de um curto-circuito, os tiristores entram em condução, removendo o capacitor do circuito e permanecendo, apenas, o indutor para redução da corrente de curto-circuito a um nível adequado a atuação dos disjuntores. A impedância  $Z_1$  serve para limitar a corrente de *inrush* nos tiristores, o dispositivo  $Z_{nO}$  é um para-raios e funciona para a proteção de sobretensão no capacitor e a chave BPS é utilizada para realizar uma descarga no capacitor, onde a impedância  $Z_2$  presta-se para limitar a corrente de *inrush* proveniente desta descarga.

#### 4.4.3.3. Configuração em Série/Paralelo com Compensação

Este arranjo do limitador é proposto em [11] e é basicamente uma junção dos outros dois arranjos citados anteriormente. O ramo contendo o resistor  $R_1$  e o capacitor  $C_1$  é conhecido como “*snubber*” e funciona como uma proteção para os tiristores em caso de sobre tensão.

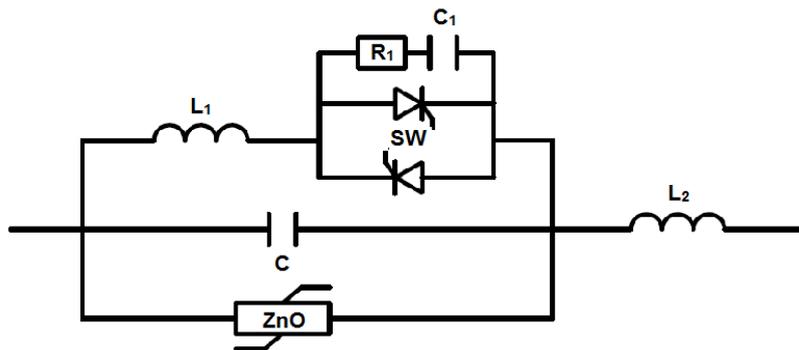


Figura 4.5 – Esquema de montagem da configuração em série/paralelo do LCC a base de elementos de estado sólido

Seu princípio de funcionamento também se assemelha muito aos dos outros modelos. Em condições normais de operação do sistema, os tiristores não devem conduzir, deixando o indutor  $L_1$  fora do circuito, a reatância vista pelo sistema é então a combinação do capacitor  $C$  e do indutor  $L_2$ , onde o valor da reatância do capacitor  $C$  deve ser escolhida de tal maneira a ser maior, em módulo, que a reatância do indutor  $L_2$ , para que a compensação série possa existir.

Na ocorrência do curto, os tiristores passam a conduzir, introduzindo o indutor  $L_1$  ao circuito e, conforme o ângulo de disparo, a impedância equivalente entre o indutor  $L_1$  e o capacitor  $C$  será elevada e, essa impedância em série com o indutor  $L_2$ , daria a impedância total no momento do curto circuito, que é a responsável pela limitação da corrente.

#### 4.4.4. Limitadores a Base de Supercondutores

A supercondutividade é uma propriedade física encontrada em alguns materiais disponíveis na natureza, os quais, quando submetidos a temperaturas extremamente baixas, apresentam, como característica, uma resistência elétrica nula e um diamagnetismo perfeito. É importante destacar que tais características deixam de existir na presença de campo magnético externo ao material, temperaturas acima da temperatura crítica e aplicação de corrente de transporte.

Pesquisas e aplicações envolvendo materiais supercondutores tem se destacado após a descoberta de materiais supercondutores de alta temperatura crítica. A empresa Asea Brown Boveri (ABB) foi a primeira a realizar um teste envolvendo o uso de um limitador supercondutor em 1996, em uma rede elétrica localizada na suíça de 10 kV, com potência de 1,2 MVA [12].

As principais características desses limitadores, definidas em [12] são:

- Rápido tempo de atuação;
- Grande capacidade de limitação;
- Não requer reposição;
- Atuam independentemente, não é necessário o uso de sensores;
- São dispositivos pequenos e leves;
- Interrompem a corrente de curto-circuito mesmo em caso de falha do limitador

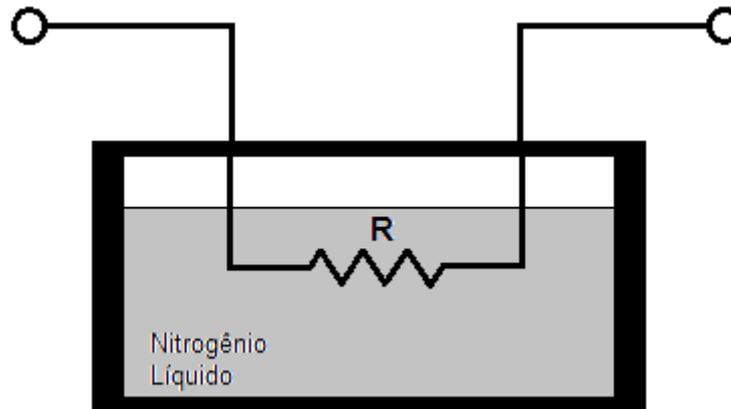
O princípio fundamental de funcionamento dos limitadores a base de supercondutores é a característica dos materiais supercondutores exibirem resistência praticamente nula no seu estado normal de operação e uma resistência elevada durante um curto-circuito, isto se deve a corrente imposta pelo curto-circuito superar o valor crítico do material supercondutor.

Dentre os principais limitadores supercondutores existentes, os que possuem mais destaque serão comentados nos próximos subtópicos.

##### 4.4.4.1. Tipo Resistivo

Os limitadores de corrente baseados nesta arquitetura dispõem de um material supercondutor diretamente conectado ao sistema, numa ligação série. Quando o sistema opera em condições normais, a corrente que circula pelo material supercondutor não afeta as suas características sendo, pois, sua resistência desprezível.

Na ocorrência de um curto-circuito, o material é submetido a elevadas correntes e perde suas características supercondutoras, passando a apresentar uma resistência e reduzindo a corrente de curto-circuito a níveis aceitáveis para a operação dos disjuntores de maneira rápida e eficiente.



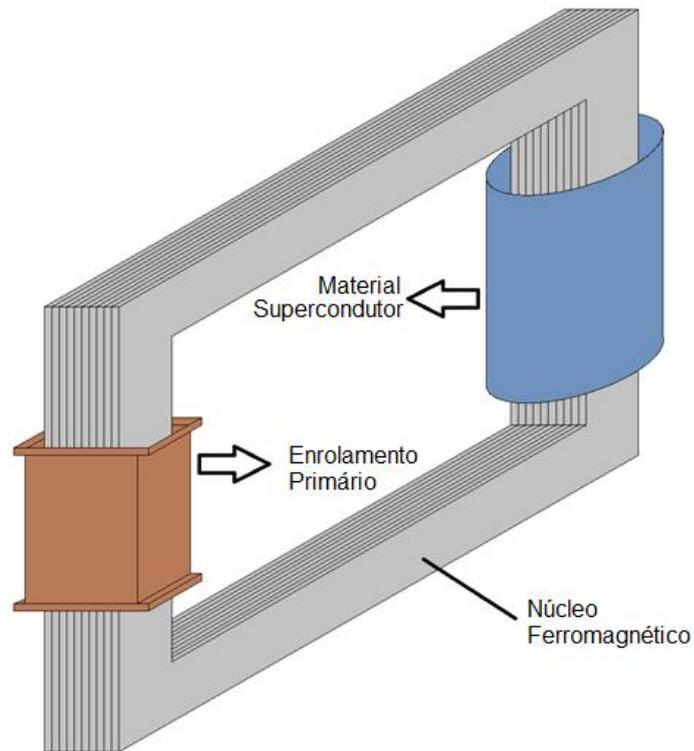
**Figura 4.6 – Limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo**

A eliminação do curto-circuito deve ser realizada de forma rápida para evitar altas temperaturas no dispositivo, principalmente no condutor que desempenha o papel de supercondutor. Uma desvantagem desse tipo de limitador é o seu tempo de reestabelecimento após a operação, necessitando ser desligado do circuito por algum tempo, para recuperar suas propriedades de supercondutividade.

#### **4.4.4.2. Tipo Indutivo**

Também conhecido como limitador do tipo núcleo de ferro blindado, este dispositivo exibe um arranjo de um transformador, Figura 4.7. O primário do mesmo é constituído de maneira semelhante a um transformador comum, com algumas espiras de cobre e o seu secundário é constituído por um material supercondutor, normalmente em formato de invólucro cilíndrico.

Em operação normal, a corrente de carga circulando pelo enrolamento primário é inferior ao limite crítico de corrente do material supercondutor, ou seja, o campo magnético produzido pela corrente de carga passando pelas espiras do primário é bloqueado pelo material supercondutor, sendo este fenômeno conhecido como Efeito Meissner.



**Figura 4.7 – Limitador de corrente de curto-circuito supercondutor indutivo**

Ocorrendo um curto circuito, a corrente circulando pelo primário do transformador é superior ao limite crítico de corrente, portanto, a blindagem exercida pelo material supercondutor deixa de funcionar. O fluxo magnético passa a circular agora pelo núcleo de ferro do transformador, fazendo com que a impedância do enrolamento primário se eleve, limitando, assim, a corrente de curto circuito.

Tal como o limitador supercondutor do tipo resistivo, é necessário um tempo de reestabelecimento do dispositivo para que o mesmo possa ser colocado de volta em operação, pois sua temperatura precisa retornar aos níveis padrões de funcionamento do material como um supercondutor.

#### **4.4.4.3. Tipo Ponte de Diodos**

Este tipo de limitador utiliza uma ponte completa de diodos ou tiristores, um indutor constituído de material supercondutor e uma fonte de tensão contínua, conforme configuração na Figura 4.8. Em condições normais, a corrente alternada  $I_{ac}$  não circular pelo indutor devido a corrente imposta pela fonte CC  $I_0$ , ter amplitude superior. Nesta condição, os quatro diodos estão conduzindo nesta situação. Na ocorrência de um curto circuito, a corrente  $I_{ac}$  terá sua amplitude elevada, tornando-se maior que a corrente  $I_0$  durante alguns instantes, tanto no meio ciclo positivo como no negativo de  $I_{ac}$ . Durante este intervalo de tempo a corrente de

curto passa a circular pelo supercondutor, onde é então limitada. Portanto, o valor da corrente a ser limitada é determinada pelo ajuste da corrente  $I_0$ .

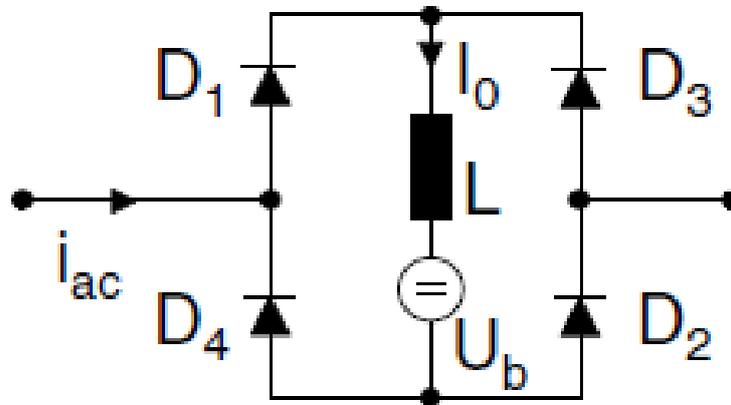


Figura 4.8 – Esquema de montagem do limitador de corrente de curto-circuito supercondutor com ponte de diodos [13]

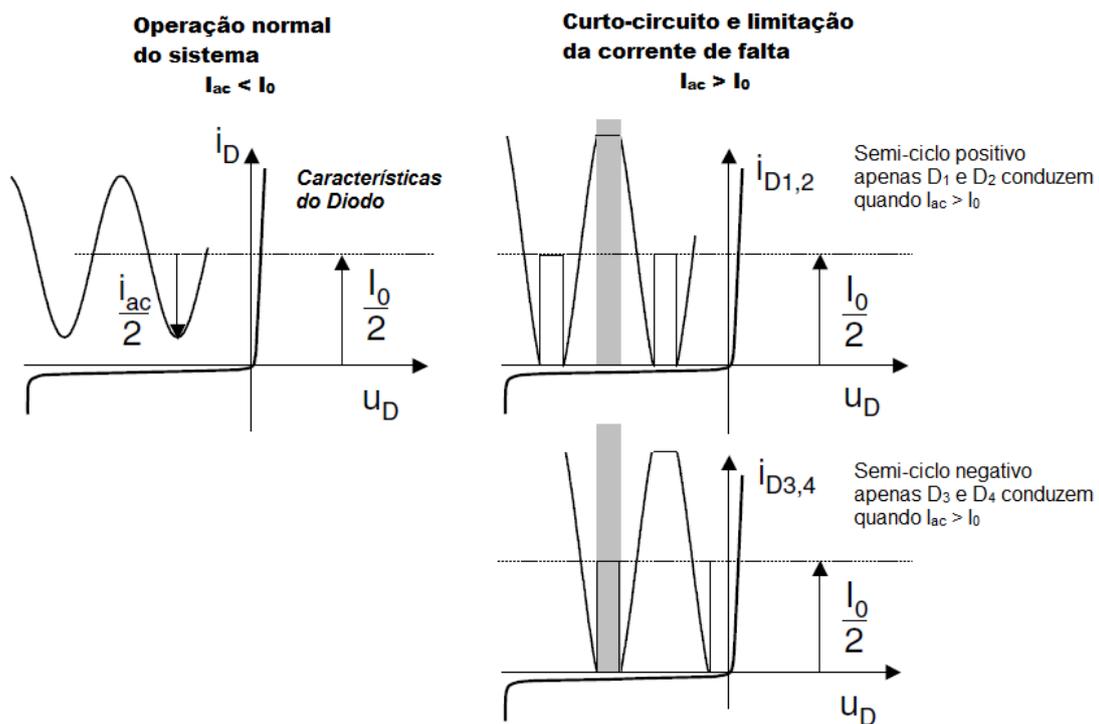


Figura 4.9 – Características dos diodos e sentido da corrente no limitador [13]

Segundo [13], o indutor  $L$  não necessariamente precisa ser supercondutor para o limitador funcionar de maneira adequada, contudo o número de espiras requerido seria maior, assim como, as perdas devido a  $I_0$ .

Diferentemente dos outros limitadores supercondutores, este não necessita de um tempo de reestabelecimento após sua operação, podendo ser ligado novamente ao sistema

após sua operação, porém, ele não irá limitar o curto circuito no caso de uma falha interna do dispositivo, como por exemplo, uma falha dos diodos criando um curto interno.

#### 4.4.5. IPC (Interphase Power Controllers)

Os IPC são dispositivos constituídos basicamente de elementos como indutores, capacitores e transformadores defasadores, o modelo genérico podendo ser visto na Figura 4.10. Este dispositivo consiste basicamente de um ramo indutivo e outro capacitivo, conectados em paralelo, sendo ambos alimentados por tensões com fases diferentes.

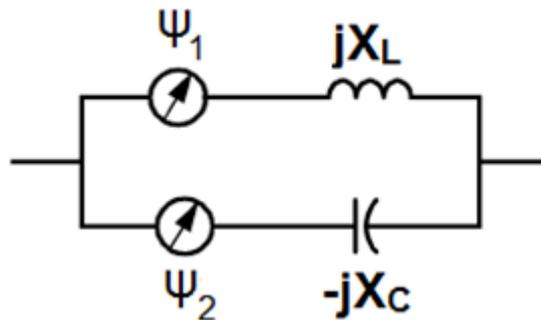


Figura 4.10 – Modelo genérico do IPC

Dentre as principais funções do IPC, descritas em [14], estão:

- Controle do fluxo de carga;
- Limitação da corrente de curto-circuito;
- Redução das oscilações de tensão.

Ainda segundo [14], os IPC's podem ser classificados de acordo com os seguintes tipos:

- *Decoupling Interconnector (DI)* - promove o desacoplamento de redes em interligações para resolver os problemas de oscilações, variações excessivas de tensão e altos níveis de curto;
- *Fault Current Limiting Transformer (FCLT)* - permite o aumento da capacidade de transformação de uma Subestação sem elevar o nível de curto;
- *Assisted Phase Shifting Transformer (APST)* - aumentam a capacidade de transferência dos transformadores defasadores existentes

Para aplicações de limitação de curto-circuito, as reatâncias do indutor e do capacitor são escolhidas de forma a terem o mesmo valor em módulo na frequência

fundamental de operação do sistema, de forma que, durante o momento do curto, a impedância vista pelo sistema será infinita.

Cada terminal do IPC funciona como uma fonte de corrente controlado por tensão, assim, um curto circuito ocorrendo em qualquer um dos lados do dispositivo, não será transferido para o outro lado.

#### 4.4.6. Limitadores a Base de Materiais Ferromagnéticos

Conforme [7], Existem dos tipos de limitadores a base de materiais ferromagnéticos descritos na literatura:

- Limitadores Magnéticos com Material Ferromagnético Duro;
- Limitadores Magnéticos com Material Ferromagnético Mole.

Nos próximos subtópicos, uma breve discussão sobre tais limitadores será realizada.

##### 4.4.6.1. Limitadores Magnéticos com Material Ferromagnético Duro

Os limitadores magnéticos constituídos de material ferromagnético duro, descrito em [15], apresentam arquitetura semelhante aos limitadores a base de materiais supercondutores do tipo núcleo de ferro blindado, a única modificação consistindo na substituição do material supercondutor por um ímã permanente. Tal dispositivo usa as propriedades da histerese magnética para o seu funcionamento.

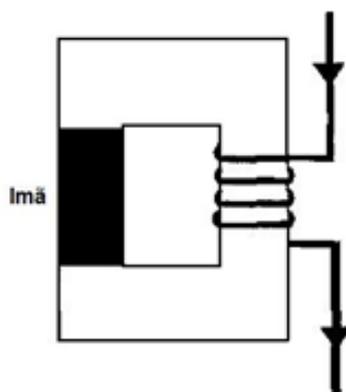
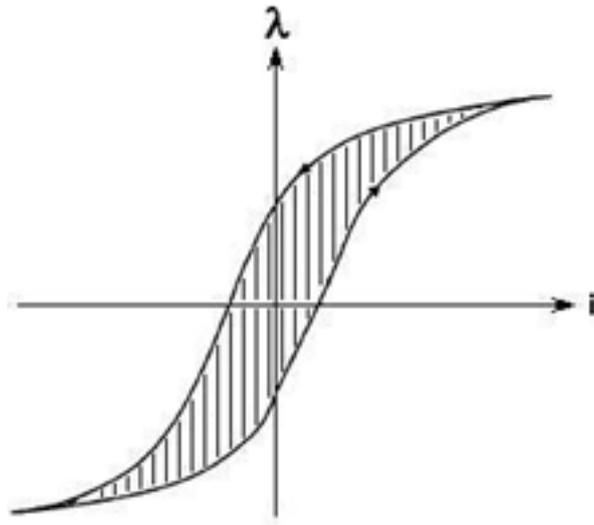


Figura 4.11 – Limitador de corrente de curto-circuito com material ferromagnético duro [7]

A histerese é um fenômeno típico dos materiais ferromagnéticos e está relacionada à exigência de energia para orientação dos domínios magnéticos quando um campo magnético é aplicado ao material. Por conta desse fenômeno, a relação entre campo e indução

no material tem a forma indicada na Figura 4.12, a qual depende da magnetização previamente existente.



**Figura 4.12 – Ciclo de Histerese dos materiais ferromagnéticos [7]**

A bobina do dispositivo deve ser ligada em série com o sistema a ser protegido, e deve ser dimensionada para que, em condições normais de operação, o campo magnético produzido pela passagem da corrente de carga seja inferior ao campo magnético produzido pelo ímã. Nesta condição o dispositivo apresenta baixa permissividade, importando em um baixo valor de impedância.

Quando ocorre um curto-circuito no sistema, o campo magnético produzido pela bobina, devido a passagem da corrente de curto, será maior que o campo magnético do ímã permanente, ocasionando uma alta permissividade no dispositivo e elevando a sua impedância.

#### **4.4.6.2. Limitadores Magnéticos com Material Ferromagnético Mole**

Os limitadores magnéticos constituídos de material ferromagnético mole, também conhecido como reator com saturação natural (RSN), têm características semelhante e mesmo princípio de funcionamento que os limitadores a base de elementos de estado sólido, a única diferença consiste na substituição dos tiristores pelo RSN, o qual passa a exercer o papel de uma chave.

A característica principal do material ferromagnético utilizado para confecção de limitadores deste tipo pode ser observada na Figura 4.13. Enquanto a tensão sobre o limitador for menor que a tensão de saturação do material, sua impedância será bastante elevada,

caracterizando-se, portanto, uma chave aberta. Quando a tensão de saturação é superada sua característica de operação muda de maneira drástica, pois a baixa inclinação da curva reduz significativamente o valor da impedância. Nesta condição, o RSN funciona como uma chave fechada.

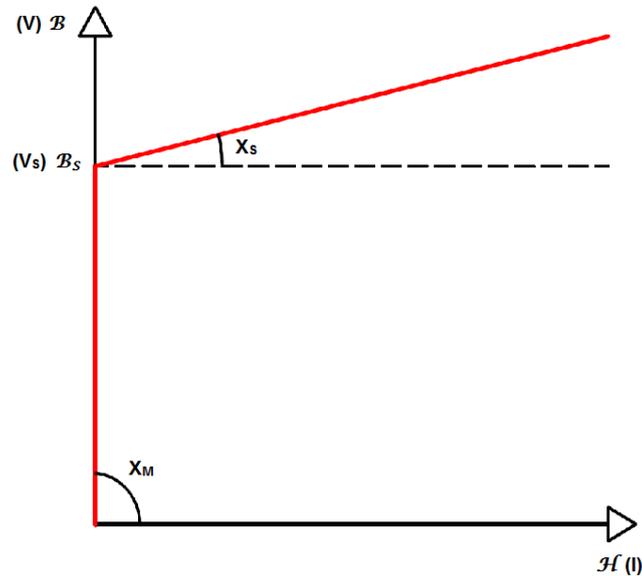


Figura 4.13 – Característica  $B \times H$  ou  $V \times I$  do material ferromagnético do RSN

Segundo [7], os limitadores a base do RSN podem ser classificados em dois tipos diferentes:

- RSN do Tipo A
- RSN do Tipo B

A principal diferença entre os dois está na sua curva de saturação, conforme visto na Figura 4.14, onde os RSN do tipo B apresentam uma inclinação maior, isto implica que o mesmo possui uma reatância  $X_s$  maior.

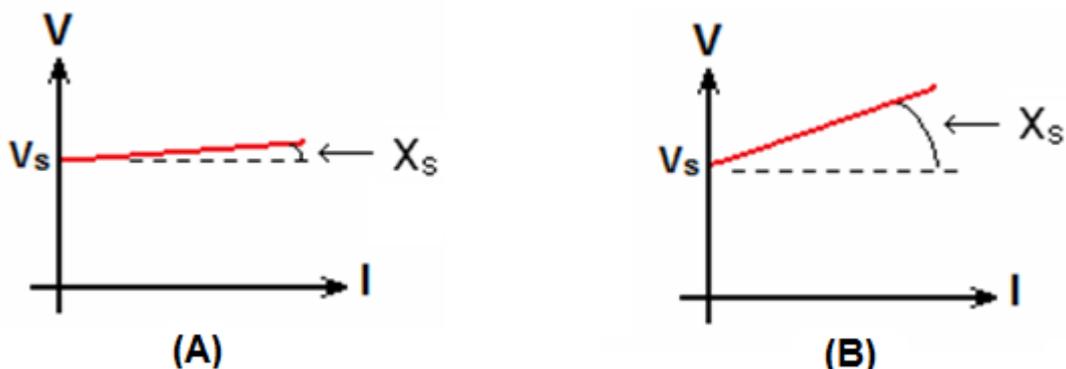


Figura 4.14 – Curva  $V \times I$  para limitadores de corrente de curto-circuito com RSN do tipo A e B [7]

Baseados nestes dois tipos, vários arranjos são propostos em [7] que serão descritos nos próximos subtópicos.

#### 4.4.6.2.1. Arranjo do Tipo A1

Este arranjo pode ser observado na Figura 4.15. Em condições normais de operação do sistema, a queda de tensão provocada pela passagem da corrente de carga sobre a reatância capacitiva é inferior a tensão de saturação do RSN, logo o mesmo funciona como uma chave aberta. As reatâncias capacitiva e indutiva podem, neste caso, ser escolhidas de tal forma que:

- Se desejável um valor nulo da impedância do limitador, então  $X_C$  deve ser igual a  $X_L$  na frequência de operação do sistema, logo eles estariam em ressonância e a impedância do limitador será nula;
- Se desejável a compensação série no local onde for instalado, então  $X_C$  deve ser maior que  $X_L$ .

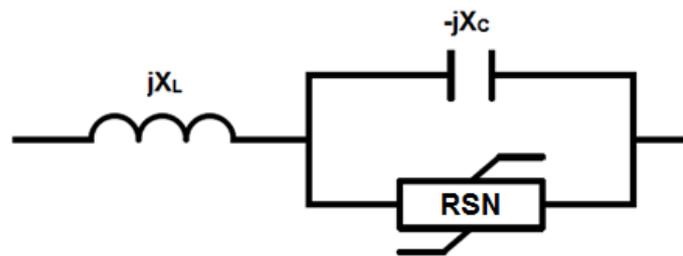


Figura 4.15 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo A1

Na ocorrência de um curto-circuito, a passagem da corrente pela reatância capacitiva será alta o suficiente para superar a tensão de saturação do RSN, de modo que o mesmo passará a atuar como uma chave fechada, removendo o capacitor do circuito e deixando apenas o indutor, o qual será responsável pela limitação da corrente de curto-circuito.

#### 4.4.6.2.2. Arranjo do Tipo A2

Uma outra alternativa do RSN do tipo A é o arranjo exibido na Figura 4.16, onde o indutor é ligado em série com o RSN e ambos são ligados em paralelo com o capacitor. Assim como a montagem do tipo A1, a corrente de carga que circula pelo sistema em condições normais de operação provoca uma queda de tensão inferior a tensão de saturação do RSN e nesta condição o RSN opera como uma chave aberta.

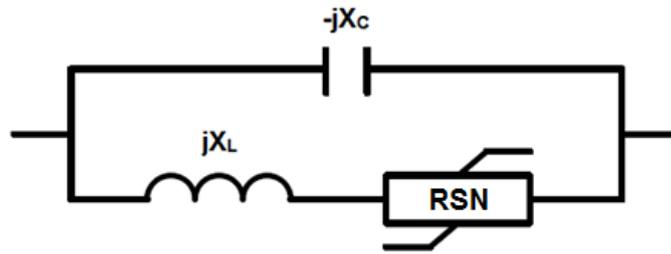


Figura 4.16 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo A2

Na ocorrência de um curto-circuito, a queda de tensão sobre o limitador será superior a tensão de saturação do RSN, logo o mesmo passará a atuar como uma chave fechada. Nestas condições, a impedância vista pelo sistema será o equivalente em paralelo da reatância capacitiva  $X_C$  com a reatância indutiva  $X_L$ . Tais reatâncias devem ser dimensionadas de forma que  $X_C$  seja maior que  $X_L$  na ocorrência da falta, para que impedância equivalente seja indutiva.

A vantagem deste esquema em relação ao anterior, é que, para as mesmas circunstâncias, o RSN e o banco de capacitor utilizado devem ter valores menores.

#### 4.4.6.2.3. Arranjo do Tipo A3

Este arranjo do limitador, observado na Figura 4.17, reúne as características dos outros dois RSN do tipo A, de forma que os ajustes de  $X_{L1}$  e de  $X_C$  devem ser os mesmos do tipo A1 para o funcionamento em condições normais do sistema e o ajuste de  $X_{L2}$  deve ser o mesmo do tipo A2, ou seja, menor que  $X_C$ , para que a impedância do limitador durante o curto será a soma de  $X_{L1}$  com o paralelo de  $X_C$  e  $X_{L2}$ .

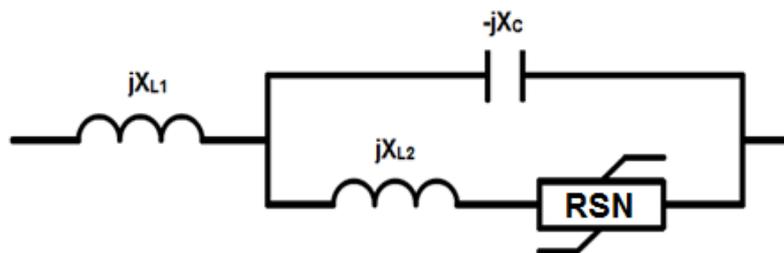


Figura 4.17 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo A3

Apesar de ser mais caro que os outros arranjos do tipo A, se o limitador permitir a possibilidade de ajuste de  $X_{L2}$ , um melhor ajuste da impedância final no momento do curto-circuito pode ser realizado. Este arranjo pode ser utilizado em ocasiões em que os outros dois arranjos citados não tenham um desempenho satisfatório.

#### 4.4.6.2.4. Arranjo do Tipo B1

Os RSN baseados no tipo B tendem a funcionar como uma chave aberta em condições normais de operação do sistema e como um indutor no momento do curto-circuito, devido ao alto valor da reatância que o mesmo possui, mesmo quando a tensão aplicada sobre ele é superior a sua tensão de saturação.

Para o arranjo do tipo B1, apresentado na Figura 4.18, o princípio de funcionamento é o mesmo do tipo A2, a diferença entre eles é a não necessidade do uso do indutor em série com o RSN. A impedância equivalente do limitador vista pelo sistema no momento do curto será o paralelo entre o RSN e  $X_C$ .

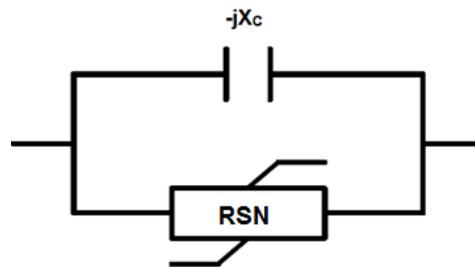


Figura 4.18 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo B1

É importante destacar que o limitador disposto nesta configuração deve ser instalado em locais onde é necessária a compensação série, para evitar sobre tensões desnecessária no sistema. Por utilizar menos elementos que o limitador do tipo A2, pode-se considerar que seu custo será inferior em relação ao do tipo A2.

#### 4.4.6.2.5. Arranjo do Tipo B2

O arranjo do tipo B2, presente na Figura 4.19, trata-se de uma modificação do arranjo do tipo B1 para uma melhor regulação da impedância no momento do curto-circuito, seu princípio de funcionamento se assemelha muito ao limitador do tipo A3, assim como os seus ajustes. Em operação normal do sistema o RSN funciona como uma chave aberta e  $X_C$ , juntamente com  $X_L$ , são ajustados para estarem em ressonância na frequência de operação, e assim obter uma impedância equivalente nula, ou para que  $X_C$  seja maior que  $X_L$  se o objetivo é também realizar uma compensação série. Logo o campo de aplicação deste arranjo é maior que o anterior, apesar de ter um custo mais elevado.

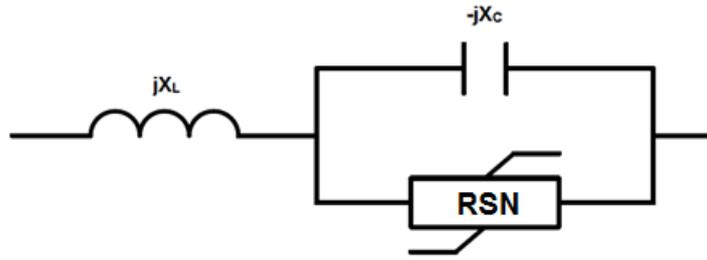


Figura 4.19 – Arranjo do limitador de corrente de curto-circuito com RSN, tipo B2

## 5. ESTUDO DE CASO ENVOLVENDO O LCC COM O RSN

### 5.1. Introdução

O intuito deste capítulo é mostrar o desempenho dos dispositivos LCC que utilizam RSN, através de simulações realizadas em programa computacional específico. Diversos tipos de curtos-circuitos foram simulados para comprovação do funcionamento deste tipo de limitador. É relevante citar que a General Electric Company (GEC), renomada empresa sediada na Inglaterra, foi a pioneira na fabricação desse tipo de LCC, datado da década de 1970 [7]. Durante tal período alguns desses dispositivos foram comercializados na Europa para aplicações em acoplamento de barras de subestações e na conexão de pequenas fontes de geração com o sistema elétrico de grande porte [7].

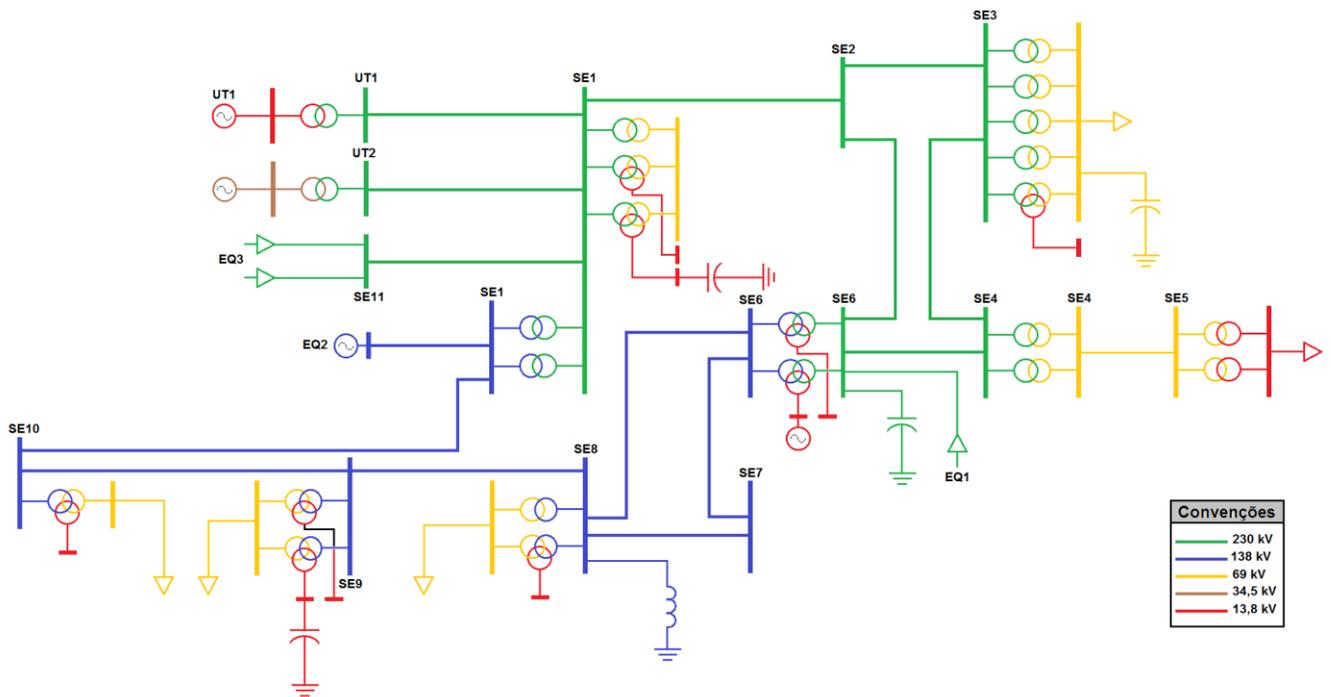
As características do RSN utilizado nesta etapa foram obtidas das pesquisas e dos projetos desenvolvidos pelo Laboratório Digital de Sistema de Potência (LDSP), grupo pertencente a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde um de seus focos de estudo envolve diferentes aplicações para o RSN. Vários artigos científicos já foram escritos e publicados por tal grupo acerca do tema, assim como a construção de protótipos do LCC a base do RSN foram realizadas para possibilitar as pesquisas correlatadas.

### 5.2. Caracterização do Sistema em Estudo

O sistema de potência utilizado para realização do estudo de caso, Figura 5.1, consistiu em parte da rede elétrica da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), portanto os dados utilizados neste estudo estão muito próximos da realidade.

O sistema apresentado na Figura 5.1 é constituído por:

- Vinte e três Linhas de Transmissão, onde quatorze delas são de 230 kV e o restante de 138 kV. Alguns trechos do sistema da Figura 5.1 são constituídos por duas linhas em paralelo;
- Vinte e dois transformadores, onde seis deles possuem enrolamento primário, secundário e terciário, e os restantes possuem apenas os enrolamentos primário e secundário;
- Cinco dispositivos estáticos de controle de tensão, quatro do tipo capacitivo, localizado nas SE1, SE3, SE6 e SE9; e apenas um do tipo reativo na SE8;



**Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema simulado**

- Três máquinas síncronas, duas delas atuando como unidades geradoras, localizadas nas usinas térmicas UT1 e UT2, e uma localizada na SE6, atuando como compensador síncrono;
- Três equivalentes externos; delimitando as fronteiras do sistema, identificados pelas letras EQ1, EQ2 e EQ3;
- Seis cargas, localizadas nas subestações SE1, SE3, SE5, SE7, SE8 e SE9, uma delas conectadas a uma barra de 13,8 kV e as demais em barras de 69 kV.

O local do sistema escolhido para aplicação dos curtos-circuitos e implementação do LCC foi na Subestação SE5, mais especificamente na barra de 13,8 kV, devido aos altos valores de corrente de curto registrado durante as simulações. É importante destacar que o LCC poderia ser aplicado em qualquer outro ponto do sistema.

As tabelas com os parâmetros de entrada de cada componente simulado se encontram disponíveis nos anexos, com exceção das tabelas contendo os parâmetros de entrada do LCC que serão apresentadas neste capítulo.

### 5.3. Modelagem dos Componentes do Sistema

A modelagem de cada componente utilizado foi realizada através do programa *Electromagnetic Transient Program - Alternative Transient Program* (EMTP-ATP), mais

especificamente pelo seu editor gráfico denominado de *ATPDraw*, através dos diversos componentes presentes em sua vasta biblioteca para este fim. A versão do programa e do editor gráfico utilizado se encontra disponível no apêndice.

Os modelos seguiram as regras especificadas pelo CIGRÉ para realização de estudos envolvendo fenômenos transitórios de baixa frequência, faixa de 0,1 Hz até 3 kHz [16], e se encontram descritos em detalhes nos tópicos a seguir.

### 5.3.1. Linhas de Transmissão

Para a maioria das linhas de transmissão que interligam as subestações do sistema apresentado na Figura 5.1, o modelo indicado pela literatura especializada, como [17], é apresentado na Figura 5.2 e consiste basicamente de:

- Um conjunto de indutores e capacitores distribuídos ao longo da linha de transmissão, especificados por unidade de comprimento.
- Uma resistência ôhmica concentrada, repartida em três parcelas, onde metade é inserida no meio da linha e a outra metade é repartida igualmente entre as duas extremidades da mesma.

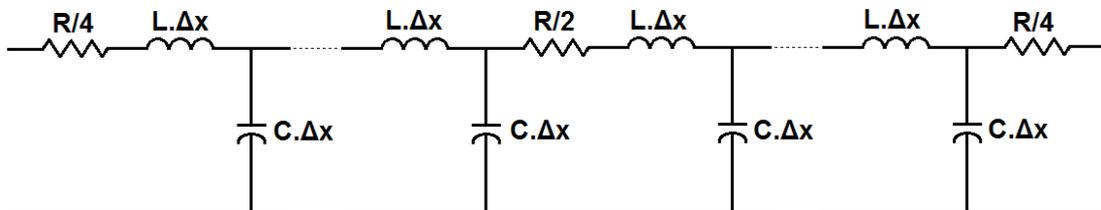


Figura 5.2 – Modelo da linha de transmissão.

O elemento da biblioteca do EMTP-ATP utilizado para representar esse modelo foi o *type -1, -2, -3*. No editor gráfico do programa, o componente correspondente ao elemento citado é o *LINEZT\_3*, Figura 5.3, encontrado no menu *Lines/Cables*.

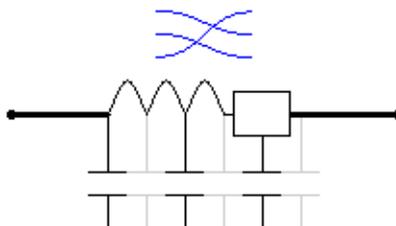


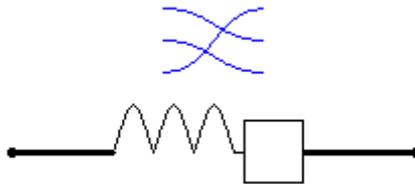
Figura 5.3 – Componente *LINEZT\_3*.

Os dados de entrada necessários para o componente LINEZT\_3 são:

- Resistência de sequência positiva e zero em  $\Omega/\text{km}$ ;
- Reatância indutiva de sequência positiva e zero em  $\Omega/\text{km}$ ;
- Susceptância capacitiva de sequência positiva e zero em  $\mu\Omega^{-1}/\text{km}$ ;
- Comprimento da linha de transmissão.

A linha de transmissão que interliga a usina térmica UT1 à subestação SE1, assim como a linha de transmissão entre a usina térmica UT2 e a mesma subestação, por apresentarem uma extensão menor que 80 km, foram representadas por parâmetros concentrados [18], sendo o efeito capacitivo da linha desprezado.

O elemento da biblioteca do ATP utilizado para representar essas duas linhas foi o *type 51, 52, 53*. Esse elemento é representado pelo componente LINESY\_3, Figura 5.4, no editor gráfico, ele pode ser encontrado no mesmo local do componente LINEZT\_3.



**Figura 5.4 – Componente LINESY\_3**

Os dados de entrada desse componente são os mesmo do anterior, com exceção da susceptância capacitiva de sequência positiva e zero. No campo onde deve ser inserido o comprimento da linha, deve ser posto o valor um, já que agora os valores da resistência e da reatância indutiva não são mais fornecidos em unidade de comprimento.

### 5.3.2. Transformadores

A modelagem dos transformadores para estudos de baixa frequência, como o presente caso, deve considerar não apenas a configuração eletromagnética do núcleo, mas também as características de saturação e as perdas no ferro, conforme recomendam o CIGRÉ [16] e Mork [18]. Devido à falta de dados a respeito dos transformadores, só foi possível modelar os mesmos como unidades monofásicas independentes.

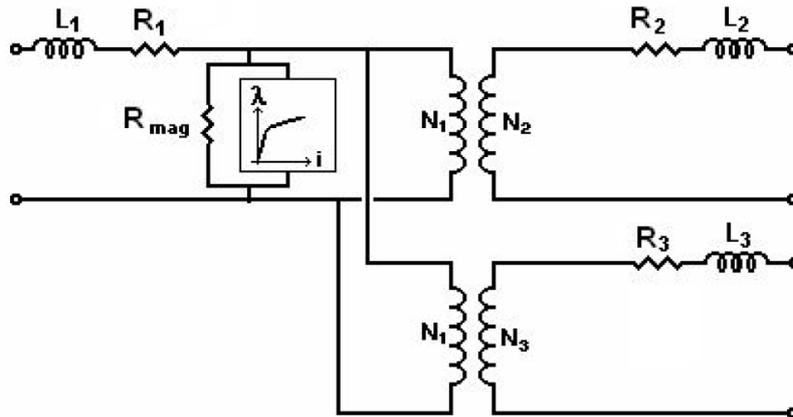


Figura 5.5 – Modelo do Transformador

Assim, o elemento escolhido na biblioteca do EMTP-ATP para representar os transformadores foi o *Saturable Transformer Component*. O componente no editor gráfico com tais características é o SATTRAFO, Figura 5.6, disponível no menu *Transformers*.

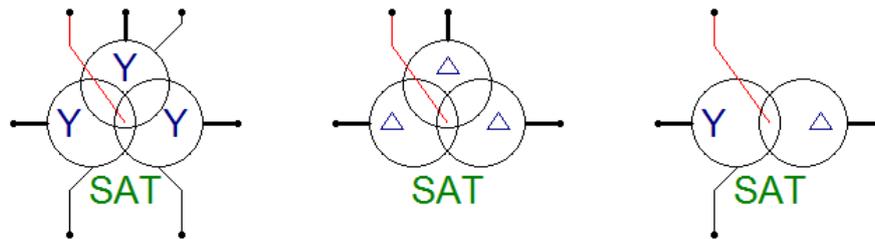


Figura 5.6 – Componente SATTRAFO

Os dados de entrada necessários do componente SATTRAFO são:

- Resistência e reatância de dispersão do primário, do secundário e do terciário em  $\Omega$ ;
- Número de espiras dos enrolamentos primário, secundário e terciário.

### 5.3.3. Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas das usinas térmicas UT1 e UT2, bem como o compensador síncrono presente na SE6, foram modelados conforme Figura 5.7, para o presente tipo de estudo, conforme indica o CIGRÉ [16]. O modelo é composto por uma fonte de tensão alternada trifásica equilibrada e pela reatância subtransitória de eixo direto da máquina síncrona.

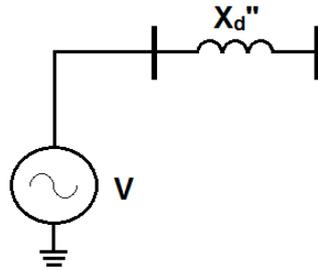


Figura 5.7 – Modelo da máquina síncrona

Os elementos *type 14* e *type 0*, presentes na biblioteca do EMTP-ATP, foram utilizados para modelar a fonte de tensão e a reatância subtransitória, respectivamente. No editor gráfico, esses elementos podem ser representados pelos componentes ACSOURCE (fonte de tensão) e RLC3 (reatância subtransitória), encontrados no menu *Sources* e *Branch Linear*, respectivamente.

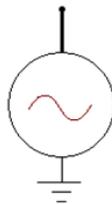


Figura 5.8 – Componente ACSOURCE

Os dados de entrada necessários para o componente ACSOURCE são:

- Tensão em V, podendo ser o valor de pico, ou o valor eficaz, ou o valor de pico a pico;
- Frequência em Hz;
- Defasagem angular entre as tensões em graus.

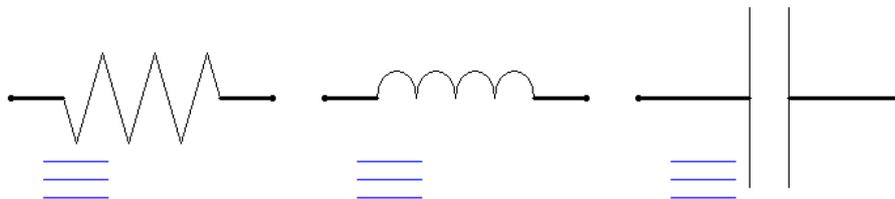


Figura 5.9 – Componente RLC3

Já para o componente RLC3, os dados de entrada são:

- Resistência em cada fase em  $\Omega$ ;
- Reatância indutiva em cada fase em  $\Omega$ ;
- Reatância Capacitiva em cada fase em  $\Omega$ .

Como o modelo só apresenta a reatância subtransitória da máquina, os parâmetros da resistência e da reatância capacitiva devem ser nulos.

#### 5.3.4. Dispositivos Estáticos de Controle de Tensão

Os dispositivos estáticos, como capacitores e reatores em derivação, utilizados para o controle de tensão nas barras de algumas subestações do sistema em estudo, foram modelados de acordo com a Figura 5.10, constituídos basicamente por elementos indutivos ou capacitivos do tipo concentrado, conforme recomendam o CIGRÉ [16] e o IEEE [19,20]. Porém, para a modelagem completa de reatores trifásicos com estrutura magnética única, a recomendação é incluir as indutâncias mútuas entre as fases, como esses dados não puderam ser obtidos, o reator presente no barramento de 138 kV da subestação SE8 foi modelado sem levar em conta estas indutâncias.

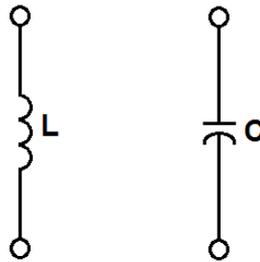


Figura 5.10 – Modelo dos dispositivos estático de controle de tensão

O elemento da biblioteca do EMTP-ATP utilizado então, foi o *type 0*, componente RLC3 no editor gráfico do programa, já descrito no tópico anterior. É importante destacar que as parcelas resistivas, tanto dos capacitores quanto a do reator, foram desconsideradas.

#### 5.3.5. Cargas

As cargas presentes no sistema não apresentam parcelas consideráveis de motores de indução e também não possuem características específicas que exijam uma modelagem a parte. Portanto o modelo utilizado se encontra presente na Figura 5.11, composto por um ramo resistivo e outro ramo indutivo ou capacitivo.

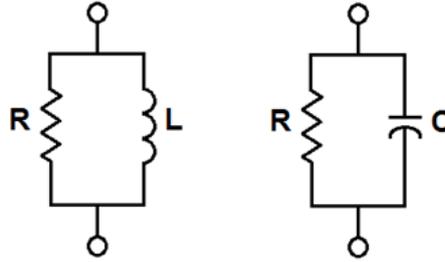


Figura 5.11 – Modelo da carga

Os elementos disponíveis na biblioteca do EMTP-ATP e utilizados para modelar a carga, bem como os dados necessários de entrada, já foram descritos anteriormente, trata-se do componente RLC3 (*type 0*).

### 5.3.6. Equivalentes externos

As fronteiras do sistema em estudo são definidas nas subestações SE1, SE5 e S10. Portanto as contribuições de outros sistemas serão representadas por equivalentes externos, como indica a Figura 5.1 pelas letras EQ1, EQ2 e EQ3. Tais contribuições serão representadas por uma fonte de tensão trifásica equilibrada do tipo senoidal em série com as impedâncias de curto-circuito mutuamente acopladas.

A fonte de tensão senoidal foi representada pelo elemento *type 14* e as impedâncias de curto-circuito pelo elemento *type 51, 52 e 53*, componentes ACSOURCE e LINESY\_3 no editor gráfico respectivamente, ambos já descritos nos tópicos anteriores.

### 5.3.7. Limitador de Corrente de Curto-Circuito

O modelo do LCC a base do reator com saturação natural adotado para o presente trabalho se encontra na Figura 5.12, trata-se do arranjo do tipo A1 descrito no capítulo anterior. Tal arranjo foi escolhido pela sua simplicidade e por apresentar resultados satisfatórios

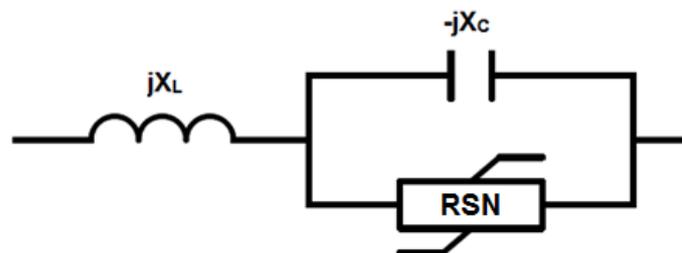


Figura 5.12 – Modelo do LCC com RSN tipo A

Os demais arranjos do tipo A, assim como os LCC baseados no RSN do tipo B, com exceção dos arranjos A3 e B2, são normalmente utilizados em locais onde se desejam a compensação série, logo estudos mais elaborados serão necessários para as suas implementações, o que está além do escopo deste trabalho. Já os arranjos A3 e B2 são considerados os mais caros e devem ser utilizados em locais onde as outras arquiteturas apresentarem desempenho insatisfatório, o que não é o caso.

O capacitor e o indutor do LCC serão modelados da mesma forma que os dispositivos estáticos de controle de tensão foram, ou seja, como elementos concentrados. A diferença agora é que as perdas ôhmicas e dielétricas desses dois elementos serão levadas em consideração, tal como mostra a Figura 5.13, pois irão influenciar de maneira significativa nos fenômenos em estudos, amortecendo eventuais oscilações. Caso os reatores sejam projetados de forma a apresentarem uma estrutura magnética única, o CIGRÉ [16] e o IEEE [19,20] recomendam levar em consideração as indutâncias mútuas entre os mesmos.



Figura 5.13 – Modelo do indutor e do capacitor do RSN

O elemento *type 0*, componente RLC3 no editor gráfico, já descrito anteriormente, foi o escolhido para representar a reatância indutiva e capacitiva do LCC. Os dados de entrada para tal componente também já foram descritos, a diferença aqui, é que os valores das resistências devem ser incluídos, como citado acima.

O valor da reatância indutiva deverá ser determinado de modo a reduzir a corrente de curto-circuito no ponto de aplicação para o valor desejado. Para isso é necessário o conhecimento do valor da reatância de curto-circuito neste ponto.

Para aplicações em casos reais, a impedância de curto-circuito deverá ser determinada pelos dados de potência de curto-circuito do local onde será instalado o LCC pela seguinte equação:

$$X_{cc} = \frac{(1,05 \cdot V_{ef})^2}{S_{CC}} \quad (5.1)$$

Como o sistema apresentado neste trabalho, embora baseado num sistema real, foi eleito com o intuito de mostra que os LCC's baseados no RSN reduzem de fato a corrente de curto-circuito, a reatância de curto foi calculada da seguinte maneira:

$$X_{CC} = \frac{1,05 \cdot V_{ef\,barra}}{I_{ef\,CC1\phi}} \quad (5.2)$$

A corrente de curto-circuito monofásico foi escolhida por apresentar os maiores valores, como será visto nos tópicos adiante. Também foi considerada uma tensão de 5% acima da nominal na barra da SE5, pois este é o máximo valor operativo admitido pelas regras operacionais vigentes na atualidade.

Já a reatância capacitiva do LCC, deverá ter o seu valor determinado da seguinte maneira:

- Se necessária a compensação série,  $X_C > X_L$ ;
- Caso contrário,  $X_C = X_L$ .

Para o caso em que  $X_C$  é igual a  $X_L$ , o capacitor e o indutor estarão em ressonância e como encontram-se em série, a reatância do LCC vista pelo sistema será nula, (5.5). Portanto, em condições normais de operação somente as perdas originadas pelas resistências estarão presentes.

$$j \cdot X_{LCCeq} = j \cdot \omega \cdot L + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \quad (5.3)$$

$$j \cdot X_{LCCeq} = j \cdot \omega \cdot L - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (5.4)$$

$$X_{LCCeq} = X_L - X_C \quad (5.5)$$

em que,  $X_L = \omega \cdot L$  e  $X_C = 1/\omega \cdot C$ .

Em condições normais de operação, a reatância exibida pelo RSN não deverá influenciar significativamente no valor da reatância capacitiva, como mostra (5.6).

$$X_{Ceq} = -\frac{X_{RSN} \cdot X_C}{X_{RSN} - X_C} \quad (5.6)$$

como abaixo da tensão de saturação  $X_{RSN} \gg X_C$ , então:

$$X_{C_{eq}} \cong -\frac{X_{RSN} \cdot X_C}{X_{RSN}} = -X_C \quad (5.7)$$

logo a equação 4.1 continua válida, caso contrário:

$$X_{LCC_{eq}} = X_L - X_{C_{eq}} \quad (5.8)$$

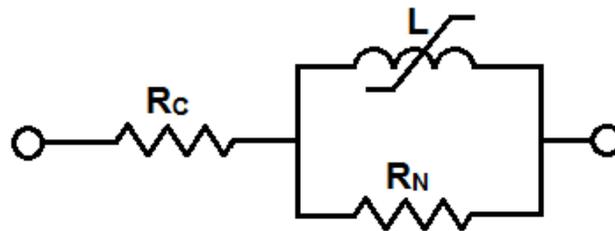
A Tabela 5.1 apresenta os valores de resistência e reatância do indutor e capacitor utilizados:

**Tabela 5.1 – Parâmetros do indutor e do capacitor do LCC com RSN tipo A**

INDUTOR LINEAR		CAPACITOR	
Resistência ( $\Omega$ )	Reatância ( $\Omega$ )	Resistência ( $\Omega$ )	Suceptância ( $\mu\Omega^{-1}$ )
0,004	0,6544	0,001	1528000

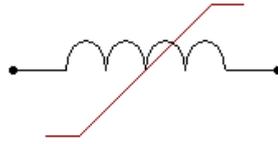
A representação do modelo do RSN é apresentada na Figura 5.14, onde o mesmo é composto pelos seguintes componentes:

- Um indutor não-linear L para reproduzir a curva de magnetização do núcleo;
- Um resistor linear  $R_N$  para representar as perdas no núcleo;
- Um resistor linear  $R_c$  simulando as perdas no cobre do enrolamento do RSN.



**Figura 5.14 – Modelo do RSN tipo A**

O elemento encontrado na biblioteca do EMTP-APT para representar os resistores é o mesmo componente utilizado em vários modelos já descritos, o RLC3 (*type 0*). Para o indutor não-linear foi utilizado o elemento *type 98*, no editor gráfico este elemento corresponde ao componente NLININD, encontrado no menu *Branch Nonlinear*.



**Figura 5.15 – Componente NLININD**

Diferentemente dos outros componentes utilizados, onde bastava apenas preencher os parâmetros da aba principal, os dados de entrada do componente NLININD, para o presente tipo de estudo, são as características *fluxo de enlace versus corrente* que devem ser colocadas na aba *Characteristic* do componente citado.

As características do RSN modelado se encontram presentes na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Parâmetros de especificação do RSN tipo A**

RSN TIPO A		
	Especificação	Modelo
Tensão de Início de saturação (V)	>483	500
Corrente no início da saturação (A)	~54	60
Inclinação da região saturada	<0,4527	10%

Com os dados da Tabela 5.2 é possível levantar as características *fluxo de enlace versus corrente* pela relação direta entre *tensão versus corrente*, especificada para o RSN. Para tal basta recorrer a Lei de Faraday:

$$v(t) = - \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (5.9)$$

assim, ao aplicar no indutor uma tensão senoidal do tipo:

$$v(t) = V_M \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (5.10)$$

o fluxo nele gerado será:

$$d\lambda(t) = -V_M \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \cdot dt \quad (5.11)$$

integrando ambos os lados:

$$\lambda(t) = \frac{V_M}{\omega} \cdot \text{cos}(\omega \cdot t) + C \quad (5.12)$$

desprezando a constante C, temos:

$$\lambda(t) = \lambda_M \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (5.13)$$

em que

$$\lambda_M = \frac{V_M}{\omega} \quad (5.14)$$

ou seja, um fluxo também senoidal é obtido.

Como a tensão de operação do RSN é expressa em valor eficaz, assim como a corrente, então:

$$\lambda_M = \sqrt{2} \cdot \frac{V_{ef}}{\omega} \quad (5.15)$$

$$I_M = \sqrt{2} \cdot I_{ef} \quad (5.16)$$

A seguir, temos a Tabela 5.3 com as características *tensão versus corrente* e *fluxo de enlace versus corrente*, obtida a partir dos dados da Tabela 5.2 e das equações.

**Tabela 5.3 – Características do RSN tipo A**

RSN Tipo A			
Tensão (V)	Corrente (A)	Fluxo de enlace (Wb)	Corrente de Pico (A)
0	0	0	0
500	60	1,8757	84,8528
550	10000	2,0632	14142,14

É possível observa na Tabela 5.3 que um aumento em 10% da tensão de saturação do RSN demandará uma corrente de 10 kA pelo mesmo.

Agora resta apenas determinar os valores das resistências de perdas no núcleo e das perdas no cobre do RSN. Essas resistências foram estimadas a partir de resultados experimentais realizados pelo LDSP. Tais experimentos apontam uma perda no ferro inferior a 1% da potência nominal do mesmo, e nas especificações do LCC temos que:

$$Q_A = 26 \text{ kVA} \rightarrow V_S = 500 \text{ V}$$

logo as perdas no ferro serão no máximo de:

$$P_f = 260 \text{ VA}$$

o valor da resistência de perdas no núcleo é determinado então por (5.17).

$$R_N = \frac{(V_S)^2}{P_f} = \frac{500^2}{260} = 962 \, \Omega \quad (5.17)$$

A resistência que representa as perdas no cobre do RSN foi determinada considerando o fator de qualidade adotado pelo LDSP, que é:

$$\frac{X}{R} = 112,9 \quad (5.18)$$

na região não saturada, a reatância do RSN será:

$$X_{NS} = \frac{V_S}{I_S} = \frac{500}{60} = 8,3333 \, \Omega \quad (5.19)$$

logo

$$R_C = \frac{X_{NS}}{112,9} = \frac{8,3333}{112,9} = 0,0738 \, \Omega \quad (5.20)$$

#### 5.4. Simulações e Análises dos Resultados

Nesta etapa serão exibidos os resultados obtidos através das simulações realizadas no programa EMTP-ATP.

Devido à natureza indutiva do sistema, em que  $X_L \gg R$ , todos os tipos de curtos-circuitos simulados foram aplicados no momento em que a tensão da fase A passava por zero, Figura 5.16, justamente para simular a condição de maior assimetria na corrente de curto-circuito.

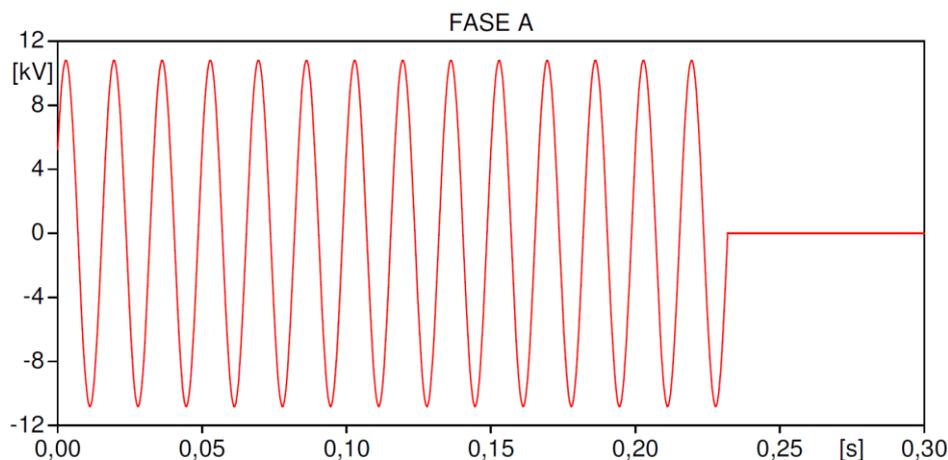


Figura 5.16 – Instante de aplicação do curto-circuito

O instante da aplicação de todos os curto-circuito foi, portanto:

$$t = 0,2322 \text{ s}$$

#### 5.4.1. Regime Permanente

Antes de realizar as simulações envolvendo os curtos-circuitos, as condições de operação normal do sistema foram analisadas através de simulações, com o intuito de observar se o LCC produziria alguma interferência nesta situação. A figura 5.17 mostra a tensão sobre a carga conectada ao barramento de 13,8 kV com e sem o uso do LCC.

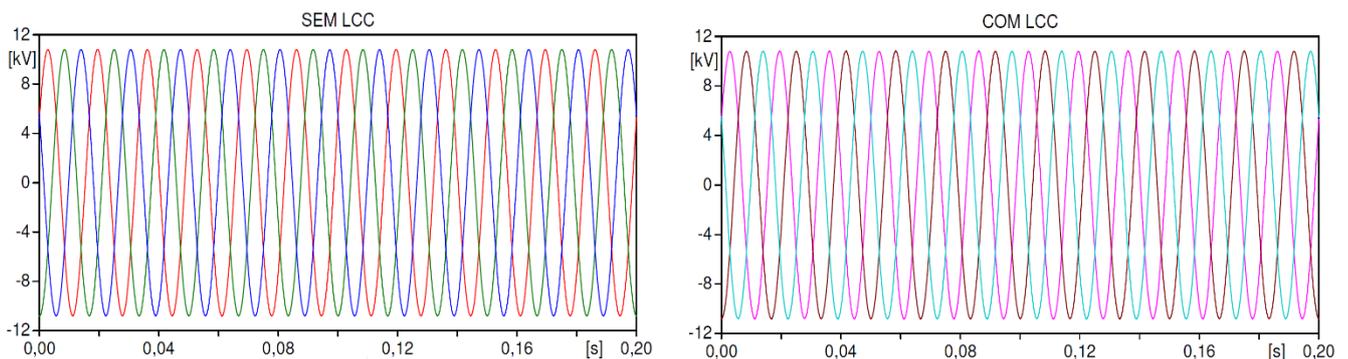


Figura 5.17 – Tensão aplicada a carga com e sem o LCC

Como se observa, a tensão aplicada a carga não se modifica, o que assegura que o LCC do tipo A não produz qualquer impacto na operação normal do sistema.

#### 5.4.2. Curto-Circuito Trifásico

Inicialmente foi aplicado um curto-circuito trifásico franco na barra de 13,8 kV da subestação SE5 sem a utilização do LCC e, logo em seguida, com a utilização do mesmo. Ambos os curtos-circuitos foram aplicados no mesmo instante de tempo. A Figura 5.18 exibe os resultados da simulação.

Uma análise mais apurada desta figura mostra uma redução considerável da corrente de curto-circuito, comprovando a eficiência do LCC.

A Tabela 5.4 exibe os valores de pico das correntes alcançados em instantes significativos de tempo.

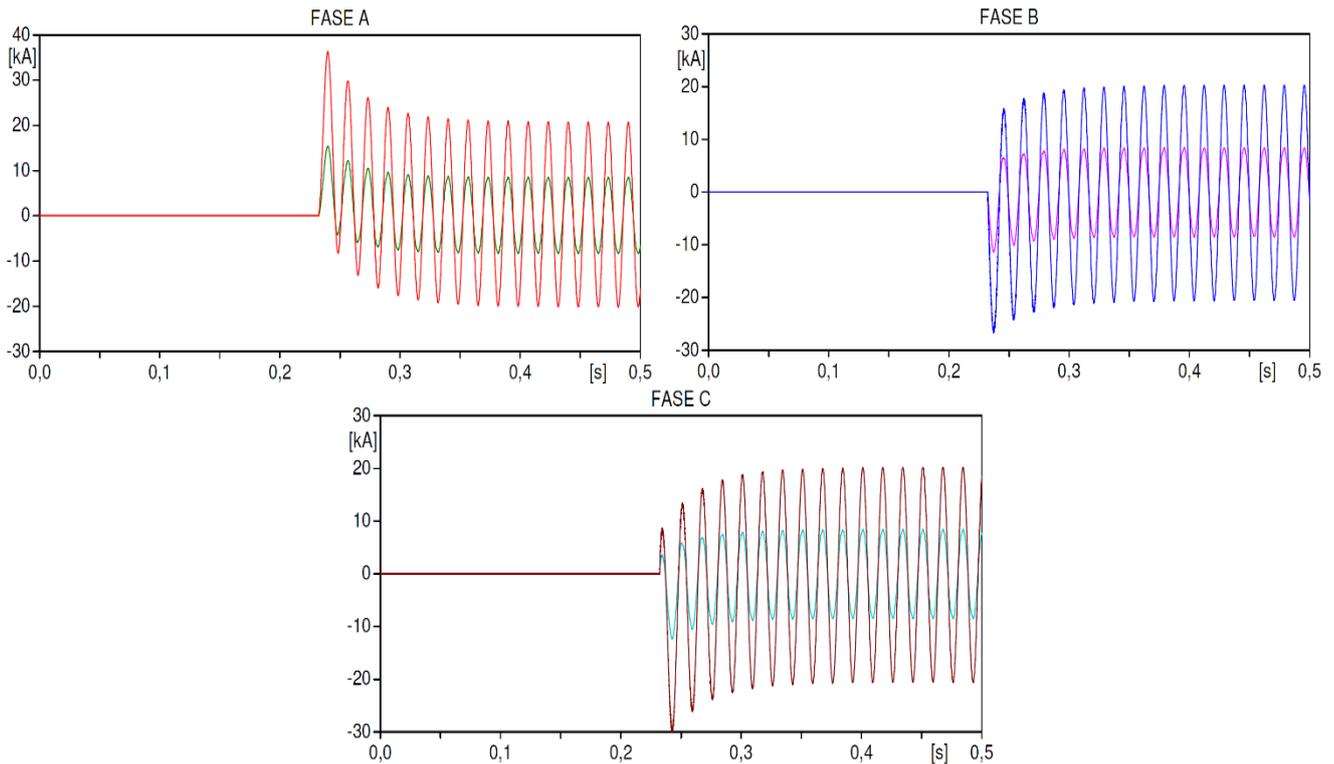
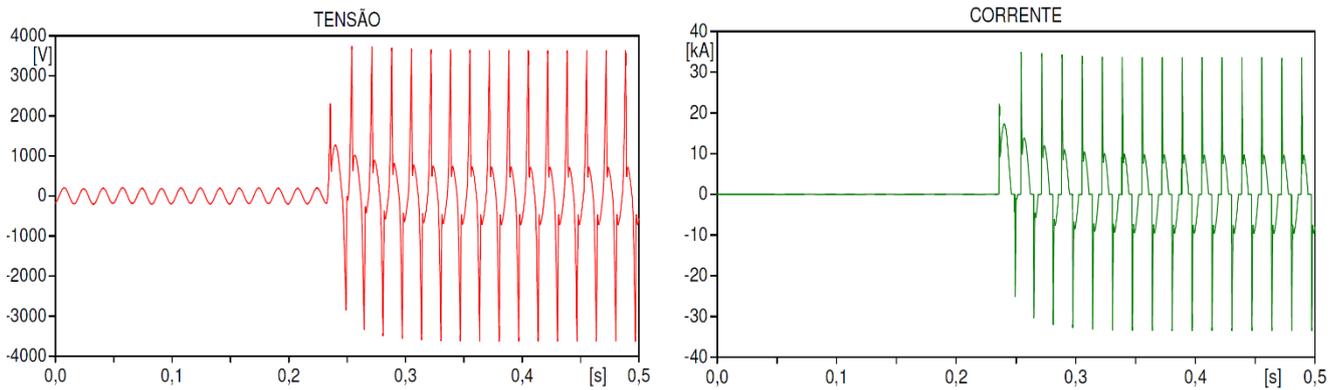


Figura 5.18 – Corrente de curto-circuito trifásico franco nas fases A, B e C com e sem o LCC.

Tabela 5.4 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito trifásico franco

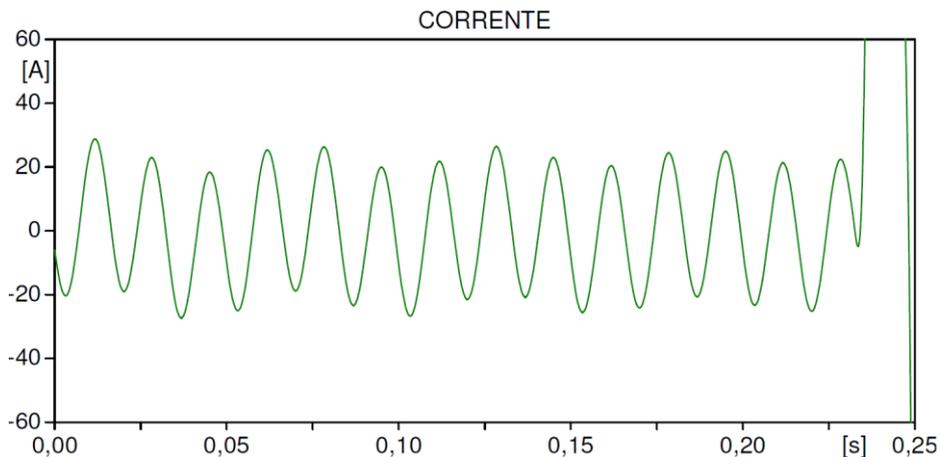
CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO FRANCO									
Fase	Primeiro Pico			Após 2 ciclos			Estado Permanente		
	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)
	Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC	
A	36297	15395	42,41	26128	10498	40,18	20539	8472,8	41,25
B	-26609	-11341	42,62	-22719	-9289	40,89	-20449	-8432,6	41,24
C	-29944	-12350	41,24	-23817	-9593,2	40,28	-20472	-8442,3	41,24

Em sequência, a Figura 5.19 mostra o comportamento da corrente no RSN do tipo A, antes e durante o curto-circuito, nela é possível observar que o RSN atua de fato como uma chave aberta quando a tensão nos seus terminais é inferior a tensão de saturação e como uma chave fechada quando esta tensão é superada.



**Figura 5.19 – Tensão e corrente sobre o RSN, antes e durante o curto-circuito**

Embora não seja perceptível na figura anterior, uma pequena corrente circula pelo RSN quando o mesmo opera como uma chave aberta, esse detalhe pode ser observado na Figura 5.20.



**Figura 5.20 – Corrente que circula pelo RSN quando a tensão de saturação não é superada**

### 5.4.3. Curto Circuito Bifásico

Em seguida foi aplicado um curto-circuito bifásico franco entre as fases A e B sem toque a terra, seguindo os mesmos critérios adotados na simulação anterior, com e sem a utilização do LCC na barra de 13,8 kV da subestação SE4. Os resultados das simulações estão registrados na figura 5.22. Como a corrente na fase B era a mesma da fase A, porém com o sentido inverso, fato justificável para o tipo de curto-circuito aplicado, somente o gráfico da corrente na fase A é apresentado nesta figura.

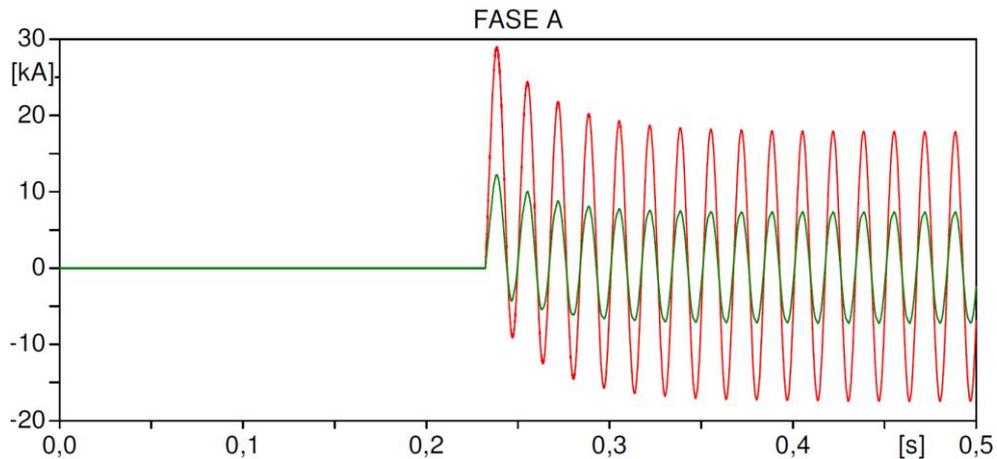


Figura 5.21 – Corrente de curto-circuito bifásico franco

Novamente observasse uma redução considerável da corrente de curto-circuito.

A Tabela 5.5 mostra os valores de pico de corrente registrados em instantes específicos de tempo.

Tabela 5.5 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito bifásico franco sem terra

CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO FRANCO SEM TERRA									
Fase	Primeiro Pico			Após 2 ciclos			Estado Permanente		
	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)
	Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC	
A	28972	12209	42,14	21759	8778,9	40,35	17763	7307	41,14

Os resultados das simulações do curto-circuito bifásicos entre as fases A e B agora para a terra são apresentados na Figura 5.22, tanto para o caso sem o LCC, como na presença do limitador.

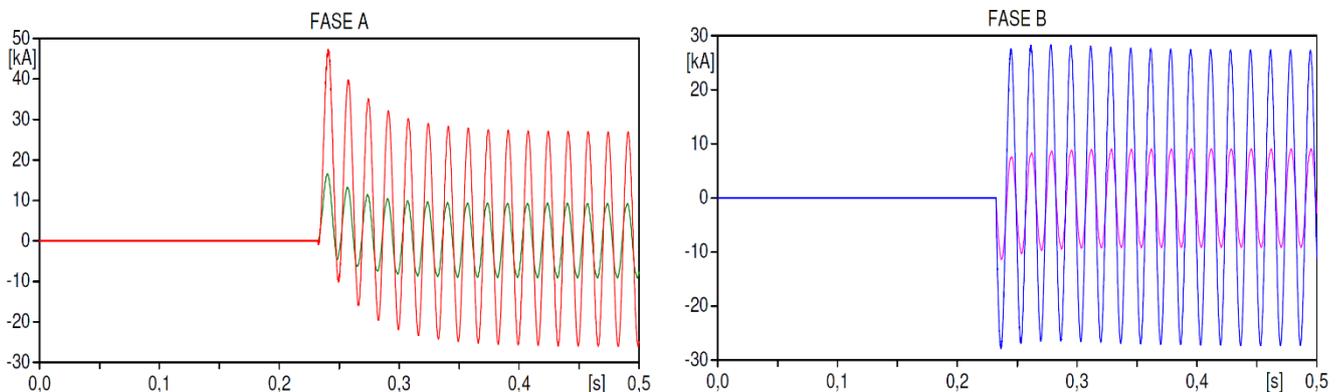


Figura 5.22 – Tensão sobre os terminais do LCC

Tal como os outros resultados, foi constatada uma redução significativa da corrente de curto-circuito. A corrente total deste tipo de curto circula pela terra e é obtida pela soma das correntes nas fases A e B. Como os disjuntores da subestação em análise interrompem as correntes que circulam nas fases, apresentou-se, na figura acima, o gráfico das correntes que circulam pelas fases citadas.

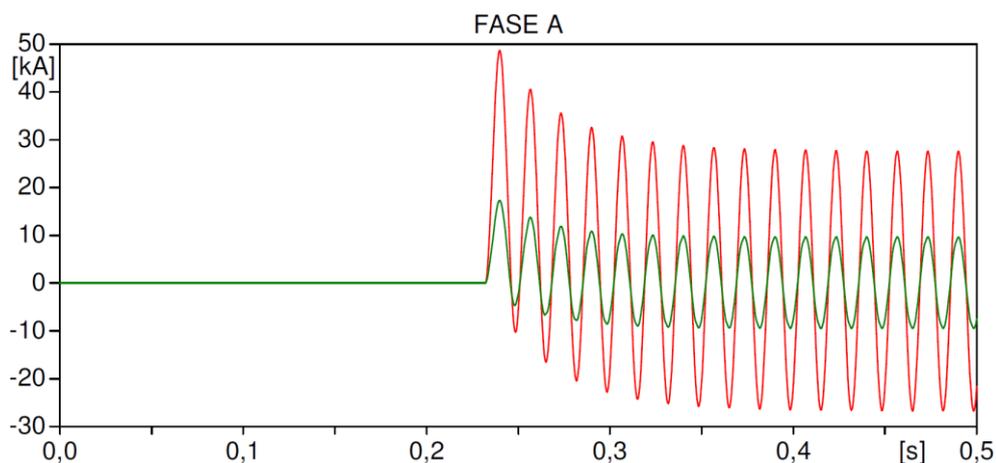
A Tabela 5.6 mostra os valores de pico de corrente registrados no curto-circuito bifásico para terra em instantes específicos de tempo.

**Tabela 5.6 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito bifásico franco para terra**

CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO FRANCO PARA TERRA									
Fase	Primeiro Pico			Após 2 ciclos			Estado Permanente		
	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)
	Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC	
A	47258	16559	35,04	34978	11374	32,52	26636	9204,7	34,56
B	-27774	-11338	40,82	-26434	-9738,7	36,84	-27301	-9127,2	33,43

#### 5.4.4. Curto-Circuito Monofásico

O curto-circuito monofásico franco foi aplicado a fase A do sistema e apresentou os maiores valores de corrente, como já era esperado. A Figura 5.23 apresenta os resultados das simulações deste tipo de curto-circuito sem o uso do LCC e com a aplicação do mesmo.



**Figura 5.23 – Tensão sobre os terminais do LCC**

Como esperado, uma redução significativa da corrente de curto-circuito é observada.

A Tabela 5.7 mostra os valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito monofásico em instantes específicos de tempo.

**Tabela 5.7 – Valores de pico de corrente registrados para o curto-circuito monofásico franco**

CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO FRANCO									
Fase	Primeiro Pico			Após 2 ciclos			Estado Permanente		
	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)	Magnitude (A)		Redução (%)
	Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC		Sem LCC	Com LCC	
A	48650	17281	35,52	35569	11874	33,38	27337	9620	35,19

#### 5.4.5. Análise Final dos Resultados

Através dos dados apresentados nas Tabelas 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 constata-se que a presença do LCC propiciou os seguintes resultados:

- Uma redução média de 39,97% do primeiro pico de corrente de curto-circuito;
- Uma redução média de 37,78% do pico de corrente de curto-circuito após 2 ciclos da mesma;
- Uma redução média de 38,29% do pico de corrente de curto-circuito em estado permanente.

Como a reatância indutiva  $X_L$  foi dimensionada para ser 1,5 vezes maior que a reatância de curto-circuito calculada, uma redução de 40% da corrente de curto-circuito era esperada. Portanto, os resultados ratificaram esta estimativa, atestando a validade dos métodos do projeto do LCC.

Também foi constatado que o RSN conduz uma corrente mínima quando uma tensão abaixo da saturação é aplicada sobre o mesmo e que, quando a tensão de saturação é superada, o RSN passa a conduzir a corrente curto-circuito. Esse comportamento comprova a expectativa de que o RSN funciona, ora como uma chave aberta, ora como uma chave fechada. Esta a razão para não se observar qualquer impacto no sistema em condições normais de operação, pois as reatâncias do indutor linear e do banco de capacitores se anulam, e, por outro lado, verificar-se uma forte atuação do LCC nos curtos-circuitos, quando os capacitores são retirados pela ação do RSN.

Conclui-se do exposto que o LCC com base no RSN atendeu as características requeridas no que tange aos seguintes aspectos citados no capítulo 4:

- Baixa impedância em condições normais de operação do sistema;
- Rápido tempo de atuação (o primeiro pico de corrente de curto-circuito é limitado).

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. Conclusões gerais

As simulações envolvendo o LCC a base do RSN apresentou resultados considerados satisfatórios, de sorte que tal dispositivo poderá ser usado sem restrições para reduzir as correntes de curtos-circuitos em sistemas elétricos de potência.

Ainda que os resultados tenham sido obtidos de simulações computacionais, todos os dados da rede elétrica aqui utilizados foram obtidos de um sistema real e adaptados para o objetivo deste trabalho. No tocante ao RSN, os parâmetros usados foram de um protótipo desenvolvido pelo LDSP, reforçando a garantia dos resultados apresentados. Como o EMTP-ATP é um programa aceito em todo mundo como uma ferramenta adequada para avaliação dos sistemas elétricos, consideramos que os resultados obtidos são válidos e deverão se reproduzir nas aplicações práticas.

Um fato importante comentado por [7] é o fato das empresas brasileiras dominarem o processo construtivo de todos os elementos que compõem este LCC, tornando sua fabricação em território nacional viável, além da redução de custo ocasionados por consultorias e royalties pagos a empresas estrangeiras pelo uso de tecnologia de outros países.

### 6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de aprimorar o trabalho desenvolvido, alguns tópicos são sugeridos para serem abordados em trabalhos futuros:

- Realizar simulações envolvendo os outros tipos de arranjos do LCC com RSN e comparar os resultados;
- Estudar os fenômenos transitórios ocasionados pela energização do LCC, assim como seu comportamento após a abertura dos disjuntores;
- Investigar a presença de harmônicos no sistema devido a utilização do LCC com RSN e suas consequências nos componentes da rede elétrica.



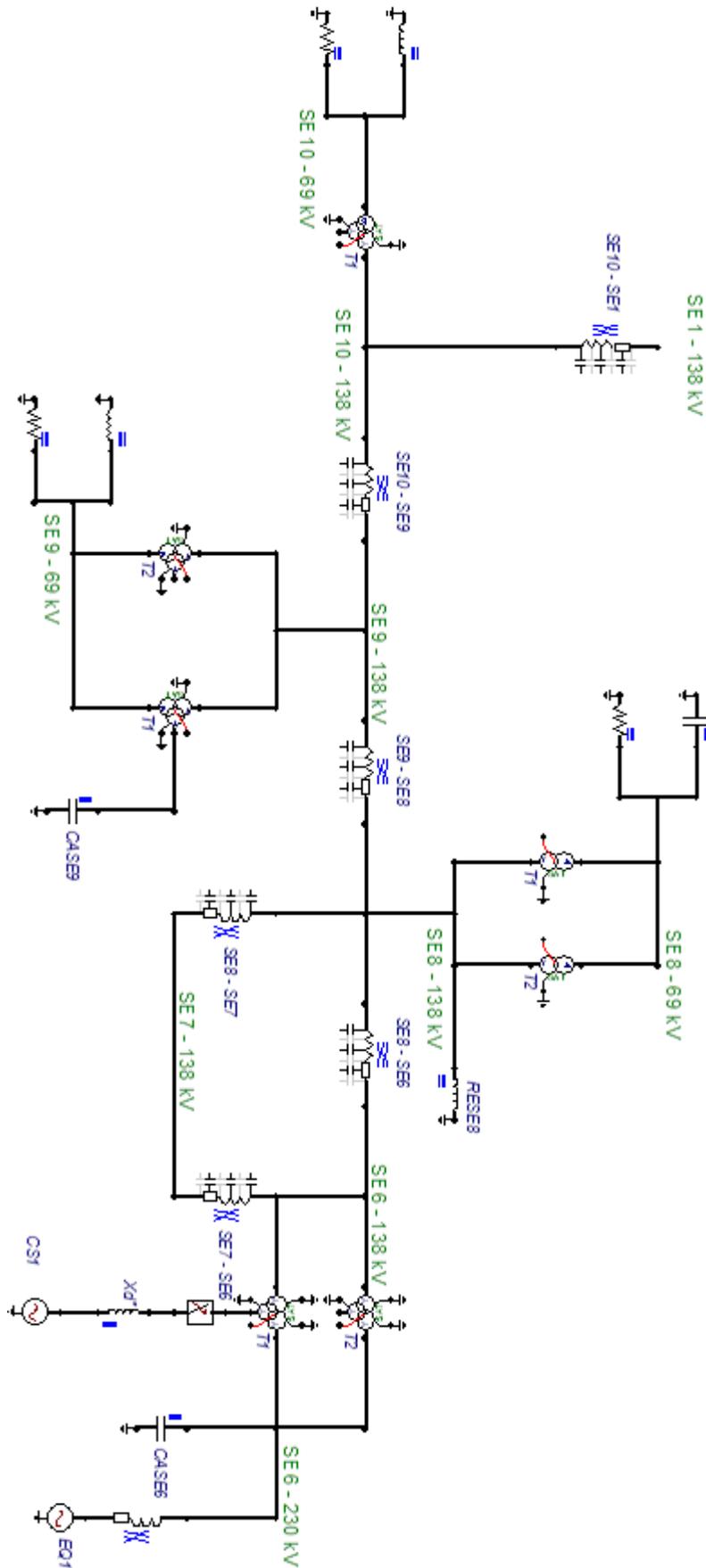


Figura 7.2 – Modelagem do sistema – parte 2

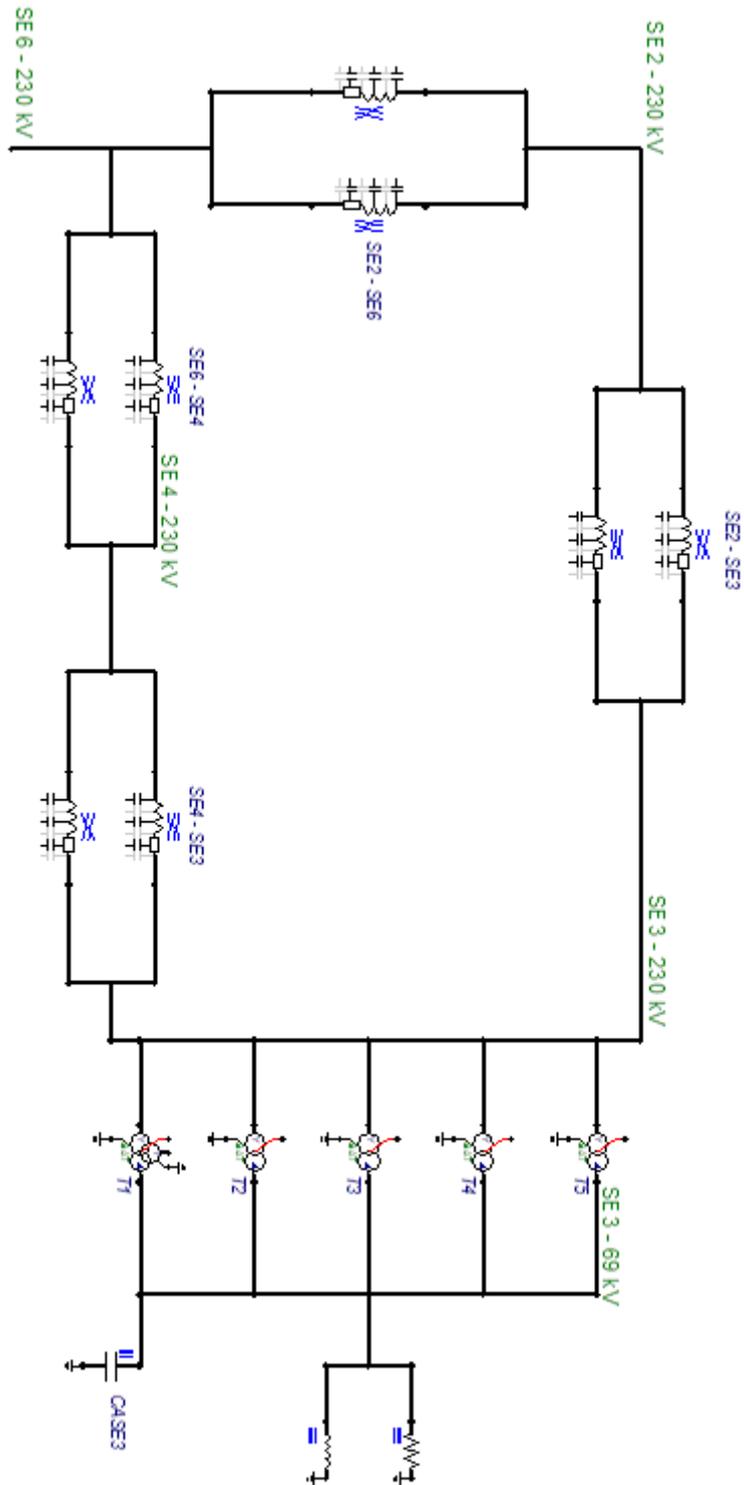


Figura 7.3 – Modelagem do sistema – parte 3

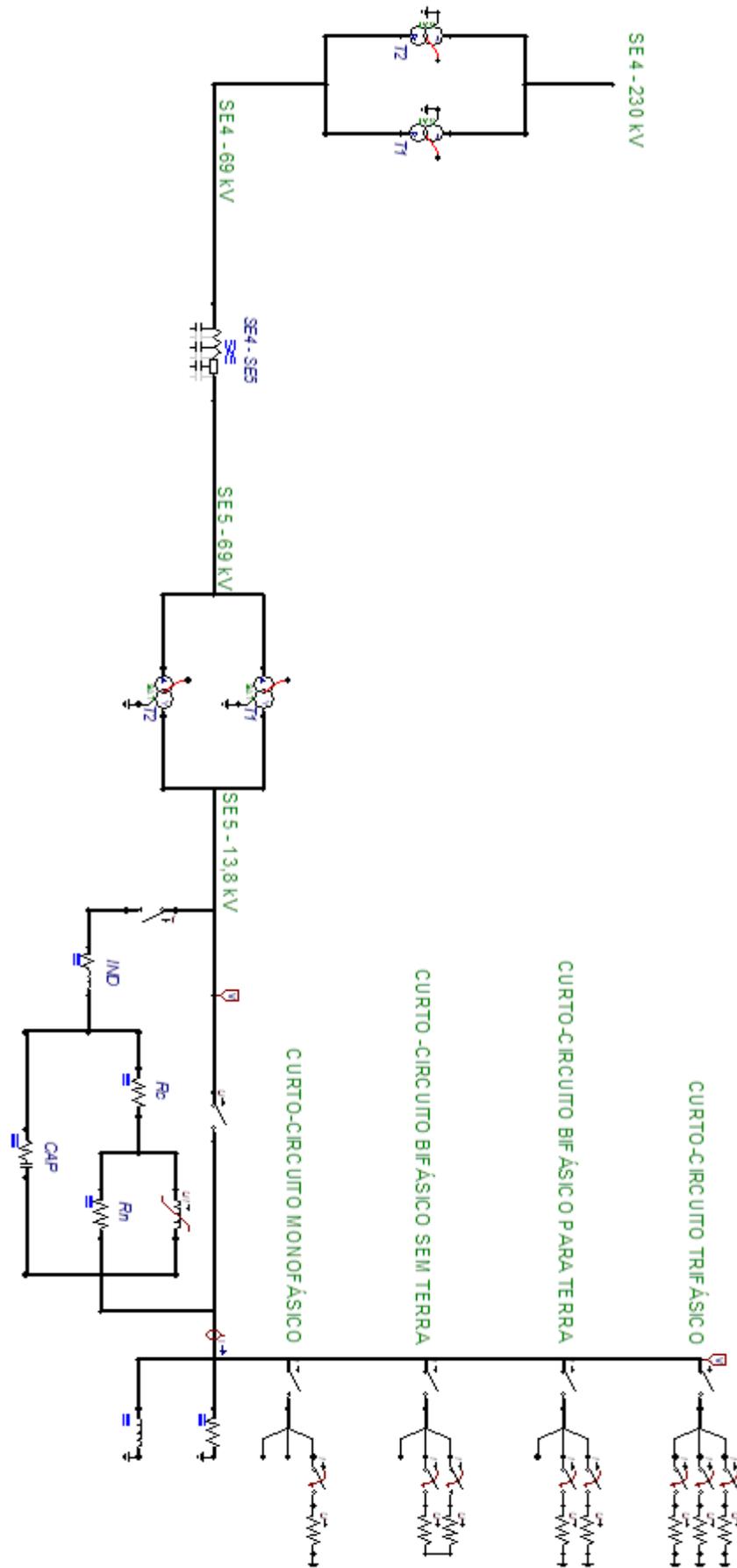


Figura 7.4 – Modelagem do sistema – parte 4

## 8. ANEXOS

Anexo 1 – Tabelas com os parâmetros dos componentes modelados nas simulações

Tabela 8.1 – Parâmetros das linhas de transmissão modeladas pelo componente LINEZT\_3

LINHA DE TRANSMISSÃO			IMPEDÂNCIAS					
TENSÃO (kV)	PERCURSO	EXTENSÃO (km)	SEQUÊNCIA ZERO			SEQUÊNCIA POSITIVA		
			R <sub>0</sub> (Ω/km)	X <sub>0</sub> (Ω/km)	B <sub>0</sub> (μΩ <sup>-1</sup> /km)	R <sub>1</sub> (Ω/km)	X <sub>1</sub> (Ω/km)	B <sub>1</sub> (μΩ <sup>-1</sup> /km)
230	SE4 - SE6	175,1000	0,2390	1,1940	2,7520	0,0490	0,3540	4,6830
230	SE4 - SE6	175,1000	0,2360	1,1700	2,7460	0,0490	0,3540	4,6840
230	SE3 - SE4	13,0000	0,2385	1,1939	2,7520	0,0489	0,3540	4,6830
230	SE3 - SE4	13,0000	0,2385	1,1939	2,7520	0,0490	0,3535	4,6840
230	SE2 - SE6	117,5000	0,4830	1,6130	2,1230	0,0980	0,4980	3,3260
230	SE2 - SE6	117,5000	0,4830	1,6130	2,1420	0,0980	0,4980	3,3260
230	SE2 - SE3	97,0000	0,4830	1,6130	2,1230	0,0980	0,4980	3,3260
230	SE2 - SE3	97,0000	0,4830	1,6130	2,1420	0,0980	0,4980	3,3260
230	SE1 - SE2	135,0000	0,4970	1,6040	2,1700	0,0980	0,5030	3,3120
230	SE1 - SE2	135,0000	0,4920	1,5990	2,1260	0,0980	0,5010	3,2960
230	SE1 - SE11	71,3000	0,4480	1,6550	2,1500	0,0980	0,5170	3,1970
230	SE1 - UT2	85,0000	0,2800	2,0000	1,8850	0,1010	0,5090	3,3930
138	SE6 - SE8	117,5000	0,4270	1,7940	2,0990	0,1680	0,4800	3,4490
138	SE6 - SE7	73,0000	0,4210	1,7990	2,0940	0,1680	0,4800	3,4490
138	SE7 - SE8	110,3000	0,4210	1,7990	2,0940	0,1680	0,4800	3,4490
138	SE8 - SE9	55,0000	0,3310	1,8710	2,0410	0,1550	0,5040	3,2810
138	SE9 - SE10	38,5000	0,3310	1,8710	2,0410	0,1550	0,5040	3,2810
138	SE1 - SE10	49,5000	0,3310	1,8710	1,9860	0,1550	0,5040	3,2770
69	SE4 - SE5	13,0000	0,2385	1,1939	2,7520	0,0490	0,3535	4,6840

Tabela 8.2 – Parâmetros das linhas de transmissão modeladas pelo componente LINESY\_3

LINHA DE TRANSMISSÃO		IMPEDÂNCIAS			
TENSÃO (kV)	PERCURSO	SEQUÊNCIA ZERO		SEQUÊNCIA POSITIVA	
		R <sub>0</sub> (Ω/km)	X <sub>0</sub> (Ω/km)	R <sub>1</sub> (Ω/km)	X <sub>1</sub> (Ω/km)
230	UT1 – SE1	55,0160	27,1377	0,7935	57,1320
230	UT1 – SE1	55,0160	27,1377	0,7935	57,1320
138	SE1 – SE11	34,0050	130,5090	15,1250	37,7909
138	SE1 – SE11	33,3860	128,4520	15,1250	37,2063

Tabela 8.3 – Parâmetros dos transformadores

TRANSFORMADORES		ENROLAMENTOS								
		PRIMÁRIO			SECUNDÁRIO			TERCIÁRIO		
SUBESTAÇÃO	CÓDIGO	R <sub>1</sub> (Ω)	X <sub>1</sub> (Ω)	N <sub>1</sub>	R <sub>2</sub> (Ω)	X <sub>2</sub> (Ω)	N <sub>2</sub>	R <sub>3</sub> (Ω)	X <sub>3</sub> (Ω)	N <sub>3</sub>
SE6	T1	2,4180	87,1100	132,79	0,6710	24,1900	79,67	0,0045	0,1644	7,97
	T2									
SE4	T1	0,8000	34,3900	139,43	0,2160	9,2800	69			
	T2									
SE3	T1	1,7090	73,4300	139,43	0,0330	-1,4000	69	0,0034	0,1474	7,97
	T2	0,7870	33,8000	139,43	0,2124	9,1270	69			
	T3	0,0100	34,4400	139,43	0,2164	9,2980	69			
	T4	0,7720	33,1700	139,43	0,2084	8,9550	69			
	T5									
SE9	T1	2,6580	84,5900	79,67	0,3540	11,2550	69	0,0001	0,0042	7,97
	T2	2,0130	64,0800	79,67	0,8640	27,4900	69	0,0006	-0,0181	7,97
SE8	T1	0,6850	23,0400	79,67	0,5140	17,2800	69			
	T2	1,5520	27,7000	79,67	1,1640	20,7700	69			
SE10	T1	13,9500	314,2000	79,67	5,8110	130,9200	69	0,0775	1,7456	7,97
SE1	T1	0,6860	24,7300	139,43	0,2470	8,9030	79,67			
	T2	0,5760	24,7300	139,43	0,2072	8,9031	79,67			
	T3	6,3050	201,7600	139,43	0,0360	-1,1430	69	0,0095	0,3024	7,97
	T4									
	T5	1,9850	69,2500	139,43	0,5360	18,7000	69			
SE5	T1	0,2160	9,2800	69	0,0034	0,1474	7,97			
	T2									
UT1	T1	11,3100	139,13	0,1221	13,8					
UT2	T1	17,1900	132,79	1,1605	34,5					

Tabela 8.4 – Parâmetros dos dispositivos estáticos de controle de tensão

SUBESTAÇÃO	DISPOSITIVO	TENSÃO (kV)	IMPADÂNCIA (Ω)
SE6	Capacitor	230,00	954,63
SE8	Reator	138,00	1904,40
SE3	Capacitor	69,00	8948,00
SE1	Capacitor	13,80	24680,00
SE9	Capacitor	13,80	56711,00

**Tabela 8.5 – Parâmetros das máquinas síncronas**

TIPO	LOCALIZAÇÃO	TENSÃO (V)	REATÂNCIA ( $\Omega$ )
Compensador Síncrono	SE6	21167.653	1,6187
Máquina Síncrona	UT2	25169,132	0,5315
Máquina Síncrona	UT1	11096,938	0,1946

**Tabela 8.6 – Parâmetros das cargas**

SUBESTAÇÃO	TENSÃO (kV)	RESISTÊNCIA ( $\Omega$ )	REATÂNCIA INDUTIVA ( $\Omega$ )	REATÂNCIA CAPACITIVA ( $\Omega$ )
SE3	69,0	16,1440	72,36	X
SE5	13,8	40,6280	179,66	X
SE8	69,0	217,3900	X	693,13
SE9	69,0	178,3200	1763,30	X
SE10	69,0	853,2600	5290,00	X
SE1	69,0	105,5700	X	126,02

**Tabela 8.7 – Parâmetros dos equivalentes externos**

LOCAL	TENSÃO (V)	IMPEDÂNCIAS			
		SEQUÊNCIA ZERO		SEQUÊNCIA POSITIVA	
		$R_0$ ( $\Omega$ )	$X_0$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$X_1$ ( $\Omega$ )
EQ1	121167,653	0,5196	16,8940	2,0166	15,7801
EQ3	162794,210	0,5572	16,3770	10,0110	59,6606
EQ2	112676,528	19044	19044	0,0001	118,4175

## Anexo 2 – Versões dos programas computacionais utilizados

A seguir são apresentadas as versões utilizadas do EMTP-ATP e do seu editor gráfico.

- (não foi possível identificar a versão do compilador)
- *ATPDraw* versão 5.7p6

As configurações realizadas nos *settings* do *ATPDraw* se encontram expostas na Figura 8.1

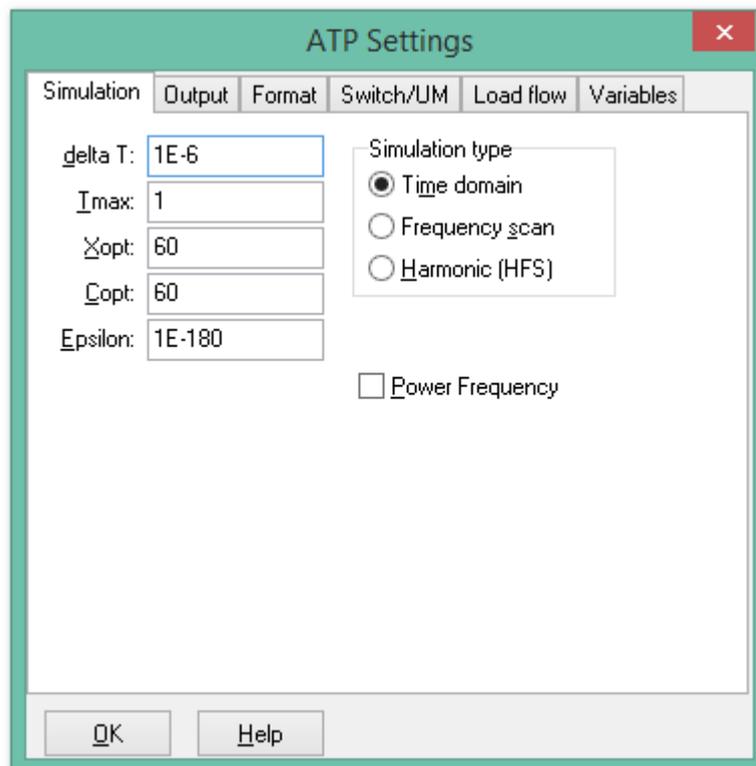


Figura 8.1 – Settings do *ATPDraw*

Cada parâmetro é explicado a seguir, de acordo com o HELP do programa:

- ***delta T***: Passo de integração da simulação em s;
- ***Tmax***: Instante de tempo em que a simulação deve ser encerrada;
- ***Xopt***: Os valores da Indutância serão em mH, se for colocado o valor zero, caso contrário, serão em  $\Omega$  com *Xopt* sendo a frequência de operação do sistema;
- ***Copt***: Os valores da Capacitância serão em mF, se for colocado o valor zero, caso contrário, serão em  $\mu\Omega^{-1}$  com *Copt* sendo a frequência de operação do sistema.

## REFERÊNCIAS

- [1] SINDER, D. Métodos de cálculos da tensão de restabelecimento transitória para a análise da superação dos disjuntores de alta tensão. Rio de Janeiro, 2007 .123P. (Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro)
- [2] HARTMANN, G. N. Understanding Asymmetry. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1A-21, nº.4, p. 842-848, July/August 1985.
- [3] REICHENSTEIN, H. W. Relationship of  $X/R$ ,  $I_p$ , and  $I_{rms}$  to Asymmetry in Resistance/Reactance Circuits. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1A-21, nº.2, p. 481-492, March/April 1985.
- [4] KERCHNER, R. M.; CORCORAN, G. F. *Alternating Current Circuits*. 3ª edition, Wiley, p. 557-560, 1951.
- [5] ONS. *Estudos de curto-circuito – Período 2008-2011 – Volume 1*. ONS, 2009.
- [6] MONTEIRO, A. M. Um estudo de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito com ênfase no IPC (Interphase Power Controller). Rio de Janeiro, 2005. 129p. (Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro)
- [7] FREITAS, F. E. F. Aplicação série de reatores naturalmente saturados em sistemas de potência. Recife 2010. 143p. (Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco)
- [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 nº IPST05-215, June 2005.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] SOUSA, W. T. B.; POLASEK, A.; DIAS, R.; ANDRADE JR., R. Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores: principais conceitos e testes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 4, 4313 (2012)
- [13] 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.
- [14] D'Ajuz, A. Limitação de Curto-Circuito em Sistemas de Potência. *IEEE/PES*. Brasil, p. 39-50, Jun 2006.
- [15] 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.
- [16] CIGRÉ, 1990, *Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients*, Working Group 02 (SC 33).
- [17] H. W. DOMMEL, 1969, Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 4, April, pp.388-399.
- [18] B. A. MORRIS, 2001, Parameters for Modeling Transmission Lines and Transformers in Transient Simulations - Summary, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1A-21, no.4, July/August, pp.716-717.
- [19] IEEE Task Force, 1995, Modeling Guidelines for Low Frequency Transients- Part I: Torsional Oscillations, Transient Torques, Turbine Blade Vibrations, Fast Bus Transfer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no.4, October, pp.1950-1955.
- [20] IEEE Task Force, 1996, Modeling Guidelines for Low Frequency Transients- Part II: Controller Interactions, Harmonic Interactions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no.3, July, pp.1672-1677.