

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**LEANDRO SOARES RODRIGUES**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**METODOLOGIA PARA ENSAIO DE LIMITADOR DE  
CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO**

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA PARA ENSAIO DE LIMITADOR DE  
CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Roberto Petry Homrich

Porto Alegre  
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO SOARES RODRIGUES

## **METODOLOGIA DE ENSAIO DE LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Dr. Pela Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor Pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Prof. Dr. Luiz Tiaraju dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela University Of Wales College Of Cardiff – Cardiff, Reino Unido

Porto Alegre, julho de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, pela educação e por me ensinar o real significado de palavras como honestidade, humildade e caráter. Aos meus irmãos, pois eu não teria escolhido melhores e, especialmente, aos meus amores Camila e Júlia pelas quais todo e qualquer esforço torna-se pequeno.

“Ao deparar-se com uma encruzilhada, tenha a certeza de que o caminho que parecer mais duro e tortuoso é o que levará aos mais belos lugares.”

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino gratuito e de qualidade.

Aos professores, especialmente pelo grande apoio no final desta jornada.

Aos colegas, que se tornaram bons amigos com o passar dos anos.

À minha linda esposa, pelo incondicional apoio e carinho.

## RESUMO

O intenso crescimento da demanda por energia elétrica tem levado a um acréscimo, igualmente intenso, nas interconexões entre os sistemas de potência. Como consequência, as correntes de falta aumentam, impondo um alto nível de solicitações térmicas e mecânicas às estruturas e equipamentos que compõem tais sistemas. Na tentativa de atenuar esse problema, são realizadas pesquisas com o intuito de desenvolver dispositivos capazes de limitar as correntes de falta, evitando as desvantagens operacionais das soluções existentes. Tais pesquisas culminaram no projeto e construção, no LMEAE (Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia, da UFRGS), de um dispositivo limitador de corrente supercondutor resistivo, cujo princípio de funcionamento baseia-se em fenômenos observados nos materiais supercondutores. Neste documento, foi desenvolvida uma metodologia de ensaio na qual foram determinados e coletados os parâmetros necessários para a verificação do correto funcionamento desse dispositivo.

**Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Eletricidade de potência. Limitador de corrente supercondutor resistivo. Metodologia de ensaio.**

## **ABSTRAT**

The strong growth in demand for electricity has led to increased equally intense in the interconnections between power systems. As a result, the fault currents increases, requiring a high level of thermal and mechanical requests for the structures and equipments that compose such systems. In an attempt to mitigate this problem researches are performed with the goal of developing devices capable of limiting fault currents and to avoid the operational disadvantages of existing solutions. Such research culminated in the design and construction, in the LMEAE (Laboratory of Electrical Machines, Drives and Energy, at UFRGS), of a resistive superconducting current limiter, whose operating principle is based on observed phenomena in superconducting materials. In this work, we developed a testing methodology in which they were determined and collected the necessary parameters to verify the correct operation of this device.

**Keywords: Electrical Engeneering. Power Electricity. Resistive Superconducting Current Limiter. Test Methodology.**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 Motivação .....	12
1.2 Objetivos .....	13
1.3 Estrutura do trabalho .....	14
<b>2. UTILIZAÇÃO DE LIMITADORES</b> .....	<b>15</b>
2.1 Metodologia Tradicional .....	15
2.2 Princípio de Funcionamento .....	16
<b>3. A SUPERCONDUTIVIDADE</b> .....	<b>19</b>
3.1 Um breve histórico .....	19
3.2 O fenômeno da supercondutividade .....	19
3.3 Propriedades associadas à supercondutividade .....	19
3.4 Superfície crítica para o estado supercondutor .....	21
<b>4. LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR</b> .....	<b>22</b>
4.1 Limitador de corrente resistivo .....	22
4.2 Limitador de corrente de núcleo saturado .....	23
4.3 Limitador de corrente indutivo com blindagem .....	24
4.4 Limitador de corrente resistivo por reflexão .....	25
<b>5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO DISPOSITIVO PARA ENSAIO</b> .....	<b>28</b>
<b>6. METODOLOGIA DE ENSAIO</b> .....	<b>33</b>
6.1 Ensaio em regime permanente .....	33
6.1.1 <i>Configuração utilizada</i> .....	34
6.1.2 <i>Medições realizadas e instrumentos utilizados</i> .....	35
6.1.3 <i>Teoria envolvida</i> .....	35
6.1.3.1 Cálculo do módulo da impedância através da curva V-I.....	35
6.1.3.2 Cálculo do fluxo a partir da tensão nas bobinas exploradoras.....	36
6.1.3.3 Cálculo da corrente no secundário.....	37
6.2 ENSAIO EM REGIME TRANSITÓRIO .....	39
6.2.1 <i>Configuração utilizada</i> .....	39
6.2.2 <i>Medições realizadas e instrumentos utilizados</i> .....	40
6.2.3 <i>Teoria envolvida</i> .....	41
<b>7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ENSAIO</b> .....	<b>42</b>
7.1 Ensaio em regime permanente .....	42
7.1.1 <i>Módulo da impedância equivalente por fase</i> .....	43
7.1.2 <i>Bobina exploradora interna e externa</i> .....	44
7.1.3 <i>Bobina exploradora externa</i> .....	46
7.1.4 <i>Fluxo disperso pelo núcleo</i> .....	47
7.2 Ensaio em regime transitório .....	48
7.2.1 <i>Adaptações no método durante ensaios</i> .....	48
7.2.2 <i>Bobina de Rogowski</i> .....	49
7.2.3 <i>Impedância em regime transitório</i> .....	50
7.2.4 <i>Bobina exploradora interna e externa</i> .....	50
<b>8. ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
<b>9. CONCLUSÃO</b> .....	<b>53</b>
<b>10. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>54</b>
<b>11. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: REATOR LIMITADOR DA ESTAÇÃO DE TUCURUÍ (LANES, 2006).....	16
FIGURA 2: CIRCUITO MONOFÁSICO GENÉRICO EM CONDIÇÃO NORMAL DE FUNCIONAMENTO.....	16
FIGURA 3: CIRCUITO MONOFÁSICO GENÉRICO EM CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO.....	17
FIGURA 4: CIRCUITO MONOFÁSICO GENÉRICO EM CURTO-CIRCUITO COM REATOR SÉRIE.....	17
FIGURA 5: TRANSIÇÃO PARA O ESTADO NORMAL POR DENSIDADE DE CORRENTE CRÍTICA.....	20
FIGURA 6: EFEITO MEISSNER EM UM SUPERCONDUTOR (ADAPTADA, WIKIPÉDIA).....	21
FIGURA 7: DEMONSTRAÇÃO DO EFEITO MEISSNER: IMÃ LEVITANDO SOBRE AMOSTRA DE SUPERCONDUTOR (WIKIPÉDIA).....	21
FIGURA 8: VOLUME LIMITADO PELOS PARÂMETROS CRÍTICOS EM SUPERCONDUTORES.....	21
FIGURA 9: LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR RESISTIVO.....	22
FIGURA 10: LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR DE NÚCLEO SATURADO.....	23
FIGURA 11: LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR INDUTIVO COM BLINDAGEM.....	24
FIGURA 12: TRANSFORMADOR IDEAL COM CARGA (FITZGERALD, 2006).....	25
FIGURA 13: ILUSTRAÇÃO DO DISPOSITIVO COM DETALHAMENTO DAS CAMADAS.....	28
FIGURA 14: NÚCLEO MACIÇO COM BOBINAS EXPLORADORAS INTERNAS JÁ INSTALADAS.....	29
FIGURA 15: CRIOSTATO UTILIZADO PARA ACONDICIONAR O TUBO SUPERCONDUTOR.....	29
FIGURA 16: CRIOSTATOS INSTALADOS NO NÚCLEO COM BOBINAS EXPLORADORAS EXTERNAS EXPOSTAS.....	30
FIGURA 17: BOBINAS DO ENROLAMENTO PRIMÁRIO INSTALADAS NO LIMITADOR.....	30
FIGURA 18: TUBO SUPERCONDUTOR BI-2223 – CAN SUPERCONDUCTORS.....	31
FIGURA 19: TUBOS SUPERCONDUTORES EM ESTRUTURAS PARA INSTALAÇÃO NO LIMITADOR.....	31
FIGURA 20: SECUNDÁRIO SUPERCONDUTOR SENDO INSTALADO NO CRIOSTATO.....	32
FIGURA 21: FOTO DO LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR, OBJETO DE ENSAIO, COMPLETO.....	32
FIGURA 22: ILUSTRAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESPERADO EM ENSAIO ESTÁTICO GENÉRICO.....	34
FIGURA 23: DIAGRAMA DE LIGAÇÕES PARA ENSAIO EM REGIME PERMANENTE.....	35
FIGURA 24: (A) BOBINA DE ROGOWSKI INSTALADA NA POSIÇÃO DE MEDIÇÃO. (B) DETALHE DA BOBINA DE ROGOWSKI SEM A CAPA ISOLANTE TERMOCONTRÁTIL.....	37
FIGURA 25: CURVA DE CALIBRAÇÃO DA BOBINA DE ROGOWSKI.....	38
FIGURA 26: BOBINA PARA CALIBRAÇÃO, SIMULANDO CILINDRO CONDUTOR.....	38
FIGURA 27: ILUSTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE UM ENSAIO TRANSIENTE.....	40
FIGURA 28: DIAGRAMA DE LIGAÇÕES PARA ENSAIO EM REGIME TRANSITÓRIO.....	40
FIGURA 29: TUBOS DE BI-2223, ALUMÍNIO E LATÃO UTILIZADOS NO ENSAIO.....	42
FIGURA 30: FOTO DA MONTAGEM PARA ENSAIO EM REGIME PERMANENTE.....	42
FIGURA 31: GRÁFICO DAS IMPEDÂNCIAS CALCULADAS PARA REGIME PERMANENTE.....	44
FIGURA 32: GRÁFICO DO FLUXO MAGNÉTICO EFICAZ CONFINADO NO NÚCLEO.....	45
FIGURA 33: GRÁFICO DO FLUXO MAGNÉTICO EFICAZ DO NÚCLEO SOMADO AO DISPERSO.....	46
FIGURA 34: GRÁFICO DO FLUXO MAGNÉTICO EFICAZ DISPERSO PELO NÚCLEO.....	47
FIGURA 35: NOVO DIAGRAMA DE LIGAÇÕES PARA ENSAIO EM REGIME TRANSITÓRIO.....	48
FIGURA 36: TENSÃO NA BOBINA DE ROGOWSKI COM LIMITADOR COMPLETO.....	49
FIGURA 37: TENSÃO NA BOBINA DE ROGOWSKI NO CRIOSTATO, PORÉM SEM SECUNDÁRIO.....	49
FIGURA 38: TENSÃO NA BOBINA PRIMÁRIA E CORRENTE DE LINHA EM REGIME TRANSIENTE.....	50
FIGURA 39: SINAL DAS BOBINAS EXPLORADORAS DURANTE ENSAIO TRANSIENTE.....	50
FIGURA 40: CURVAS DA CARACTERÍSTICA V-I COM DIFERENTES MATERIAIS COMO SECUNDÁRIO.....	51
FIGURA 41: TENSÕES NAS BOBINAS EXPLORADORAS, INTERNA E EXTERNA, EM REGIME PERMANENTE.....	52

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1: VALORES DE TENSÃO E CORRENTE EFICAZES POR FASE MEDIDA NO ENSAIO. ....	43
TABELA 2: VALORES RELATIVOS A MEDIÇÕES NA BOBINA EXPLORADORA INTERNA. ....	45
TABELA 3: VALORES RELATIVOS A MEDIÇÕES NA BOBINA EXPLORADORA EXTERNA.....	46
TABELA 4: VALORES CALCULADOS DE FLUXO MAGNÉTICO DISPERSO PELO NÚCLEO. ....	47

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

LMEAE: Laboratório de Máquinas Elétricas Acionamentos e Energia

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RLC: Reator Limitador de Corrente

CC: Corrente contínua

CA: Corrente Alternada

FMM: Força Magnetomotriz

FCEM: Força Contra-eletromotriz

FEM: Força eletromotriz

## **1. INTRODUÇÃO**

Faltas em sistemas elétricos de potência são inevitáveis. Além dos danos causados nas vizinhanças da falta, devido ao efeito do arco elétrico, as correntes de falta impõem altos níveis de esforços mecânicos e térmicos aos elementos do sistema tais como linhas aéreas, cabos, transformadores, disjuntores e comutadores (SCHMITT, 2006).

Com o crescimento da demanda dos sistemas de energia elétrica, o aumento da capacidade de geração, a elevação dos níveis de tensão, as novas linhas de transmissão e o incremento das interconexões entre redes, observa-se um crescimento gradativo dos níveis de corrente de curto-circuito nas diversas barras. Esses elevados níveis tendem a superar as capacidades dos disjuntores instalados, bem como a capacidade dos equipamentos a eles ligados de suportarem esforços térmicos e eletromecânicos durante a ocorrência de defeitos.

A rigor, os incrementos na geração e na demanda de energia elétrica deveriam ser acompanhados por reformas estruturais e pelo redimensionamento dos dispositivos de manobra e proteção. Tal providência, apesar de servir como opção, certamente seria uma solução proibitivamente cara.

### **1.1 MOTIVAÇÃO**

Do ponto de vista técnico e econômico, um dispositivo capaz de reduzir a corrente de falta antes que o disjuntor a interrompa ou que esta corrente cause maiores solicitações aos equipamentos do sistema, ou ainda, que não interfira consideravelmente na operação normal do sistema será sempre bem recebido (HOMRICH, 2006).

A solução clássica convencional para a limitação de corrente de falta em sistemas de potência tem sido a instalação dos chamados limitadores de corrente, que nada mais são do que reatores em série ou impedâncias de aterramento em instalações com elevada potência de curto-circuito. Entretanto outras soluções têm sido propostas, como as que associam chaves

com capacidade de conduzir corrente nominal alta, mas com baixa capacidade de chaveamento, ligada em paralelo com fusível de alta capacidade de ruptura (HOMRICH, 2006).

Porém, conforme RHYNER (1995), todas as soluções desenvolvidas até agora possuem substanciais desvantagens. Elas possuem poucas das características esperadas de um limitador de corrente ideal, que seriam:

- Desprezível influência sobre a rede em condições normais.
- Limitação instantânea de todos os tipos de faltas.
- Repetidas operações sem substituições e curto tempo de restabelecimento.
- Inexistência de sobre tensão durante as faltas.
- Sem gatilho externo.
- Sem fontes de energia externa.
- Alta confiabilidade e sem falhas.

Desta forma, pesquisas buscam o desenvolvimento de um dispositivo cujas características sejam bastante próximas das ideais descritas acima.

## **1.2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de testes que permita verificar as características de funcionamento de um limitador de corrente a supercondutor resistivo com tensão de 13,8 kV e potência trifásica de 112,5 kVA, projetado e construído no LMEAE – Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia da UFRGS.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Como este projeto trata da criação de uma metodologia para ensaio de um dispositivo, o qual é uma promessa de inovação e que já foi projetado e construído, faz-se necessária inicialmente uma contextualização do problema, descrevendo quais as soluções clássicas e seu princípio de funcionamento assim como demonstrando a teoria necessária para a compreensão dos critérios relevantes que nortearão a metodologia que surgirá como resultado deste trabalho. Desta forma, pretende-se apresentar no capítulo 2 a metodologia tradicional para a limitação de corrente de falta e seu princípio de funcionamento.

No capítulo 3 será abordado o fenômeno da supercondutividade, começando com um breve histórico, seguido da descrição das principais propriedades relacionadas ao fenômeno e finalmente listando os parâmetros de operação dos materiais supercondutores.

O capítulo 4 tratará da aplicação do fenômeno da supercondutividade em limitadores de corrente de falta nas suas configurações mais comuns com uma análise mais voltada para a configuração que foi montada no LMEAE.

O capítulo 5 abará uma descrição das características construtivas do dispositivo a ser testado, valorizando àquelas necessárias ao entendimento do ensaio e seus resultados.

O capítulo 6 apresentará o desenvolvimento da metodologia de ensaio a partir de critérios que ali serão discutidos e justificados.

O capítulo 7 será utilizado para uma análise dos resultados obtidos com os ensaios descritos no capítulo anterior e, finalmente, no capítulo 8 serão feitas as considerações finais e serão sugeridas novas linhas de investigação para o dispositivo ensaiado.

## 2. UTILIZAÇÃO DE LIMITADORES

O princípio utilizado para a limitação das correntes de falta em sistemas elétricos de potência é comum a quase todos os dispositivos desenvolvidos com esse objetivo e baseia-se na interposição de uma reatância no caminho que será percorrido pela corrente de curto-circuito. Essa reatância tende a dificultar o aumento brusco da corrente que a percorre, pois esse aumento é comum nas situações de falta. A evolução dos dispositivos limitadores está relacionada, entre outras coisas, à forma como é criada e inserida no sistema a reatância necessária para uma limitação satisfatória ser alcançada.

### 2.1 METODOLOGIA TRADICIONAL

O emprego de reatores em série constitui a metodologia mais comumente empregada na proteção de sistemas de energia elétrica (RHYNER, 1995). Na função de proteção elétrica, permite limitar rapidamente a corrente de falta, evitando danos elétricos e eletromecânicos ao sistema e assegurando que o disjuntor mais próximo e de menor capacidade de operação possa atuar adequadamente.

Os reatores limitadores de corrente são bobinas de indução usadas para limitar a corrente durante condições de falta, e para desempenhar essa função é essencial que a saturação magnética em altas correntes não reduza a reatância da bobina. Se a corrente de falta for maior que três vezes a corrente de carga máxima, um núcleo de ferro dimensionado para manter essencialmente constante a permeabilidade magnética seria muito volumoso e caro. Dessa forma, normalmente os reatores série limitadores de corrente utilizam núcleo de ar, o que mantém constante a sua permeabilidade magnética e, conseqüentemente, a reatância do enrolamento (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1950).

A figura 1 mostra a foto de um RLC da subestação de Tucuruí com impedância de  $20 \Omega$  operando na linha de  $500 \text{ kV}$ .



Figura 1: Reator limitador da estação de Tucuruí (LANES, 2006).

## 2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A figura 2 apresenta um circuito elétrico monofásico genérico onde uma carga de impedância  $Z_c$  constante é alimentada pela fonte  $U$  representando o circuito em regime permanente.

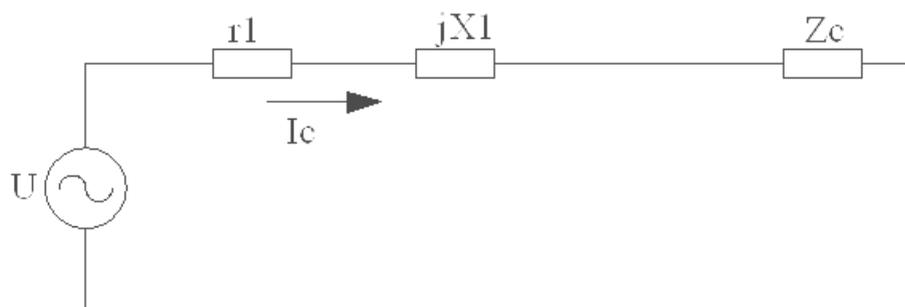


Figura 2: Circuito monofásico genérico em condição normal de funcionamento.

Os parâmetros  $r_1$  e  $X_1$  representam, respectivamente, a resistência elétrica e a reatância indutiva da linha, em  $\Omega$ ,  $U$  é a tensão de excitação do circuito em  $V_{rms}$  e  $I_c$  é a corrente que flui pela carga  $Z_c$ .

O módulo da corrente elétrica eficaz  $I_c$  durante o regime permanente na figura 2 é dado por (1).

$$|I_c| = \frac{|U|}{|r_1 + jX_1 + Z_c|} \quad (1)$$

A figura 3 mostra o mesmo diagrama com a representação de um curto-circuito através da impedância  $Z_{cc}$ , sendo  $|Z_{cc}| \ll |Z_c|$ .

Neste caso, o módulo da corrente eficaz  $I_{cc}$  durante o curto circuito é dado por (2).

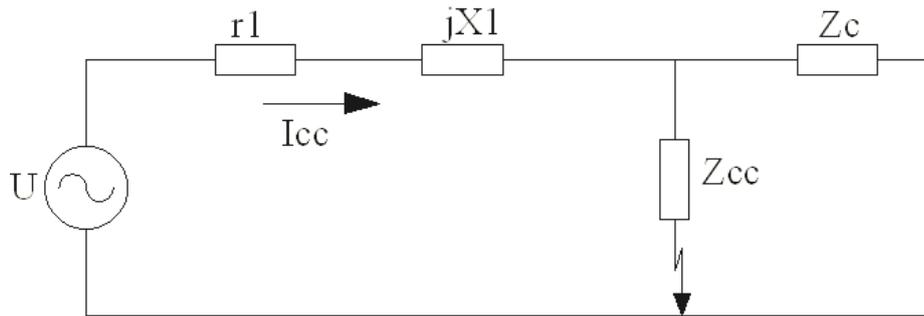


Figura 3: Circuito monofásico genérico em condição de curto-circuito.

$$|I_{cc}| = \frac{|U|}{|r_1 + jX_1 + Z_{cc}|} \quad (2)$$

O circuito da figura 4 ilustra o da figura 3 com um reator em série introduzido como dispositivo limitador de corrente, durante a ocorrência de um curto-circuito.

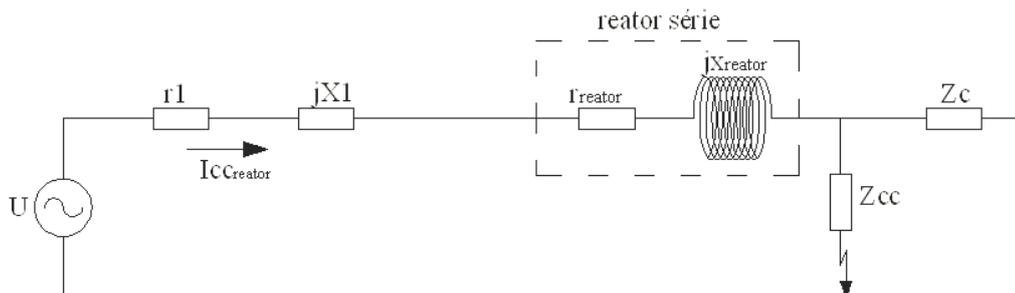


Figura 4: Circuito monofásico genérico em curto-circuito com reator série.

Na figura 4  $I_{cc}^{reator}$  é a corrente de curto-circuito com o reator inserido no circuito, em Amperes, e  $r_{reator}$  e  $X_{reator}$  representam, respectivamente, a resistência elétrica e a reatância do reator, em  $\Omega$ .

O módulo da corrente de curto-circuito com o reator série presente  $|I_{cc}^{reator}|$  é dada por (3).

$$|I_{cc}^{reator}| = \frac{|U|}{|(r_1 + r_{reator}) + j(X_1 + X_{reator}) + Z_{cc}|} \quad (3)$$

Comparando-se (2) e (3) observa-se que o denominador de (3) é acrescido do valor  $r_1 + jX_{reator}$ , implicando que com a presença do reator série, para a mesma tensão de alimentação  $U$  a corrente de curto-circuito mais reduzida do que a corrente de curto-circuito sem o dispositivo limitador de corrente.

Como,

$$|(r_1 + r_{reator}) + j(X_1 + X_{reator}) + Z_{cc}| > |r_1 + jX_1 + Z_{cc}| \quad (4)$$

Então,

$$|I_{cc}^{reator}| < |I_{cc}| \quad (5)$$

Note-se também, que esse tipo de limitador de corrente apresenta permanentemente uma queda de tensão no circuito bem como uma potência dissipada por efeito Joule em seu enrolamento, o que reduz a potência disponível à carga ligada durante a operação normal.

### **3. A SUPERCONDUTIVIDADE**

#### **3.1 UM BREVE HISTÓRICO**

A supercondutividade foi descoberta em 1911 por Heike Kamerlingh Onnes em Leiden, Holanda, apenas três anos após este mesmo físico, Nobel de física em 1913, ter obtido a primeira amostra de hélio liquefeito, o que lhe forneceu a técnica de refrigeração necessária para atingir temperaturas de alguns poucos Kelvin. Durante décadas muitos cientistas trabalharam para entender o fenômeno da supercondutividade. Então, nas décadas de 1960 e 1970, surgiu uma notavelmente completa e satisfatória teoria para os clássicos supercondutores. Esta situação foi ultrapassada e o assunto foi revitalizado em 1986, quando uma nova classe de supercondutores de alta temperatura foi descoberta pelos físicos da IBM Johannes Georg Bednorz e Karl Alexander Müller (TINKHAM, 1996).

#### **3.2 O FENÔMENO DA SUPERCONDUTIVIDADE**

Diferentemente da gradual diminuição da resistência elétrica apresentada pela grande maioria dos metais quando a temperatura é diminuída, o estado supercondutor se estabelece de forma abrupta a uma dada temperatura crítica  $T_c$ , característica do material em questão (HOMRICH, 2001). Foi esse o fenômeno observado por Onnes quando analisava a resistividade de uma amostra de mercúrio a qual caía abruptamente a zero quando a temperatura da amostra ficava abaixo dos 4,15K.

#### **3.3 PROPRIEDADES ASSOCIADAS À SUPERCONDUTIVIDADE**

Duas fundamentais propriedades estão associadas com a supercondutividade:

##### **3.3.1 Resistividade zero sob corrente contínua**

Transição de uma resistividade finita  $\rho_n$  no estado normal acima da temperatura de transição  $T_c$  para o estado supercondutor, para  $\rho = 0$ , isto é, perfeita condutividade sob corrente contínua, abaixo de  $T_c$ . A figura 5, onde  $J$  é a densidade de corrente e  $R$  é a resistividade do supercondutor, ilustra a propriedade de transição de estado de resistividade nula para o estado de resistividade  $R_0$  a partir de uma densidade de corrente crítica  $J_{Crítico}$ .

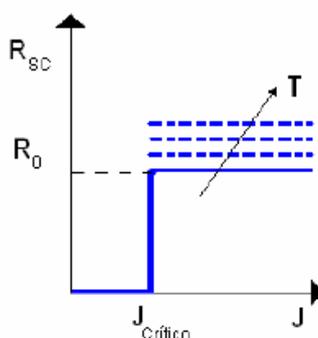


Figura 5: Transição para o estado normal por densidade de corrente crítica.

### 3.3.2 Efeito Meissner: Diamagnetismo perfeito.

Da descoberta da resistividade elétrica zero por Onnes em 1911, vinte e dois anos se passaram até a próxima importante descoberta de Meissner e Ochselfeld. Eles constataram que o estado supercondutor possui uma segunda característica, definida como a propriedade de diamagnetismo perfeito (FOSSHEIM, 2004).

Esta propriedade do estado supercondutor permite que, além de mostrar resistividade zero, o material seja capaz de expulsar o fluxo magnético de seu interior quando submetido a uma densidade de fluxo magnético inferior ao valor crítico (HOMRICH, 2001). As figuras 6 e 7 ilustram, respectivamente, o comportamento teórico do fluxo magnético em uma amostra no estado normal e supercondutor e uma fotografia da demonstração prática desse efeito.

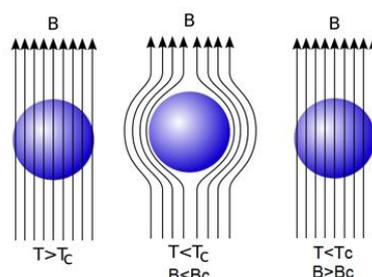


Figura 6: Efeito Meissner em um supercondutor (adaptada, Wikipédia).

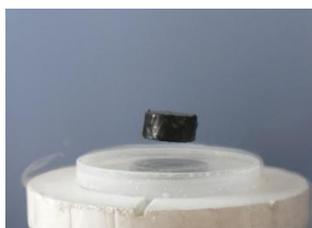


Figura 7: Demonstração do efeito Meissner: ímã levitando sobre amostra de supercondutor (Wikipédia).

### 3.4 SUPERFÍCIE CRÍTICA PARA O ESTADO SUPERCONDUTOR

Somando-se às propriedades descritas acima o *quench* a partir de uma densidade de corrente crítica a circular pelo supercondutor, podem ser definidos três parâmetros de operação para os materiais no estado supercondutor. As grandezas temperatura crítica  $T_c$ , densidade de campo magnético crítico  $B_c$ , e densidade de corrente crítica  $J_c$  relacionam-se entre si através de uma superfície no espaço como uma função  $f(B, J, T)$ , característica do material, conforme ilustra a figura 8. Dentro do volume limitado pelos planos formados por cada par de eixos e a superfície  $f(B, J, T)$  ocorre o fenômeno da supercondutividade. Fora deste volume prevalece o comportamento condutor resistivo normal (HOMRICH, 2001).

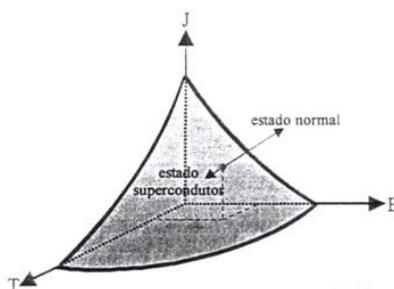


Figura 8: Volume limitado pelos parâmetros críticos em supercondutores.

#### 4. LIMITADOR DE CORRENTE SUPERCONDUTOR

Os dispositivos limitadores de corrente supercondutores têm seu funcionamento baseado na aplicação da rápida transição do material, ou “*quench*”, do estado supercondutor para o estado normal. Esta propriedade funciona como uma chave capaz de habilitar ou desabilitar rapidamente uma impedância conectada em série com o circuito, limitando a corrente que passa pelo material no momento em que este deixa de ser supercondutor (HOMRICH, 2001).

##### 4.1 LIMITADOR DE CORRENTE RESISTIVO

Nesta configuração de limitador de corrente, conforme ilustra a figura 9, o componente supercondutor é conectado em série com o circuito a ser protegido. O dispositivo utiliza, de forma direta, a característica de aumento quase instantâneo da resistividade quando a densidade de corrente, que atravessa o material, atinge o valor crítico  $J_c$  limitando a corrente que o atravessa. Pode ser utilizado um resistor de desvio para que altos níveis de corrente de falta não provoquem um aquecimento excessivo do material supercondutor durante a limitação da corrente.

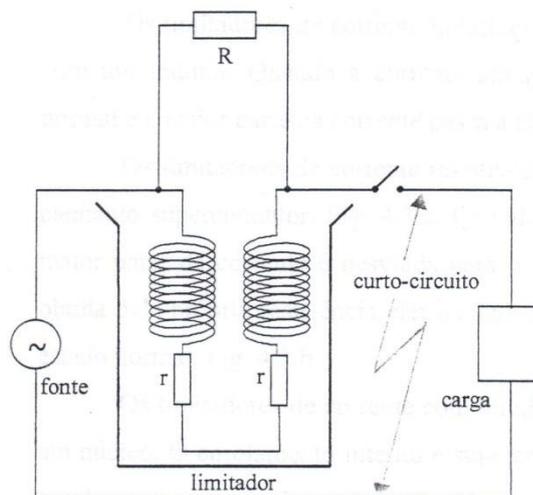


Figura 9: Limitador de corrente supercondutor resistivo

## 4.2 LIMITADOR DE CORRENTE DE NÚCLEO SATURADO

Em 1978 foi proposto o limitador de corrente supercondutor indutivo saturado, operando sobre o princípio de que quando um dispositivo entra ou sai de saturação magnética, sua impedância muda de forma significativa. Para ativar o limitador de corrente nas duas metades do ciclo, são necessários dois indutores por fase. Estes indutores são levados a saturação por um campo magnético CC (Corrente Contínua) gerado por uma bobina supercondutora. Quando flui a corrente de falta, uma grande FMM é produzida pelos indutores CA fazendo com que o núcleo saia de saturação em meio ciclo, automaticamente inserindo uma grande impedância e limitando a amplitude da corrente de falta.

A configuração de limitador indutivo saturado é interessante no sentido de que o componente supercondutor não é conectado ao circuito e a transição da operação normal para operação com a presença de falta ocorre sem a interrupção do estado supercondutor do enrolamento.

Este tipo de limitador, apesar do sucesso dos testes em protótipos, apresenta algumas desvantagens:

- Um grande volume de cobre e ferro é requerido.
- Tensão de operação normal no limitador é 4% da tensão normal da linha.
- O enrolamento supercondutor provavelmente deverá ser protegido contra os campos eletromagnéticos dos enrolamentos CA.

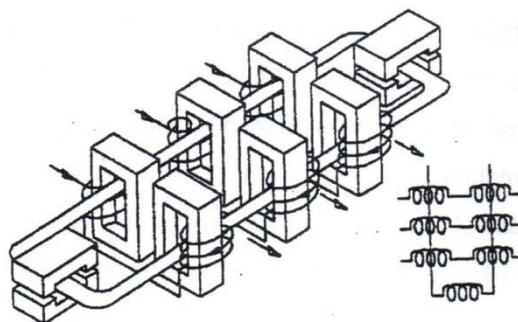


Figura 10: Limitador de corrente supercondutor de núcleo saturado.

### 4.3 LIMITADOR DE CORRENTE INDUTIVO COM BLINDAGEM

Este dispositivo, que aparece em corte na figura 11, consiste de um núcleo de ferro, um enrolamento primário de cobre em série com o circuito a ser protegido e uma espira supercondutora em curto-circuito como secundário (tubo). Como o enrolamento primário fica usualmente em torno do tubo supercondutor, o supercondutor é comumente referido como uma blindagem ou tela magnética, impedindo que o fluxo do enrolamento primário passe pelo núcleo. Este modelo também pode ser visto como um transformador cujo secundário possui uma única espira em curto-circuito. Para operação normal, o ampere-espira da bobina está balanceada pela corrente induzida no supercondutor, e o limitador aparece como um dispositivo de baixa impedância. Durante a situação de falta, entretanto, o balanço de ampere-espira é destruído, o fluxo penetra no núcleo e uma alta impedância é inserida no circuito a ser protegido.

Com um projeto cuidadoso, este tipo de limitador pode ter um curto tempo de rearme, desta forma nem sempre será necessário um dispositivo de proteção para o limitador. A tensão de operação normal sobre o limitador é menor que 1% da tensão normal da linha protegida.

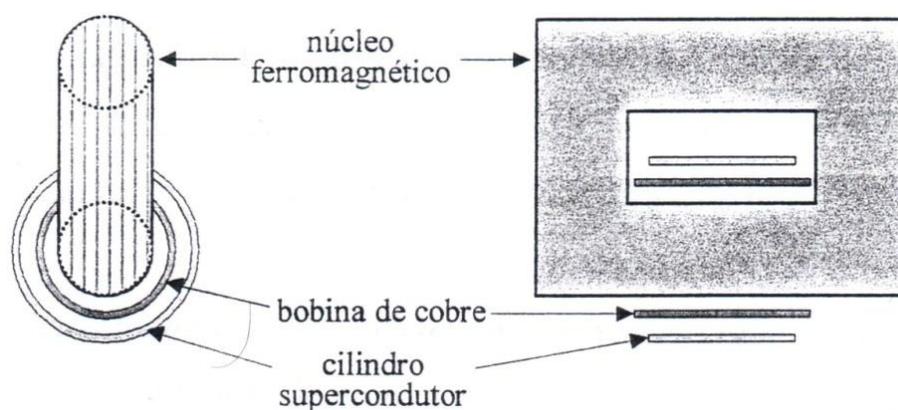


Figura 11: Limitador de corrente supercondutor indutivo com blindagem

#### 4.4 LIMITADOR DE CORRENTE RESISTIVO POR REFLEXÃO

As similaridades desta configuração com as características construtivas e elétricas de um transformador permitem que outra abordagem seja utilizada para entendimento do princípio de funcionamento desse dispositivo.

A partir da análise, em FITZGERALD (2006), de um transformador ideal com carga conforme figura 12, quando for aplicada uma tensão  $v_1$  variável aos terminais do primário, então um fluxo  $\varphi$  deve ser estabelecido no núcleo de modo que a FCEM  $e_1$  seja igual à tensão aplicada. Assim,

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (6)$$

O fluxo também concatena o secundário produzindo uma FEM induzida  $e_2$  e outra tensão igual  $v_2$  nos terminais do secundário, dadas por

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

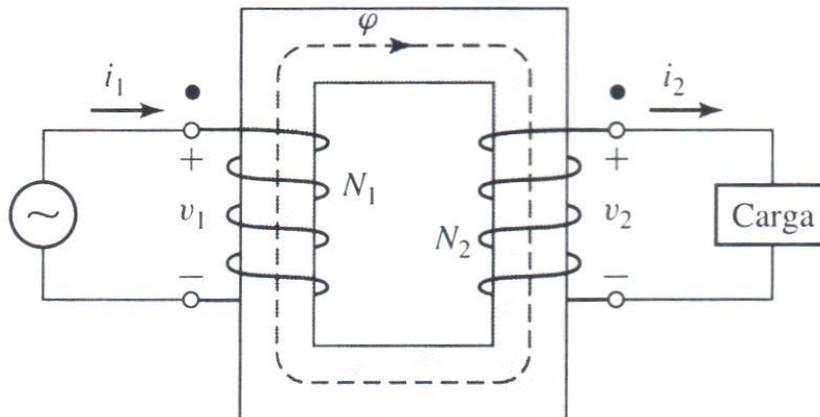


Figura 12: Transformador ideal com carga (FITZGERALD, 2006)

Da razão entre as equações (6) e (7), vem

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

Assim, um transformador ideal transforma tensões na razão direta das espiras de seus enrolamentos.

De outra forma, com uma carga conectada ao secundário, uma corrente  $i_2$  e uma FMM  $N_2 i_2$  estarão presentes no secundário. Como supõe-se que a permeabilidade do núcleo seja muito elevada e que o fluxo do núcleo seja estabelecido pela tensão aplicada ao primário, como especificado pela equação (6), então o fluxo não irá se alterar com a presença de uma carga no secundário e assim a FMM líquida de excitação, que atua no núcleo, também não irá se alterar permanecendo, portanto, desprezível. Assim,

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (9)$$

ou

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (10)$$

Portanto, um transformador ideal transforma correntes na razão inversa das espiras de seus enrolamentos.

Finalmente, as equações (8) e (10), em forma fasorial, podem ser expressas como

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (11)$$

e

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (12)$$

Das equações 11 e 12, vem

$$\frac{V_1}{I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_2}{I_2} \quad (13)$$

Observando-se que a impedância de carga  $Z_2$  relaciona-se com a tensão e a corrente do secundário por

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (14)$$

onde  $Z_2$  é a impedância complexa da carga. Conseqüentemente, até onde os seus efeitos precisam ser considerados, uma impedância  $Z_2$  no circuito secundário pode ser substituída por uma impedância equivalente  $Z_1$  no circuito primário desde que

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \quad (15)$$

Finalmente, a equação (15) demonstra de forma clara que, no caso do dispositivo limitador, a impedância  $Z_2$  é exatamente aquela apresentada pelo tubo supercondutor enquanto enrolamento secundário do limitador. Também pode ser observado, através dessa equação, qual comportamento da impedância vista no primário quando o tubo está em seu estado normal e quando está em estado supercondutor.

## 5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO DISPOSITIVO PARA ENSAIO

A configuração do limitador trifásico de corrente supercondutor, que motivou a criação de uma metodologia de ensaio, apresenta um núcleo ferromagnético maciço disposto em três colunas cada qual envolvida por um enrolamento supercondutor e um enrolamento condutor convencional de cobre. A figura 13 apresenta um desenho ilustrativo do dispositivo construído. Nessa representação também podem ser visualizadas duas bobinas exploradoras, uma interna ao enrolamento supercondutor e outra externa a este enrolamento. Essas bobinas foram inseridas no intuito de possibilitar o monitoramento do fluxo magnético contido no núcleo e fora dele, durante os ensaios em regime permanente e transitório, através da tensão induzida verificada nos terminais dessas bobinas, sendo que elas possuem o mesmo número N de espiras conhecido.

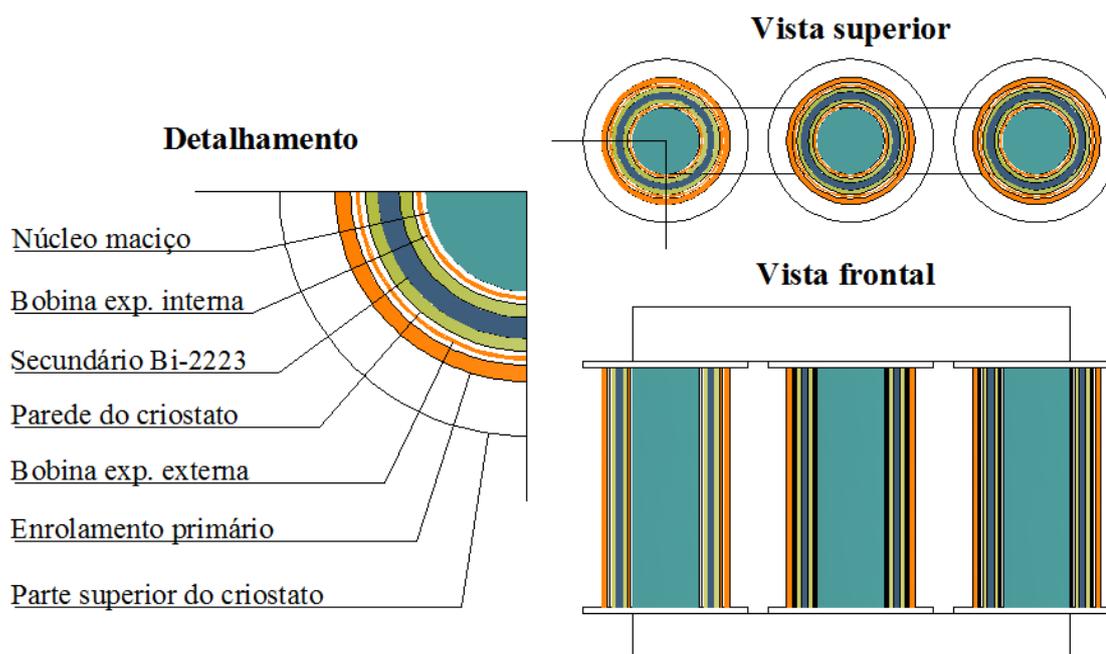


Figura 13: Ilustração do dispositivo com detalhamento das camadas

Na fotografia da figura 14 pode ser visualizado o núcleo maciço de material ferromagnético já com as bobinas exploradoras internas instaladas. Nota-se claramente que essas bobinas enlaçarão apenas o fluxo magnético que passar pelo núcleo.



Figura 14: Núcleo maciço com bobinas exploradoras internas já instaladas

Um sistema criogênico, que pode ser visto em detalhe na figura 15, mantém somente os enrolamentos supercondutores banhados pelo nitrogênio enquanto que as outras partes do dispositivo são mantidas à temperatura normal de operação. Isto reduz o volume de nitrogênio necessário à operação da bobina supercondutora, bem como evita a excessiva evaporação do referido fluido, já que o calor produzido pelas bobinas de cobre e pelo núcleo ferromagnético não é transferido para o fluido criogênico.



Figura 15: Criostato utilizado para acondicionar o tubo supercondutor.

Os criostatos já instalados no núcleo e com as respectivas bobinas exploradoras externas podem ser observados na figura 16. Nesse caso, conforme mencionado anteriormente, o fluxo disperso ou, expulso pelo núcleo, poderá ser medido a partir da subtração dos valores já registrado pelas bobinas exploradoras internas.



Figura 16: Criostatos instalados no núcleo com bobinas exploradoras externas expostas.

Em torno dos criostatos serão alojadas as bobinas de cobre que compõem o enrolamento primário. Na figura 17 podem ser vistas as bobinas primárias já instaladas sobre os respectivos criostatos.

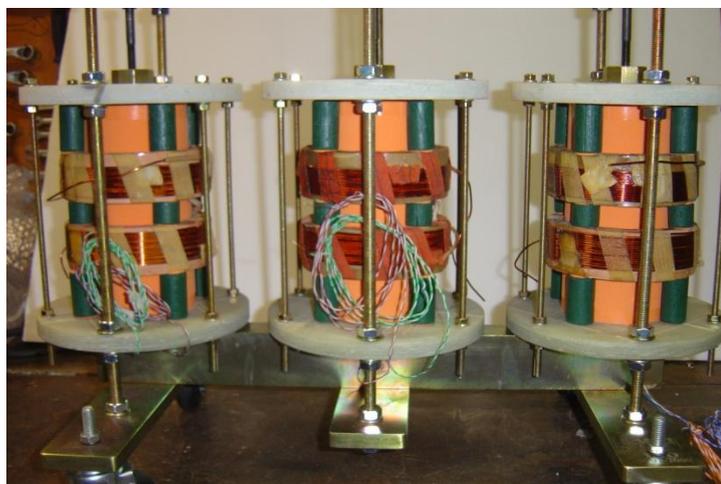


Figura 17: Bobinas do enrolamento primário instaladas no limitador.

Neste protótipo é utilizada a cerâmica supercondutora, fabricada pela *Can Superconductors*, conhecida como Bi-2223, a qual pode ser vista na figura 18, cuja formula é  $Bi_{1,8}Pb_{0,26}Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$  e que possui temperatura crítica de 108 K.



Figura 18: Tubo supercondutor Bi-2223 – Can Superconductors

Os três tubos supercondutores a serem utilizados como enrolamentos secundários do limitador trifásico possuem cada um, uma altura de 100 mm, um diâmetro interno de 60 mm e paredes com espessura de 2,5 mm. A figura 19 mostra os três tubos supercondutores montados em uma estrutura de fixação que facilita tanto a sua instalação quanto a sua retirada de dentro dos criostatos.



Figura 19: Tubos supercondutores em estruturas para instalação no limitador

Na figura 20, pode ser observada a forma como os enrolamentos secundários são inseridos no criostato.



Figura 20: Secundário supercondutor sendo instalado no criostato.

O dispositivo descrito acima e que aparece na figura 21 pode ser visto como um transformador trifásico cujo secundário possui uma única espira. Através da equação (10) e da característica do material supercondutor utilizado, que transita do estado supercondutor para o estado normal quando atinge determinada densidade de corrente, pode-se dimensionar exatamente o valor em o limitador atuará simplesmente pela alteração do número de espiras do enrolamento primário.



Figura 21: Foto do limitador de corrente supercondutor, objeto de ensaio, completo.

## 6. METODOLOGIA DE ENSAIO

Como já foi mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de ensaio que permita verificar se o funcionamento do dispositivo limitador de corrente supercondutor atinge as características de desempenho esperadas.

Este tipo de limitador é uma evolução do dispositivo clássico e tem a pretensão de minimizar qualquer consequência indesejável de sua instalação na rede, aproximando o dispositivo da condição ideal.

Dessa forma, as referências tomadas para essa verificação serão as características de funcionamento dos reatores série que mais distam das qualidades esperadas de um dispositivo limitador ideal. Essas qualidades serão listadas a seguir:

- Desprezível influência sobre a rede em condições normais;
- Limitação instantânea de todos os tipos de faltas;
- Ausência sobre tensões durante a falta;

### 6.1 ENSAIO EM REGIME PERMANENTE

Dentro do método proposto, o ensaio em regime permanente será utilizado para que possa ser analisado o comportamento do dispositivo em diferentes níveis de corrente de linha, possibilitando a construção de curvas de dados que permitam observar claramente o comportamento da impedância e do fluxo no núcleo com o aumento suave e gradativo da corrente de linha que circulará nesse dispositivo.

A figura 22 demonstra o comparativo de resultados esperados de ensaios estáticos realizados em dispositivo limitador supercondutor monofásico. Neste caso, teriam sido feitos ensaios sem o núcleo de ferro, com o núcleo de ferro e sem o material supercondutor e, finalmente, com o limitador completo. Pode ser observado o comportamento linear do módulo da impedância no limitador sem o núcleo de ferro. Com o núcleo, porém sem o Bi-

2223, o limitador comporta-se como um reator sendo que sua impedância cresce gradativamente e converge para a saturação. Na curva que ilustra os resultados a partir do limitador completo, constata-se claramente um aumento abrupto no módulo da impedância. Este é o comportamento da impedância do dispositivo no momento em que ocorre o *quench* do supercondutor.

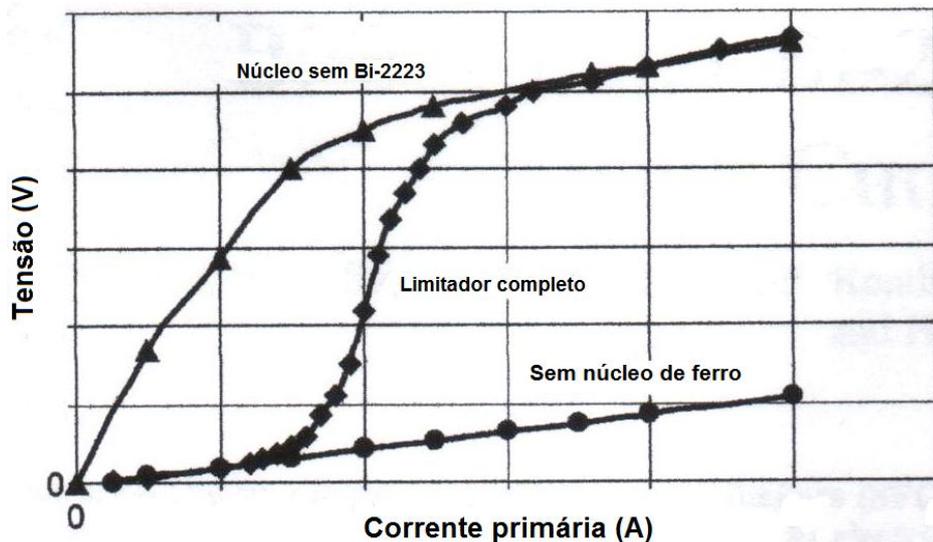


Figura 22: Ilustração do comportamento esperado em ensaio estático genérico.

Também nesta etapa será observada, através de uma bobina de Rogowski projetada especialmente para esse fim, a corrente que circula pelo enrolamento secundário. O resultado esperado desta primeira etapa é de que se conheça o nível da corrente na linha e no cilindro supercondutor como secundário necessário para que ocorra o *quench* neste último.

### 6.1.1 Configuração utilizada

O circuito utilizado no ensaio em regime permanente é composto basicamente de uma alimentação trifásica conectada às bobinas primárias do limitador ligadas em estrela. Essa conexão é feita através de um autotransformador variável trifásico para que, variando-se a tensão aplicada, seja variada a corrente que circula nas bobinas primárias. Esse circuito pode ser observado na figura 23.

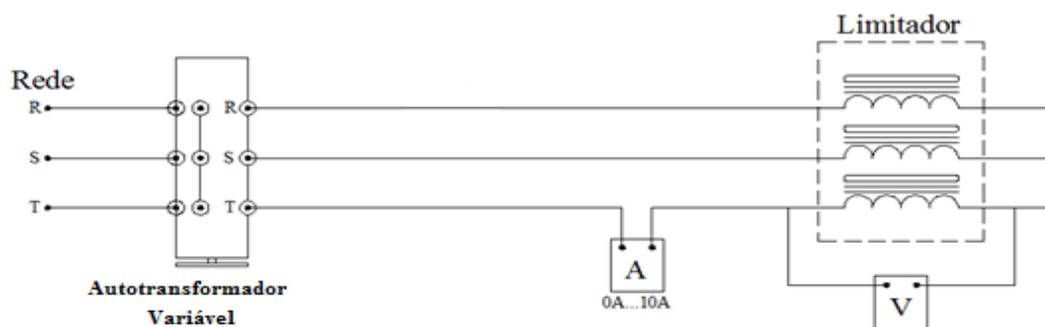


Figura 23: Diagrama de ligações para ensaio em regime permanente.

### 6.1.2 Medições realizadas e instrumentos utilizados

Serão medidos os valores de corrente de linha através da tensão verificada em um resistor *shunt* instalado diretamente em uma das fases. Como o circuito é aproximadamente equilibrado, os parâmetros de uma das fases serão suficientes para que se possa avaliar o funcionamento do dispositivo.

Outro parâmetro que será observado neste teste é a tensão do enrolamento primário do limitador, o que será medido diretamente sobre a bobina a qual tem sua corrente monitorada.

Finalmente, serão adquiridos os sinais de três sensores instalados na estrutura do limitador. Será medido o sinal de tensão das duas bobinas exploradoras, interna e externa, e o sinal de tensão de uma bobina de Rogowski. Todas essas medidas podem ser realizadas com a utilização de osciloscópios.

### 6.1.3 Teoria envolvida

#### 6.1.3.1 Cálculo do módulo da impedância através da curva $V-I$

A determinação da impedância do limitador vista pela linha a fim de identificar os seus valores nas situações em que o Bi-2223 está em seu estado normal e supercondutor, e ainda estabelecer claramente a diferença entre esses valores. A partir dos valores de corrente da

linha eficaz  $I_{linha}$  e da tensão eficaz na bobina primária  $V_{prim}$ , basta aplicar-se a equação (16) para obter o módulo da impedância por fase  $|Z_{lim\phi}|$ .

$$|Z_{lim\phi}| = \frac{V_{prim}}{I_{linha}} \quad (16)$$

### 6.1.3.2 Cálculo do fluxo a partir da tensão nas bobinas exploradoras.

A partir da *lei de Faraday* tem-se que:

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (17)$$

Onde  $\lambda$  é o fluxo concatenado do enrolamento definido como,

$$\lambda = N\varphi \quad (18)$$

e, sendo N o número de espiras então,

$$e = -\frac{dN\varphi}{dt} = -N\frac{d\varphi}{dt} \quad (19)$$

Sabendo-se que:

$$\varphi = \varphi_{m\acute{a}x}\cos(\omega t) \quad (20)$$

tem-se,

$$e = -N\frac{d[\varphi_{m\acute{a}x}\cos(\omega t)]}{dt} = N\varphi_{m\acute{a}x}\omega\sin(\omega t) \quad (21)$$

Sendo  $\omega = 2\pi f$  e a tensão  $e$  medida em  $e_{ef}$ , então

$$e_{ef} = \frac{N\varphi_{m\acute{a}x}2\pi f}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

Assim a partir da medida da tensão RMS nos terminais das bobinas exploradoras pode ser obtido o fluxo que passa através dessas bobinas utilizando as equações:

$$\varphi_{m\acute{a}x} = \frac{e_{ef}\sqrt{2}}{N2\pi f} \quad (23)$$

ou

$$\varphi_{m\acute{a}x} = \frac{e_{ef}}{4,44Nf} \quad (24)$$

### 6.1.3.3 Cálculo da corrente no secundário.

Para medição indireta e cálculo da corrente que circula pelo cilindro secundário, será utilizada uma bobina de Rogowski cujo funcionamento foge ao escopo deste trabalho, projetada especialmente para esse fim. A bobina será posicionada conforme a figura 24 (a), na qual o sensor está instalado em um secundário de alumínio.

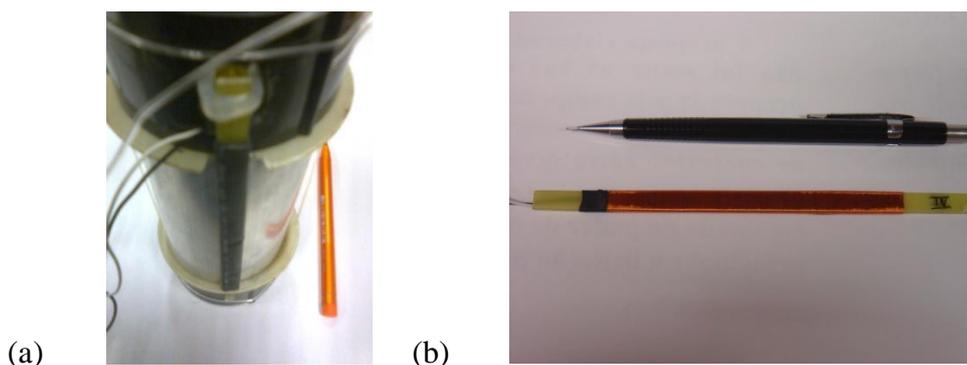


Figura 24: (a) Bobina de Rogowski instalada na posição de medição. (b) Detalhe da bobina de Rogowski sem a capa isolante termocontrátil.

No ensaio em regime permanente, os parâmetros de interesse, tanto medidos quanto os calculados, são grandezas eficazes, sendo que isso simplifica sensivelmente os cálculos principalmente pelo fato da corrente ser senoidal. Dessa forma foi utilizada uma bobina de calibração a partir da qual foi extraído o gráfico da figura 25. Pode ser observada na curva a condição de linearidade na saída do sensor.

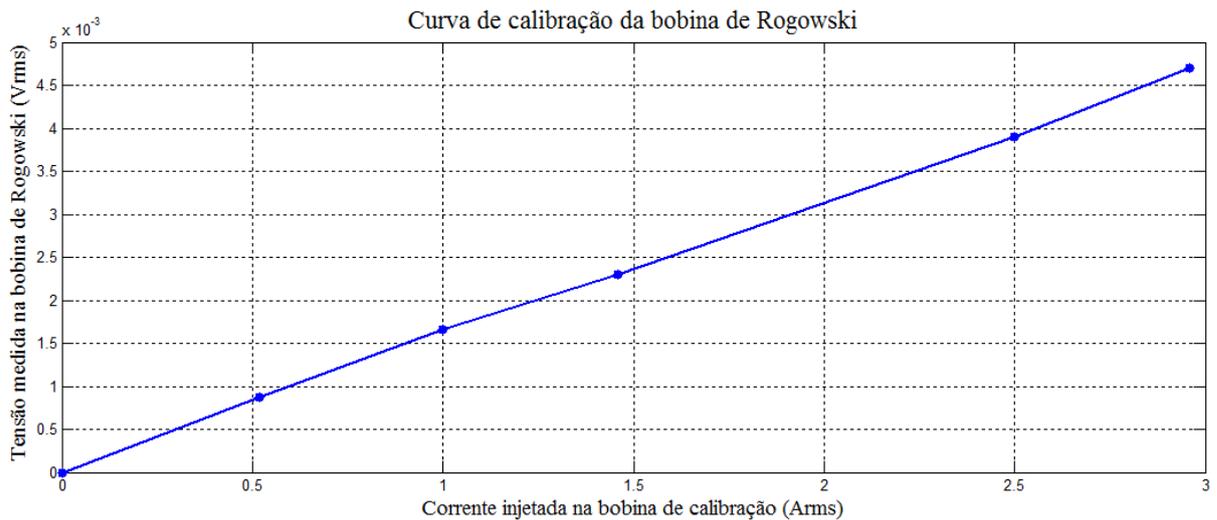


Figura 25: Curva de calibração da bobina de Rogowski.

A bobina de calibração, mostrada na figura 26, é formada por 78 espiras e simula uma corrente distribuída na área equivalente à soma das seções transversais dos condutores dessas espiras. Esta é uma aproximação do que ocorre, pois não se saberá exatamente a distribuição das correntes que circularão pelo cilindro.

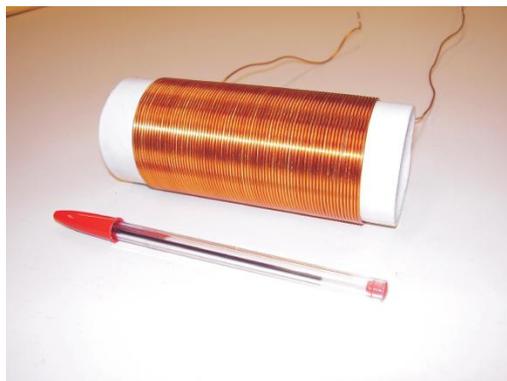


Figura 26: Bobina para calibração, simulando cilindro condutor.

Dessa forma, para uma corrente de 78A circulando no circuito será medida, nos terminais da bobina de Rogowski, uma tensão eficaz de 1,66mV. De uma forma mais genérica pode ser utilizada a equação (25) para o cálculo da corrente no secundário em regime permanente.

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{2 \times 10^{-5}} \quad (25)$$

## 6.2 ENSAIO EM REGIME TRANSITÓRIO

### 6.2.1 Configuração utilizada

O ensaio em regime transitório visa verificar se o dispositivo efetivamente limitará uma sobre corrente que será provocada durante o ensaio. Além disso, pretende-se monitorar também possíveis sobre tensões na bobina primária, o comportamento do fluxo magnético no núcleo e próximo dele e, finalmente, medir através da bobina de Rogowski qual a corrente que estará circulando pelo enrolamento secundário no momento de atuação do limitador.

Para se ter uma dimensão da real atuação do dispositivo, será feita inicialmente a medição da falta simulada sem qualquer elemento de limitação. O resultado desse teste inicial, aliado aos parâmetros medidos durante o ensaio em regime permanente permitirá que, por comparação, sejam facilmente destacadas incoerências nos resultados.

A figura 27 ilustra os resultados esperados do ensaio transiente de um limitador de corrente supercondutor. As curvas  $i_1$ ,  $i_n$  e  $i_2$  representam respectivamente a corrente de falta, a corrente antes da falta e a corrente após a limitação do limitador. Também se pode comparar o tempo de atuação ( $t_1 - t_2$ ) do limitador com o médio tempo de atuação ( $t_1 - t_3$ ) de uma proteção usual em sistemas elétricos de potência.

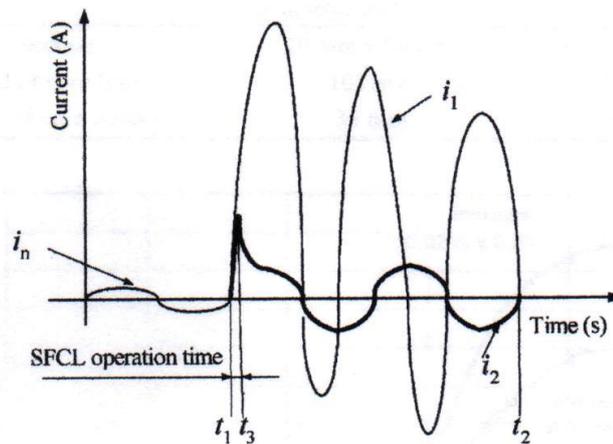


Figura 27: ilustração dos resultados de um ensaio transiente.

Dessa forma será utilizada uma pré-carga, cuja corrente deverá estar abaixo do necessário para o *quench*, conectada em estrela será ligada ao limitador que por sua vez será conectado à linha. Paralelamente à pré-carga será ligada a chave ou circuito responsável por elevar quase que instantaneamente a corrente na linha conforme pode ser visto na figura 28.

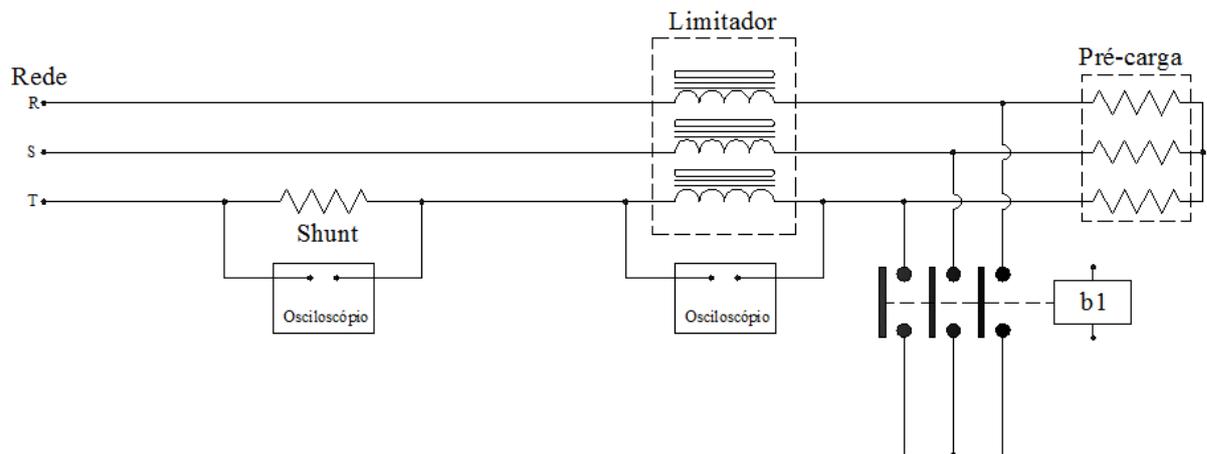


Figura 28: Diagrama de ligações para ensaio em regime transitório.

## 6.2.2 Medições realizadas e instrumentos utilizados

Neste ensaio serão realizadas as mesmas medições descritas na seção 6.1.2 sendo que enquanto no regime permanente seriam realizadas várias medições tendo como referência a elevação gradativa da corrente da linha, neste ensaio o ponto de interesse é o momento de

ocorrência de uma falta. Os instrumentos utilizados para as medições também podem ser os mesmos do primeiro ensaio.

### **6.2.3 Teoria envolvida**

Fundamentalmente, o que diferencia a análise dos parâmetros medidos no ensaio em regime transitório daqueles adquiridos em regime permanente é que neste último a corrente próxima de uma senoidal perfeita sendo que isso não ocorre no transiente. Esta diferença modifica as condições de cálculo do fluxo magnético e da corrente que circula no secundário, pois em ambos os casos os resultados deverão ser calculados por métodos numéricos.

## 7. APLICACÃO DA METODOLOGIA DE ENSAIO

### 7.1 ENSAIO EM REGIME PERMANENTE

Frente à escassez de dados que possibilitem um cálculo mais preciso relacionado a valores previsíveis de impedância e o comportamento do material supercondutor nas diversas temperaturas, este ensaio será realizado utilizando-se materiais com parâmetros bem conhecidos como latão e alumínio para que seja feito um comparativo dos resultados.

Na figura 29 aparecem, em fotografia, os tubos utilizados nas medições em temperatura ambiente. Na foto da figura 30 pode ser vista a montagem que foi feita em laboratório.

Também foram coletados os dados com os criostatos cheios de nitrogênio líquido o que leva o Bi-2223 abaixo da sua temperatura crítica entrando na faixa de supercondutividade.



Figura 29: Tubos de Bi-2223, alumínio e latão utilizados no ensaio.



Figura 30: Foto da montagem para ensaio em regime permanente.

### 7.1.1 Módulo da impedância equivalente por fase

Seguindo a metodologia de ensaio, a qual foi detalhada no item 6.1, foram realizadas medições da corrente de linha e da tensão na bobina primária de uma das fases. A corrente de linha foi variada de zero 0,5A até 10A e os resultados estão registrados na tabela 1 conforme segue.

Tabela 1: Valores de tensão e corrente eficazes por fase medida no ensaio.

Corrente (Arms)	Sem secundário		Secundário de alumínio		Secundário de latão		Bi-2223 (T>Tc)		Bi-2223 (T<Tc)	
	V(Vrms)	Z (ohm)	V(Vrms)	Z (ohm)	V(Vrms)	Z (ohm)	V(Vrms)	Z (ohm)	V(Vrms)	Z (ohm)
0,50	5,40	10,80	2,45	4,90	3,00	6,00	5,44	10,88	5,30	10,60
1,00	11,13	11,13	5,55	5,55	6,75	6,75	11,50	11,50	11,80	11,80
1,50	15,80	10,53	7,30	4,87	9,60	6,40	16,20	10,80	16,00	10,67
2,00	20,10	10,05	10,30	5,15	12,70	6,35	21,00	10,50	21,30	10,65
2,50	24,32	9,73	12,60	5,04	15,80	6,32	24,70	9,88	24,30	9,72
3,00	28,00	9,33	15,30	5,10	19,30	6,43	28,90	9,63	27,80	9,27
3,50	31,44	8,98	17,90	5,11	21,60	6,17	32,10	9,17	31,50	9,00
4,00	34,80	8,70	20,50	5,13	24,40	6,10	34,70	8,68	34,20	8,55
4,50	37,70	8,38	22,40	4,98	27,10	6,02	38,50	8,56	38,00	8,44
5,00	40,80	8,16	25,20	5,04	30,20	6,04	41,80	8,36	40,00	8,00
5,50	43,90	7,98	27,80	5,05	32,80	5,96	44,50	8,09	45,00	8,18
6,00	46,80	7,80	30,00	5,00	35,10	5,85	47,80	7,97	47,30	7,88
6,50	49,70	7,65	31,90	4,91	37,50	5,77	50,01	7,69	49,80	7,66
7,00	53,00	7,57	34,50	4,93	40,26	5,75	53,00	7,57	52,50	7,50
7,50	55,70	7,43	36,80	4,91	42,20	5,63	55,70	7,43	55,30	7,37
8,00	59,00	7,38	39,00	4,88	44,40	5,55	58,70	7,34	58,40	7,30
8,50	61,60	7,25	39,80	4,68	46,90	5,52	60,60	7,13	60,20	7,08
9,00	64,70	7,19	41,90	4,66	48,70	5,41	63,60	7,07	63,20	7,02
9,50	67,60	7,12	44,47	4,68	50,30	5,29	65,00	6,84	64,10	6,75
10,00	70,70	7,07	45,50	4,55	53,20	5,32	67,20	6,72	67,00	6,70

Na figura 31 podem ser observados graficamente os valores dos módulos da impedância, calculados a partir dos valores eficazes de tensão e corrente medidos, vista pela linha através do enrolamento primário para cada um dos casos. Esta visualização permite que se observe e compare de forma clara o comportamento das impedâncias.

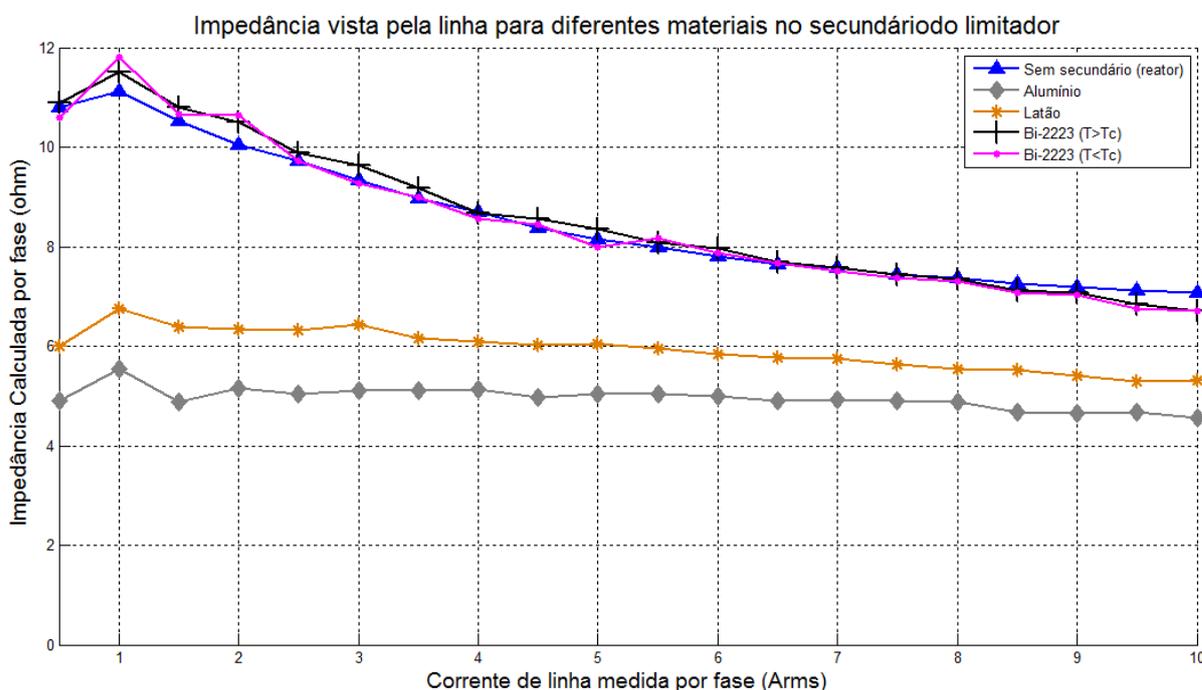


Figura 31: Gráfico das Impedâncias calculadas para regime permanente.

### 7.1.2 Bobina exploradora interna e externa

A partir das medidas de tensão eficaz registradas pelas bobinas exploradoras internas e externas e do conhecimento dos outros parâmetros necessários como o número de espiras dessas bobinas e a frequência da rede, será utilizada a equação (24) para o cálculo do fluxo magnético que atravessa essas bobinas.

Nas tabelas abaixo estão registradas as tensões medidas e os resultados dos cálculos.

Tabela 2: Valores relativos a medições na bobina exploradora interna.

Corrente (Arms)	Sem secundário		Secundário de alumínio		Secundário de latão		Bi-2223 (T>Tc)		Bi-2223 (T<Tc)	
	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)
0,50	0,78	0,08	0,28	0,03	0,40	0,04	0,79	0,08	0,80	0,08
1,00	1,64	0,17	0,63	0,07	0,86	0,09	1,70	0,18	1,68	0,18
1,50	2,28	0,24	0,84	0,09	1,24	0,13	2,34	0,25	2,30	0,24
2,00	2,84	0,30	1,18	0,13	1,64	0,17	3,02	0,32	3,10	0,33
2,50	3,44	0,37	1,47	0,16	2,04	0,22	3,50	0,37	3,20	0,34
3,00	3,92	0,42	1,80	0,19	2,48	0,26	4,05	0,43	4,00	0,42
3,50	4,34	0,46	2,12	0,22	2,77	0,29	4,43	0,47	4,41	0,47
4,00	4,68	0,50	2,40	0,25	3,10	0,33	4,68	0,50	4,60	0,49
4,50	4,94	0,52	2,60	0,28	3,42	0,36	5,02	0,53	5,00	0,53
5,00	5,20	0,55	2,96	0,31	3,77	0,40	5,28	0,56	5,18	0,55
5,50	5,43	0,58	3,25	0,34	4,07	0,43	5,50	0,58	5,43	0,58
6,00	5,65	0,60	3,50	0,37	4,30	0,46	5,74	0,61	5,70	0,60
6,50	5,90	0,63	3,70	0,39	4,55	0,48	5,91	0,63	5,88	0,62
7,00	6,13	0,65	3,95	0,42	4,78	0,51	6,14	0,65	6,11	0,65
7,50	6,34	0,67	4,21	0,45	4,92	0,52	6,33	0,67	6,28	0,67
8,00	6,58	0,70	4,40	0,47	5,08	0,54	6,52	0,69	6,44	0,68
8,50	6,77	0,72	4,43	0,47	5,24	0,56	6,65	0,71	6,67	0,71
9,00	6,98	0,74	4,60	0,49	5,36	0,57	6,84	0,73	6,90	0,73
9,50	7,20	0,76	4,82	0,51	5,45	0,58	6,92	0,73	6,95	0,74
10,00	7,43	0,79	4,83	0,51	5,61	0,60	7,05	0,75	7,01	0,74

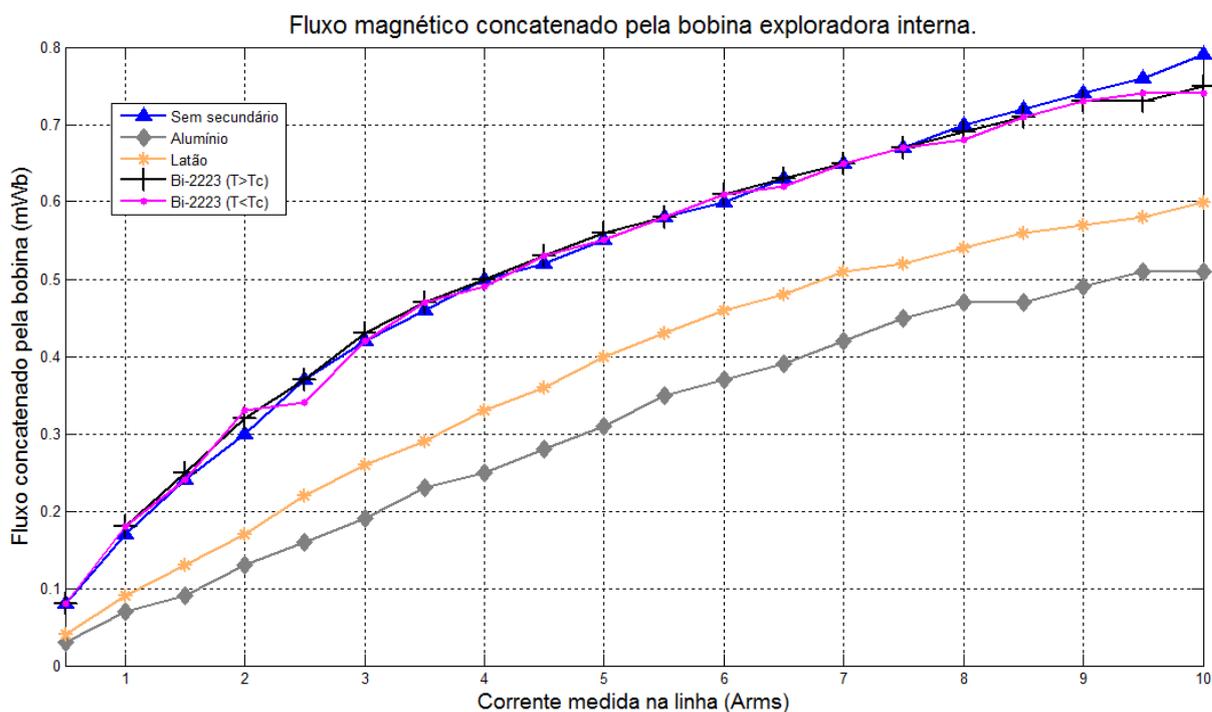


Figura 32: Gráfico do fluxo magnético eficaz confinado no núcleo.

### 7.1.3 Bobina exploradora externa

Tabela 3: Valores relativos a medições na bobina exploradora externa.

Corrente (Arms)	Sem secundário		Secundário de alumínio		Secundário de latão		Bi-2223 (T>Tc)		Bi-2223 (T<Tc)	
	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)	V(Vrms)	Fluxo (mWb)
0,50	0,81	0,09	0,29	0,03	0,40	0,04	0,83	0,09	0,82	0,09
1,00	1,71	0,18	0,67	0,07	0,90	0,10	1,77	0,19	1,73	0,18
1,50	2,40	0,25	0,89	0,09	1,30	0,14	2,47	0,26	2,45	0,26
2,00	3,00	0,32	1,24	0,13	1,73	0,18	3,20	0,34	3,15	0,33
2,50	3,65	0,39	1,57	0,17	2,15	0,23	3,70	0,39	3,72	0,39
3,00	4,19	0,44	1,91	0,20	2,63	0,28	4,30	0,46	4,28	0,45
3,50	4,63	0,49	2,24	0,24	2,92	0,31	4,70	0,50	4,67	0,50
4,00	4,97	0,53	2,55	0,27	3,30	0,35	4,97	0,53	4,95	0,53
4,50	5,26	0,56	2,80	0,30	3,65	0,39	5,33	0,57	5,34	0,57
5,00	5,50	0,58	3,17	0,34	4,04	0,43	5,62	0,60	5,58	0,59
5,50	5,80	0,62	3,50	0,37	4,37	0,46	5,85	0,62	5,81	0,62
6,00	6,04	0,64	3,70	0,39	4,66	0,49	6,14	0,65	6,10	0,65
6,50	6,30	0,67	3,96	0,42	4,88	0,52	6,34	0,67	6,28	0,67
7,00	6,56	0,70	4,27	0,45	5,14	0,55	6,58	0,70	6,55	0,69
7,50	6,80	0,72	4,55	0,48	5,30	0,56	6,79	0,72	6,72	0,71
8,00	7,09	0,75	4,80	0,51	5,48	0,58	7,02	0,74	7,04	0,75
8,50	7,30	0,77	4,80	0,51	5,68	0,60	7,18	0,76	7,16	0,76
9,00	7,56	0,80	5,00	0,53	5,82	0,62	7,44	0,79	7,42	0,79
9,50	7,80	0,83	5,23	0,55	5,93	0,63	7,56	0,80	7,54	0,80
10,00	7,95	0,84	5,27	0,56	6,15	0,65	7,70	0,82	7,68	0,81

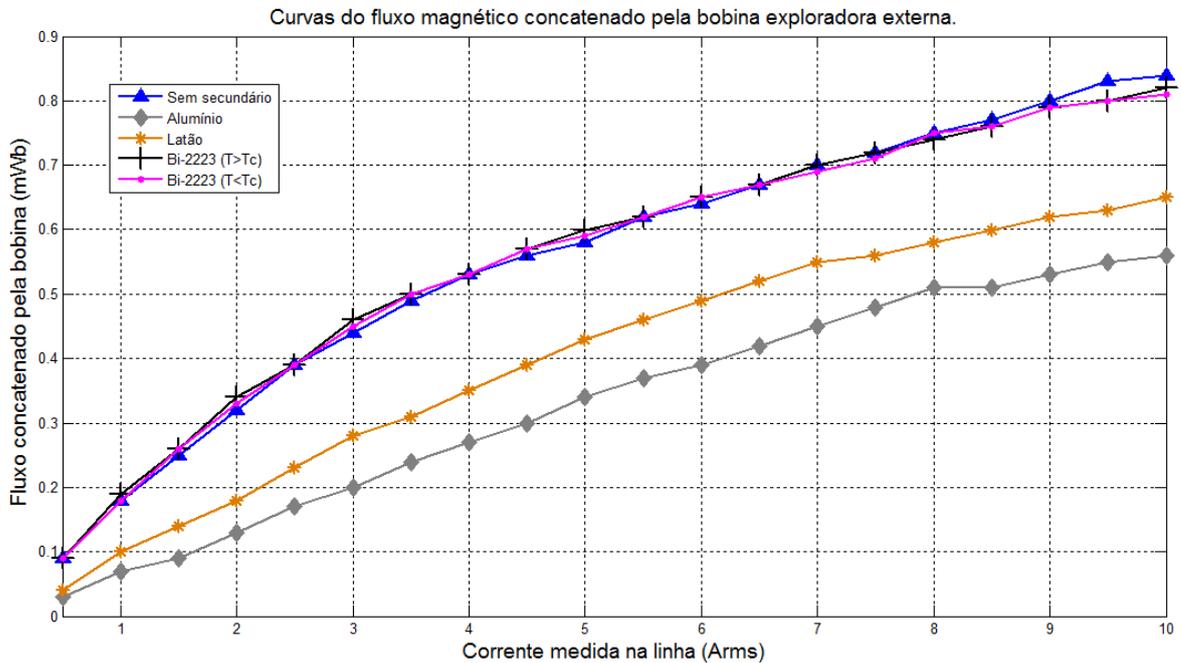


Figura 33: Gráfico do fluxo magnético eficaz do núcleo somado ao disperso.

### 7.1.4 Fluxo disperso pelo núcleo

Tabela 4: Valores calculados de fluxo magnético disperso pelo núcleo.

Corrente (Arms)	Fluxo disperso mWb (diferença entre fluxo observado pelas bobinas exploradoras interna e externa.				
	Sem secundário	Secundário de alumínio	Secundário de latão	Bi-2223 (T>Tc)	Bi-2223 (T<Tc)
0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
1,50	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
2,00	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
2,50	0,02	0,01	0,01	0,02	0,06
3,00	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03
3,50	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03
4,00	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04
4,50	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04
5,00	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04
5,50	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
6,00	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04
6,50	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04
7,00	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05
7,50	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05
8,00	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06
8,50	0,06	0,04	0,05	0,06	0,05
9,00	0,06	0,04	0,05	0,06	0,06
9,50	0,06	0,04	0,05	0,07	0,06
10,00	0,06	0,05	0,06	0,07	0,07

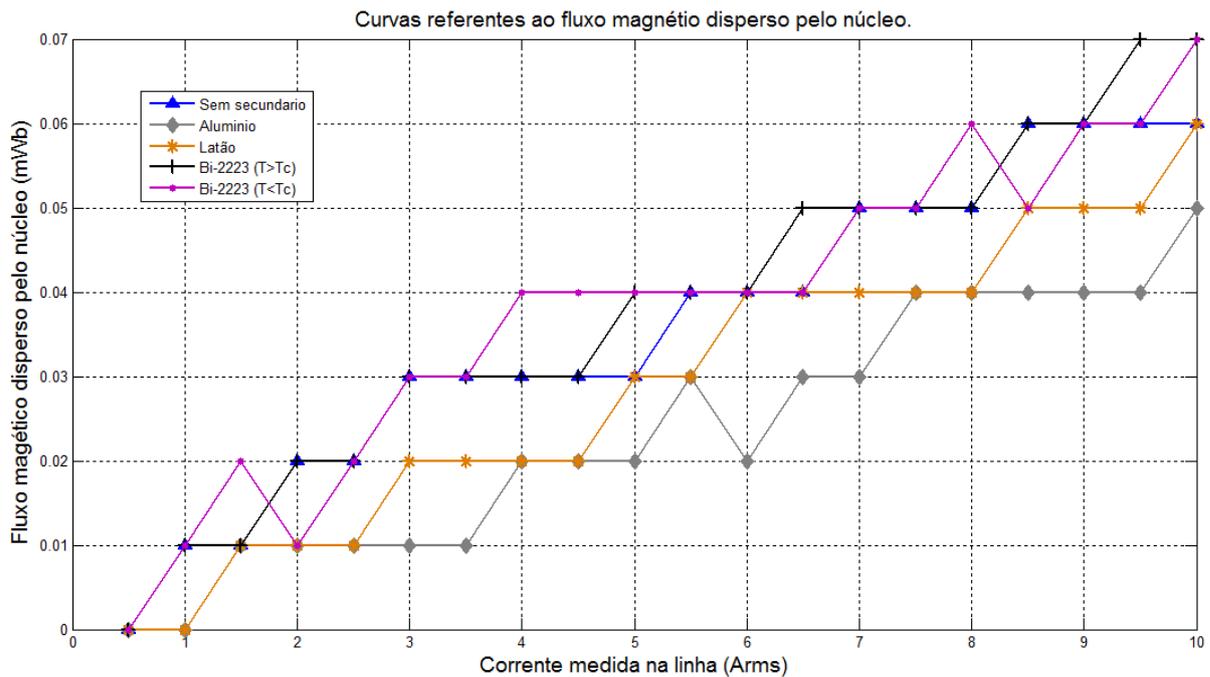


Figura 34: Gráfico do fluxo magnético eficaz disperso pelo núcleo.

## 7.2 ENSAIO EM REGIME TRANSITÓRIO

### 7.2.1 Adaptações no método durante ensaios

Inicialmente foram realizados ensaios, conforme a configuração da figura 28, em que é utilizada uma pré-carga ligada em estrela conectada à saída do limitador e, em paralelo a essa pré-carga, um elemento capaz de causar um pico de tensão, simulando uma falta. O elemento utilizado em primeiro momento foi um motor elétrico trifásico com uma relação  $I_P/I_N$  de 7,6, o que causaria um pico de corrente suficiente para a atuação do limitador.

Porém, durante os testes, observou-se que a queda de tensão nas bobinas primárias, que era alterada conforme era alterado o material usado como secundário, modificava a tensão aplicada ao motor no momento da partida. Isto alterava tanto o pico de corrente quanto o tempo que a máquina levava para atingir o regime permanente, prejudicando as comparações.

Além disso, não foi observada nenhuma curva que confirmasse, sem sombra de dúvidas, a atuação do limitador. Uma possibilidade era de que a corrente elétrica drenada pela pré-carga já estivesse provocando a atuação do limitador. Dessa forma o diagrama de ligações foi alterado durante os testes para o que aparece na figura 35 do qual a pré-carga foi retirada.

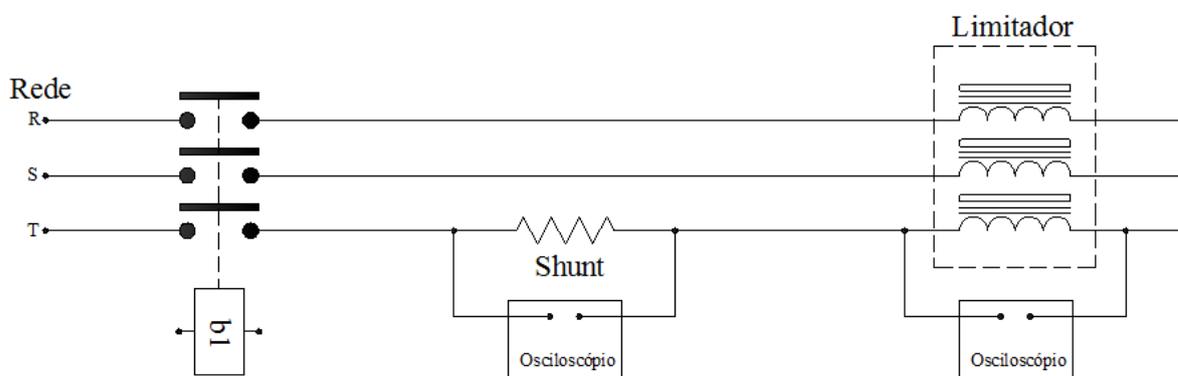


Figura 35: Novo diagrama de ligações para ensaio em regime transitório.

### 7.2.2 Bobina de Rogowski

Os sinais de tensão medidos na saída da bobina de Rogowski durante o ensaio transiente apresentaram uma forte distorção conforme pode ser visto na figura 36. Como essa distorção não foi visualizada durante a calibração fez-se um segundo teste em que se retirou o tubo secundário do qual estaria sendo medida a corrente. O resultado, conforme pode ser visto na figura 37, é que, quando em funcionamento, o secundário está imerso em um campo magnético que altera a leitura da bobina de Rogowski.

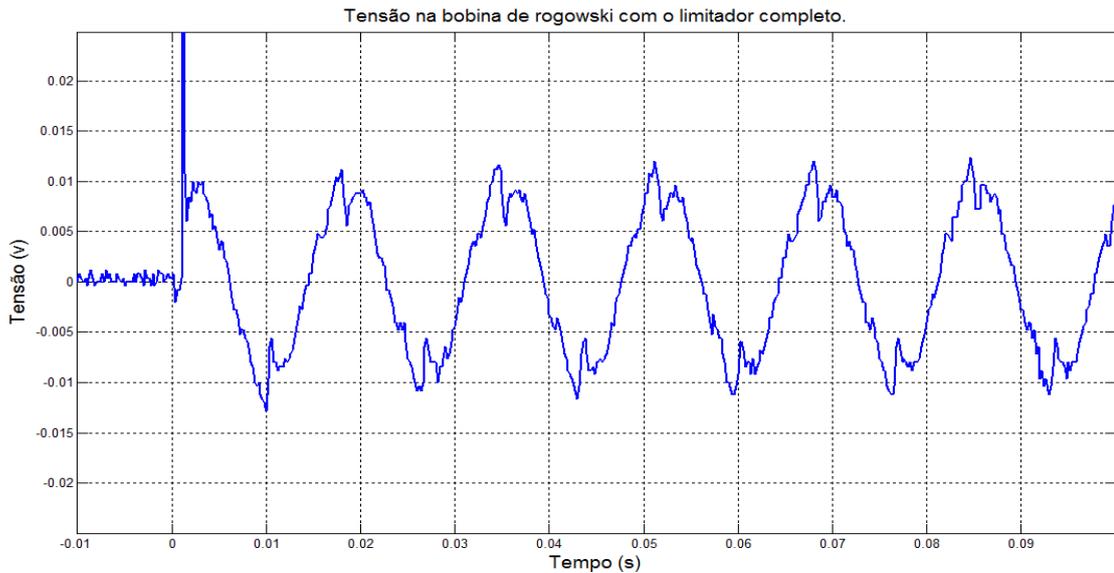


Figura 36: Tensão na bobina de Rogowski com limitador completo.

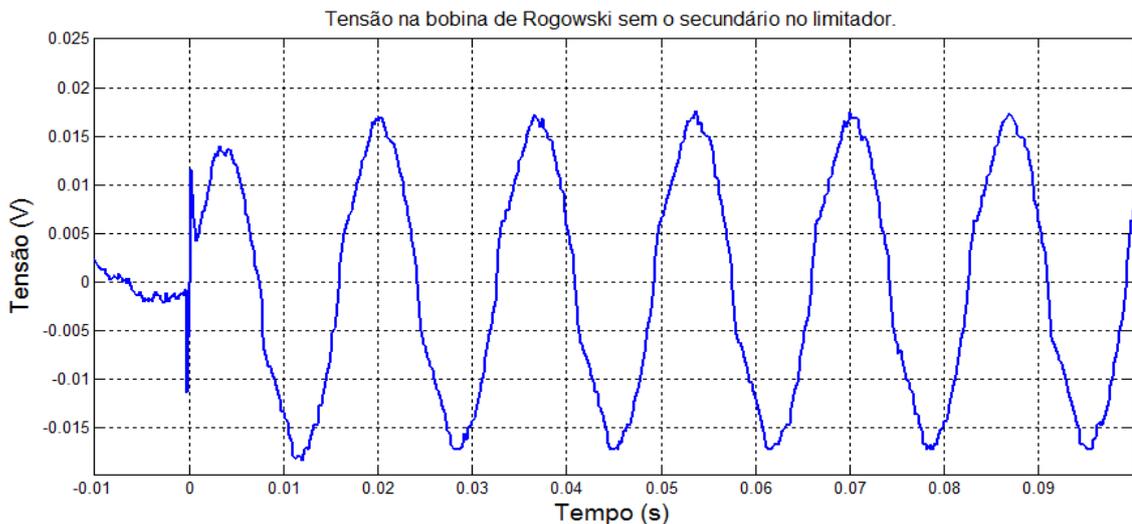


Figura 37: Tensão na bobina de Rogowski no criostato, porém sem secundário.

### 7.2.3 Impedância em regime transitório

Os gráficos de 36 a 39 contêm valores medidos simultaneamente durante o ensaio em regime transiente.

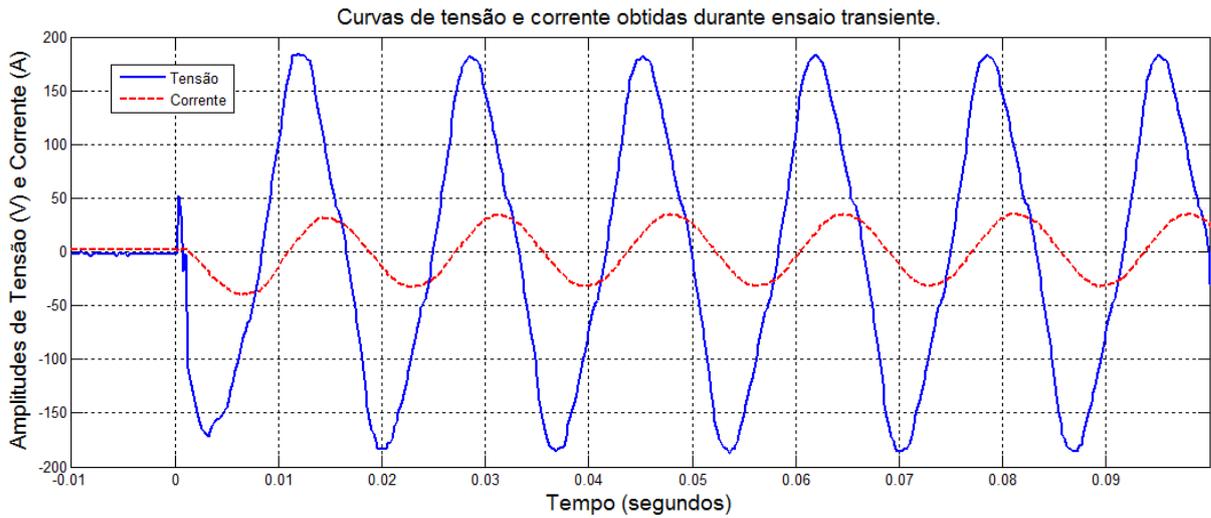


Figura 38: Tensão na bobina primária e corrente de linha em regime transiente.

### 7.2.4 Bobina exploradora interna e externa

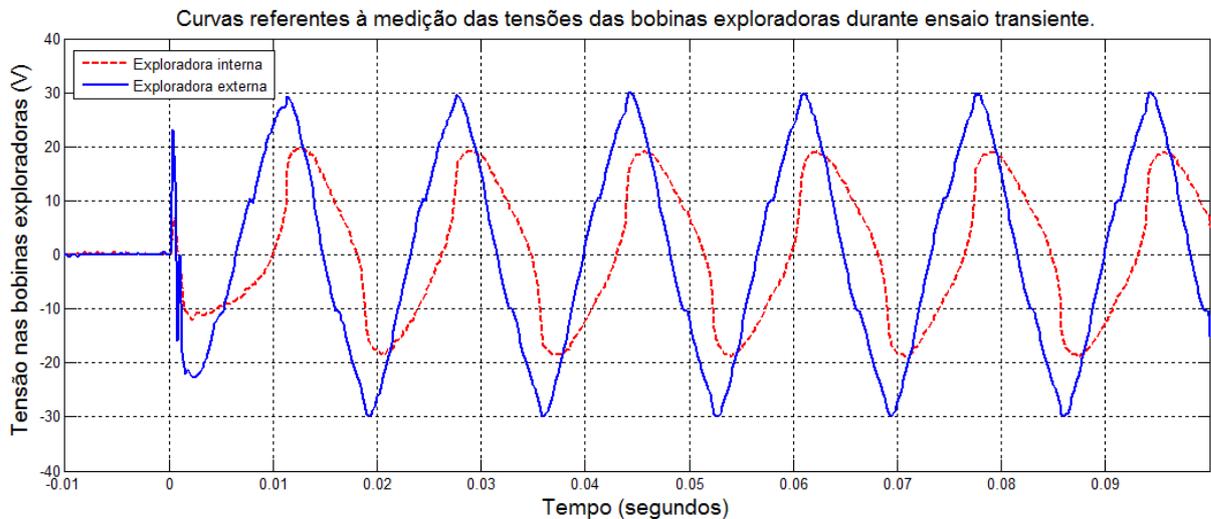


Figura 39: Sinal das bobinas exploradoras durante ensaio transiente.

## 8. ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir do gráfico da figura 31 pode ser observado que o comportamento da impedância do limitador quando está sem um secundário é bastante similar à situação em que o secundário utilizado é o Bi-2223 com  $T > T_c$ . A partir desse resultado conclui-se que a resistividade desse material a temperatura ambiente é alta de tal forma que sua característica V- I (tensão por corrente) conforme figura 40 acompanha a do ensaio sem o secundário o qual caracteriza uma impedância infinita.

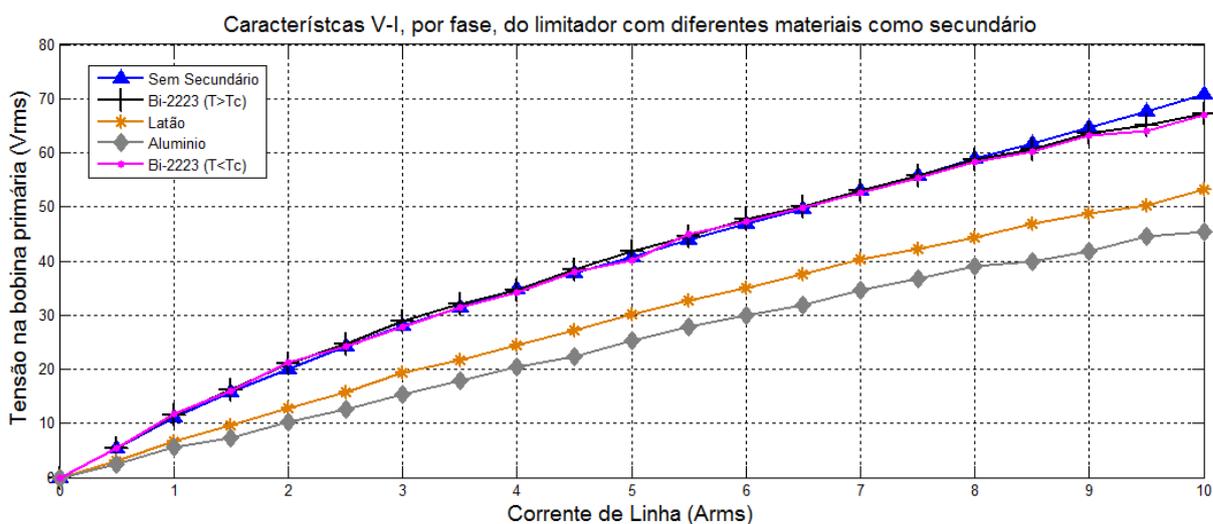


Figura 40: Curvas da característica V-I com diferentes materiais como secundário.

As curvas relativas aos ensaios com os secundários de latão e alumínio atestam a coerência dos resultados, visto que o alumínio, que possui resistividade menor que o latão, produz uma impedância menor em toda a faixa de corrente examinada.

Porém, quando é observada a curva relativa à impedância vista pelo primário do limitador com o Bi-2223 imerso em nitrogênio ( $T < T_c$ ), surpreendentemente nota-se que seu comportamento acompanha os casos em que o limitador está sem seu secundário ou com Bi-2223 mas com  $T > T_c$ . Este fato por si só já indica um comportamento que não está de acordo com o previsto, sendo que podem ser cogitadas duas possibilidades, logicamente partindo-se do princípio de que a cerâmica supercondutora utilizada esteja de acordo com as

características fornecidas pelo fabricante. A primeira é de o *quench* ter ocorrido com uma corrente muito baixa, estando este fato possivelmente relacionado ao campo magnético dentro da qual o supercondutor está imerso bem como às perdas CA. A segunda é a possibilidade de o material não ter entrado em momento algum no estado supercondutor.

Outra análise que converge para a conclusão de que a cerâmica não esteve em supercondução durante o ensaio, é a feita sobre o comportamento do fluxo magnético no núcleo, monitorado através das bobinas exploradoras. No período em que o secundário encontra-se em estado supercondutor a tendência seria a expulsão do fluxo magnético do interior do núcleo, porém como pode ser visto na figura 41, esta blindagem não ocorre, permanecendo pequena a diferença entre os sinais captados das bobinas interna e externa.

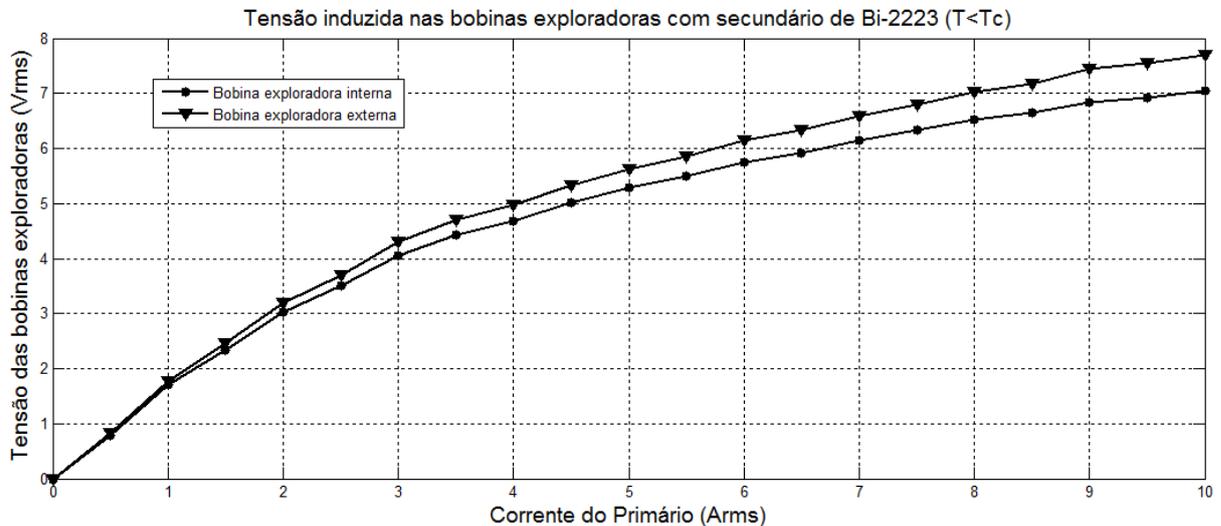


Figura 41: Tensões nas bobinas exploradoras, interna e externa, em regime permanente.

Finalmente a figuras 38 e 39 onde são mostrados os gráficos V-I e das tensões nas bobinas exploradoras respectivamente, não é observada nenhuma oscilação ou queda na corrente instantânea medida que indique atuação do limitador, pois a corrente de pico na linha permanece próxima dos 30A até a interrupção do ensaio.

## 9. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia de ensaio para um dispositivo experimental projetado e construído no Laboratório de Máquinas Elétricas Acionamentos e Energia da UFRGS. Neste dispositivo, um limitador de corrente supercondutor resistivo, é utilizado um material supercondutor com poucas características de funcionamento conhecidas ou informadas pelo fabricante. Dessa forma buscou-se desenvolver uma metodologia baseada na comparação dos parâmetros de funcionamento de outros materiais disponíveis com características conhecidas e, a partir dos resultados, concluir quanto ao efetivo funcionamento do dispositivo.

Durante a aplicação do método de ensaio foram feitas algumas modificações, o que é comum à rotina de testes de um dispositivo experimental. Com base nos resultados, pode-se afirmar que a metodologia proposta atendeu o objetivo de avaliar o efetivo funcionamento do dispositivo. Observou-se, para este caso, que o dispositivo não atuou como estava previsto em projeto, levando à necessidade de maior investigação no funcionamento do mesmo.

## **10. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Existem muitas possibilidades em potencial para estudos futuros com relação ao dispositivo limitador supercondutor. Uma delas seria o desenvolvimento de um sistema automático de aquisição de dados para monitoração dos parâmetros de funcionamento.

Também poderiam ser estudadas maneiras de obter-se os parâmetros apenas dos tubos supercondutores, pois a falta do conhecimento dessas características foi um dos fatores que dificultou a interpretação dos resultados de cada ensaio.

Finalmente, seria interessante uma análise mais detida sobre a instrumentação utilizada para o levantamento das características do dispositivo e a verificação da influencia do aspecto construtivo do dispositivo sobre os parâmetros obtidos.

## 11. REFERÊNCIAS

1. **WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION.** *Electrical Transmission and distribution Reference Book*. East Pittsburg, PA : s.n., 1950.
2. **Homrich, Roberto Petry.** Limitador de Corrente Trifásico de 13,8 kV - 112,5 kVA. *Projeto Submetido ao Edital Universal* . Porto Alegre, RS, Brasil : s.n., 31 de maio de 2006.
3. **Paul, W., Rhyner, J. e Platter, F.** Superconducting Fault Current Limiters Based on High Tc Superconductors. *IEEE*. [Online] 8 de junho de 1995. [Citado em: 20 de setembro de 2009.] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=405171>.
4. **Lanes, Matusalem Martins.** Dissertação de Mestrado. *Limitador Eletrônico de Corrente de Curto-circuito Baseado em Circuito Ressonante Controlado por Dispositivo Semicondutor de Potência*. Juiz de Fora, MG, Brasil : s.n., Agosto de 2006.
5. **Schmitt, Heino.** Fault Current Limiters Report on the Activities of CIGRE WG A3.16. *IEEE*. [Online] 16 de outubro de 2006. [Citado em: 6 de abril de 2010.] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1709205>.
6. **Tinkham, Michael.** *Introduction to Superconductivity*. New York : Dover Publications, Inc., 1996.
7. **Homrich, Roberto Petry.** Tese de Doutorado. *Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo Monofásico: Projeto, Construção e Ensaio*. Campinas, SP, Brasil : s.n., 26 de novembro de 2001.
8. **Fosshein, Kristian e Sudbo, Asle.** *Superconductivity Physics and Applications*. West Sussex : John Wiley & Sons Ltd., 2004.
9. **Fitzgerald, A. E., Charles Kingsley, Jr. e Umas, Stephen D.** *Máquinas Elétricas*. Porto Alegre : Bookman, 2006.