

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

TARCÍSIO DA SILVA LESSA

SIMULAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO
SUPERCONDUTORES RESISTIVOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE
DISTRIBUIÇÃO REAL

NITERÓI, RJ

2018

TARCÍSIO DA SILVA LESSA
MATRÍCULA: M054.116.013

SIMULAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO
SUPERCONDUTORES RESISTIVOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE
DISTRIBUIÇÃO REAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientadores: Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

Prof. Marcio Zamboti Fortes, Dr.

Niterói, RJ

2018

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

M187 Lessa, Tarcísio da Silva

Simulação de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores em um sistema de distribuição real / Tarcísio da Silva Lessa – Niterói, RJ: [s.n.], 2018. 135 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2018.

Orientador: Guilherme Gonçalves Sotelo e Marcio Zamboti Fortes.

1. Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor. 2. Supercondutividade. 3. Faltas. 4. ATPDraw. 5. Rede de Distribuição. 6. curto – circuito. 7. OpenDSS. I. Título.

CDD 621.3191

TARCÍSIO DA SILVA LESSA

SIMULAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES
RESISTIVOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO REAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Aprovado em ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Marcio Zamboti Fortes, Dr.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Felipe Sass, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Antônio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Niterói, RJ

2018

Dedico este trabalho ao meu pai Isaías, minha mãe Enilça e minha irmã Letícia por todo apoio e força durante momentos adversos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal Fluminense (UFF) pela oportunidade da realização do mestrado oferecido pelo programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, através do qual busca a capacitação de profissionais para atuarem como docentes e profissionais técnicos, no mercado de trabalho que se apresenta competitivo.

Agradeço de maneira especial aos meus orientadores Guilherme Gonçalves Sotelo e Márcio Zamboti Fortes por todo o suporte, dedicação, cooperação, paciência e incentivo oferecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos, André Tiago Queiroz, Daniel Souto Lopes, Carlos Marcelo Ari Jimenez e Braulio Chuco Paucar pela cooperação para o esclarecimento de dúvidas de fundamental relevância para realização deste trabalho.

Aos meus pais, Isaias da Silva Lessa e Enilça da Silva Lessa pelos ensinamentos, incentivos, pelo apoio nos momentos difíceis e por não pouparem esforços para que pudesse estar fazendo este curso.

Aos meus familiares, a minha irmã Letícia Lessa Picollo, minha avó Enila Viana pela ajuda nos momentos mais adversos.

Agradeço a Deus pelo porto seguro a ser recorridos sempre diante dos mais variados percalços da vida acadêmica e pessoal, me guiando, protegendo e iluminado em todos os momentos.

RESUMO

O aumento dos níveis de curto-circuito nas subestações podem causar superação dos limites dos equipamentos dimensionados, tais como: transformadores, barramentos, disjuntores e até a linha de transmissão, etc. Os limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores resistivos (*Resistive Superconducting Fault Current Limiters – R-SFCL*) de fitas de segunda geração (2G) têm se mostrado na literatura uma potencial solução para este problema. No presente trabalho um R-SFCL é aplicado a um sistema de distribuição real que é simulado a partir de dados obtidos com uma concessionária, com a finalidade de reduzir estes níveis de curto-circuito para valores aceitáveis da rede elétrica analisada, comprovando a funcionalidade do mesmo. O *software* livre mais utilizado para avaliação de regimes permanentes e transitórios no Sistema Elétrico de forma mundial é o ATPDraw (*Alternative Transients Program*). Nesta dissertação o R-SFCL foi modelado neste *software* e validado, utilizando analogia eletrotérmica baseado em fitas de segunda geração de supercondutores de alta-temperatura crítica (HTS – *High-Temperature Superconductors*). A rede de distribuição real utilizada tem 16,7 km atendendo 1.550 clientes distribuídos entre os 20 bairros de um município de Búzios no Estado do Rio de Janeiro. R-SFCL de fitas de 2G (R-SFCL 2G) foi dimensionado para rede de distribuição real estudada. Desta forma, apresenta-se uma sequência para este dimensionamento que pode ser utilizada em projetos futuros. Foram avaliados quatro cenários ao longo desta pesquisa, propondo-se o índice de eficiência de limitação da corrente de curto-circuito para cada cenário observando numericamente que o R-SFCL 2G contribui efetivamente na limitação dos níveis de corrente de curto-circuito. São apresentados os gráficos da tensão em barramentos críticos da rede no momento do curto-circuito, que permitem concluir que o R-SFCL 2G diminui o afundamento da tensão, mantendo o nível da tensão praticamente sem alteração nos sistemas elétricos de distribuição. Sendo assim, o R-SFCL 2G pode ainda evitar a troca de equipamentos em cenários de expansão dos sistemas elétricos.

Palavras-chave: Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor. Faltas. ATPDraw. Rede de Distribuição.

ABSTRACT

Due to the increase of the fault current levels in the substations, the objective of this work is to present the Resistive Superconducting Fault Current Limiters (R-SFCL) of second - generation (2G) tapes applied to an actual distribution system limiting these fault current to levels acceptable values of the electrical network analyzed, proving the efficiency of the same. The most widely used software in the Electrical System worldwide for the evaluation of permanent and transient regimes is the ATPDraw (Alternative Transients Program). In this dissertation the R-SFCL was modeled in this software and validated using electrothermal analogy based on second generation tapes of high-temperature superconductors (HTS). The actual distribution network used, researched in the market and modeled and validated in ATPDraw, has 16.7 km serving 1,550 clients distributed among the 20 neighborhoods in the city of Búzios. The R-SFCL model of 2G tapes (R-SFCL 2G), modeled in the ATPDraw and validated, was scaled to the actual distribution network analyzed. In this way, a sequence was presented for this design that can be used in future projects. Four scenarios were evaluated throughout the study, thus creating the fault current limiting efficiency index for each scenario. Numerically observing that the R-SFCL 2G effectively contributes to the limitation of fault current levels. And the graphs of voltage analysis at the time of the fault current are presented, thus concluding that the R-SFCL 2G improves the quality of power and stability of the electrical distribution systems. Thus, the R-SFCL 2G can also avoid the exchange of equipment in scenarios of expansion of electrical systems.

Keywords: Superconducting Fault Current Limiters. Electric Power Distribution Systems. Industrial Power Systems. Offshore Installations.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	3
1.2. OBJETIVO.....	4
1.3. DESCRIÇÃO E METODOLOGIA	4
1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	5
2. SUPERCONDUTIVIDADE E LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES.....	6
2.1. SUPERCONDUTIVIDADE.....	6
2.2. RESISTÊNCIA ZERO E EFEITO MEISSNER-OCHSENFELD.....	7
2.3. PARÂMETROS CRÍTICOS EM MATERIAIS SUPERCONDUTORES.....	10
2.4. SUPERCONDUTORES DO TIPO I E DO TIPO II.....	11
2.5. SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA	14
2.6. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES ..	16
2.7. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES RESISTIVOS.....	19
2.8. TESTE E MODELAGEM DE LIMITADORES DE CORRENTE NO BRASIL	21
2.9. CURVA E - J.....	23
3. MODELAGEM DO LIMITADOR DE CORRENTE E DA REDE ELÉTRICA.....	26
3.1. LIMITADOR DE FITAS 2G - YBCO	26
3.2. EQUIVALENTE ELÉTRICO DO R-SFCL	27
3.3. ANALOGIA ELETROTÉRMICA PARA A MODELAGEM DO LIMITADOR	28
3.4. EQUIVALENTE TÉRMICO DO R-SFCL	32
3.5. O R-SFCL MODELADO NO ATPDRAW	34
3.6. VALIDAÇÃO DO R-SFCL NO ATPDRAW	37
3.7. MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO REAL NO ATPDRAW	40
3.8. SIMULAÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO..	45
4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO R-SFCL NA REDE.....	53
4.1. CENÁRIO 1 – FALTA NA BARRA 1:	54
4.2. CENÁRIO 2 – FALTA NA BARRA 6:	55
4.3. CENÁRIO 3 – FALTA NA BARRA 171:	57
4.4. CENÁRIO 4 – FALTA NA BARRA 335:	59
4.5. ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DA LIMITAÇÃO DE CORRENTE COM RELAÇÃO AOS CENÁRIOS	61
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	62
5.1. CONCLUSÕES.....	62

5.2. TRABALHOS FUTUROS 63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 65
APÊNDICE69
ANEXO I90

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: (a) Queda abrupta na resistividade do mercúrio em 4,2 K observada por Onnes [12] e (b) Queda da resistividade do supercondutor e dos metais normais [13].	7
Figura 2: Interação do campo aplicado e o campo desmagnetizante, resultando em densidade de fluxo magnético nula no interior do supercondutor [13].	9
Figura 3: Fotografia do fenômeno de levitação magnética, adaptada de [16].	10
Figura 4: Diagrama de fases de um supercondutor com a relação dos parâmetros J_c , T_c e H_c para supercondutores do Tipo I [3].	11
Figura 5: Diagrama de estados para o supercondutor do Tipo I (a) e supercondutor do Tipo II (b) [13].	12
Figura 6: Rede de vórtices triangular formada no estado misto [13]; (a) e a variação do campo magnético (b) e da densidade de superelétrons (c) ao longo do supercondutor.	14
Figura 7: Forma de onda típica de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor com os períodos de operação normal, curto-circuito e recuperação [13].	18
Figura 8: Ilustração de limitador supercondutor resistivo (a) e surgimento de <i>hot-spots</i> e desvio da corrente para o elemento <i>shunt</i> (b); adaptado de [13].	19
Figura 9: Circuito equivalente de um limitador supercondutor resistivo com elemento <i>shunt</i> [13].	20
Figura 10: Circuito equivalente utilizado para ensaio do R-SFCL [8].	21
Figura 11: Comparação entre as correntes sem limitador e limitada obtidas experimentalmente [8].	22
Figura 12: Variação da temperatura das camadas, obtidas via MATLAB. Adaptada de [8]. ..	23
Figura 13: Variação da resistência equivalente do R-SFCL, obtida via simulação MATLAB. Adaptada de [8].	23

Figura 14: Curva E - J de um supercondutor de alta temperatura em escala logarítmica [13].	25
Figura 15: Espessuras de cada camada da fita 2G YBCO modelo SF12100 da SuperPower; adaptada de [8].	26
Figura 16: Arranjo da bobina de R-SFCL adaptada de [8].	27
Figura 17: Seção transversal da fita 2G YBCO do limitador resistivo (a) e sua representação elétrica (b); adaptada de [13].	28
Figura 18: Circuito equivalente do protótipo de SFCL.	28
Figura 19: Elemento de volume infinitesimal para análise de condução de calor; adaptada de [3].	29
Figura 20: Modelo de linha elétrica por parâmetros distribuídos, composto por resistências em série e capacitâncias em paralelo [3].	31
Figura 21: Circuito RC equivalente para a linha de transmissão por parâmetros distribuídos [3].	32
Figura 22: Circuito termelétrico para resolver o comportamento térmico do módulo 2G-YBCO [11].	33
Figura 23: Fluxograma da rotina de simulação do R-SFCL programada no MODELS [25].	36
Figura 24: Circuito equivalente utilizado para simulação do R-SFCL no ATPDraw [25].	36
Figura 25: Correntes sem limitador e limitada, obtida via simulação ATPDraw [25].	38
Figura 26: Corrente limitada em escala menor, obtida via simulação ATPDraw [25].	38
Figura 27: Variação da resistência equivalente do R-SFCL, obtida via simulação ATPDraw [25].	39
Figura 28: Variação da temperatura das camadas, obtidas via ATPDraw [25].	39

Figura 29: Alimentador da cidade de Armação dos Búzios/RJ; [7].	41
Figura 30: Alimentador da cidade de Armação dos Búzios/RJ. Com disjuntor entre o secundário do transformador e a primeira barra [7].	46
Figura 31: Corrente total no secundário do transformador.	47
Figura 32: Corrente de curto-circuito no secundário do transformador.	49
Figura 33: Circuito equivalente do protótipo do R-SFCL dimensionado.	50
Figura 34: Arranjo da bobina do R-SFCL com <i>shunt</i> paralelo [6].	51
Figura 35: R-SFCL no secundário do transformador	51
Figura 36: Corrente com curto-circuito na Barra 1 para dimensionamento do <i>shunt</i>	52
Figura 37: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 1.	54
Figura 38: Comparação da medição da tensão no secundário do transformador com falta na Barra 1	55
Figura 39: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 6.	56
Figura 40: Comparação da medição da tensão no secundário do transformador com falta na Barra 6.	57
Figura 41: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 171.	58
Figura 42: Comparação da medição da tensão no secundário do transformador com falta na Barra 171.	59
Figura 43: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 335.	60
Figura 44: Comparação entre tensões sem e com limitador para falta na Barra 335.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros característicos dos principais supercondutores [13]:	13
Tabela 2 - Parâmetros do ensaio e simulação computacional; adaptada de [8].	21
Tabela 3- Propriedades análogas entre os sistemas térmicos e os sistemas elétricos.	33
Tabela 4 - Número de clientes por bairro [11].	41
Tabela 5 - Componente aplicados para simulação, via ATPDraw.	43
Tabela 6 - Análises das tensões de pré-faltas em regime permanente entre OpenDSS e ATPDraw [30].	43
Tabela 7 - Apresenta a composição probabilística entre dos tipos de faltas [31].	44
Tabela 8 - Faltas analisadas em cada cenário no OpenDSS e ATPDraw [30].	44
Tabela 9 - Indica o índice de eficiência dos 4 cenários.	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ATP	Alternative Transient Program
GD	Geração Distribuída
SFCL	Superconducting Fault Current Limiters
R-SFCL	Resistive Superconducting Fault Current Limiters
MATLAB	Matrix Laboratory
UFF	Universidade Federal Fluminense
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
HTS	High-temperature Superconductors
RD	Rede de Distribuição

1. INTRODUÇÃO

Atualmente tem existido uma necessidade de ampliação da oferta de energia devido ao aumento da demanda pela ampliação das cidades e da instalação de novas indústrias ou até mesmo com a modernização das cidades que, por exemplo, passarão a contar com o aumento de consumo devido ao uso de carros elétricos. Conforme a demanda pela energia elétrica aumenta a capacidade de geração e dos equipamentos dos sistemas elétricos aumentam para que seja possível fornecer a energia solicitada.

Além disso, com este aumento de demanda e atualmente com as restrições ambientais [1] o conceito de geração de energia sustentável através da chamada Geração Distribuída (GD) [2] cresce a cada dia.

Uma consequência direta, do aumento da carga instalada no sistema elétrico e da inserção da Geração Distribuída é o aumento dos níveis de curto-circuito e alterações nas tensões das barras da rede [3]. Assim, os equipamentos antes dimensionados e instalados no sistema podem não estarem preparados para suportarem essas modificações.

O aumento do nível de curto-circuito leva muitas vezes à superação dos limites de suportabilidade a curto-circuitos de equipamentos que não tenham sido projetados para os altos níveis do mesmo tais como linhas de transmissão, transformadores, barramentos e disjuntores. Os principais meios para resolver ou contornar este problema consistem na troca de todos os equipamentos superados, fazendo uma nova configuração no sistema ou no emprego de dispositivos limitadores de corrente. A troca de todos os equipamentos superados pode ser inviável, tanto economicamente quanto operacionalmente, devido à necessidade de longas paradas nas subestações. Modificações na rede, tais como o seccionamento de barramentos, a radialização de circuitos e a divisão em circuitos de menor capacidade, representam soluções provisórias, por reduzirem a flexibilidade e a confiabilidade do sistema. Os limitadores de corrente de falta são dispositivos utilizados para atenuar ou até mesmo bloquear os picos das altas correntes de curto-circuito com rapidez suficiente para que os disjuntores possam operar com segurança.

Os equipamentos convencionalmente utilizados para limitação de corrente são: reatores limitadores de corrente, transformadores de alta reatância e dispositivos pirotécnicos. No entanto estes limitadores convencionais além de dissiparem energia durante sua operação,

pois estão permanentemente conectados à rede, alteram o fator de potência dos circuitos exigindo a instalação de bancos de capacitores para sua correção. Sendo assim, novas tecnologias para limitação de corrente de curto-circuito estão disponíveis comercialmente e podem promover características operacionais mais interessantes para os sistemas elétricos industriais e comerciais. Estas novas tecnologias são denominadas como limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores resistivos (Resistive Superconducting Fault Current Limiters – R-SFCL). Atualmente existem equipamentos disponíveis e em desenvolvimento utilizando os materiais supercondutores para a limitação de curto-circuito.

No caso de limitadores de corrente de curto-circuito, o uso de supercondutores é justificado pelo fato destes materiais apresentarem propriedades intrínsecas que vão de encontro aos requisitos operativos ideais para um dispositivo limitador.

Limitadores de corrente a base de materiais supercondutores de alta temperatura crítica têm sido estudados por vários grupos de pesquisas e alguns já foram instalados em subestações da Europa e Ásia para testes, sendo considerados uma das tecnologias mais promissoras dentre os limitadores em desenvolvimento [4], [5], [6].

Os testes em campo vêm sendo realizados e têm demonstrado a existência de vantagens operacionais dos R-SFCL [7]. Entre as vantagens da utilização dos mesmos em relação aos dispositivos de limitação tradicionais, é possível citar: a corrente de curto-circuito é interrompida pelo disjuntor e não pelo próprio limitador, o limitador de corrente de curto-circuito supercondutor possui modo de falha seguro, independente de circuitos eletrônicos, apresenta impedância desprezível em condições normais de operação e evita o afundamento de tensão no momento da falta.

Dentro do contexto apresentado acima, realizar um estudo da dinâmica de um R-SFCL num sistema de distribuição real através de simulações com softwares de transitórios eletromagnéticos representa uma contribuição para a fronteira do conhecimento na área de sistemas de energia elétrica.

Neste trabalho foram realizadas simulações através da utilização do software livre mais conhecido do mercado para sistemas elétricos de regime transitórios e permanente, o ATPDraw (Alternative Transients Program). A importância de utilizar um software que permita fazer simulações em regime transitório consiste em analisar o sistema projetado, em relação a eventos que podem ultrapassar os limites de suportabilidade dos elementos

conectados neste sistema. Portanto, neste trabalho foi modelado um R-SFCL e uma rede de distribuição real para analisar a operação do limitador, a partir de 4 cenários relacionados a eventos de curto-circuito, para avaliar o afundamento da tensão e o módulo das correntes obtidas.

1.1. MOTIVAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES

Como relatado acima, as subestações existentes têm apresentado aumento dos níveis de curto-circuito, e a simples troca dos equipamentos representaria altos investimentos para solução desta questão. Baseado neste desafio motivou-se o estudo de R-SFCLs como solução para o problema dos níveis de curto-circuito, pois apresenta uma série de vantagens em relação às tecnologias tradicionais como: impedância nula em condições normais; rápida atuação na limitação da corrente (primeiro semiciclo); não utilização de dispositivos eletrônicos e; evita o afundamento de tensão no momento de ocorrência do curto-circuito.

A literatura apresenta diversos trabalhos acadêmicos sobre R-SFCLs, porém a grande parte está focada no estudo propriamente do R-SFCL e do seu comportamento [7], [8], [9], [10]. Existem alguns trabalhos que propuseram estudar o limitador numa rede de distribuição [3], [11], todavia a rede simulada apresentava muitas simplificações. Trabalhos que pretendiam simular uma rede mais complexa apresentavam um modelo simplório para o limitador. Dessa forma, não existiam trabalhos que simulavam uma rede de distribuição complexa baseada em dados obtidos numa rede real com um modelo de simulação do R_SFCL mais elaborado, como o modelo termoelétrico.

O trabalho que mais se aproximou da análise foi do (MAFRA, 2016) [3], onde analisou-se um caso específico de sistema elétrico industrial de plataformas de produção de petróleo e gás natural do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*), não fazendo uma análise de um sistema de distribuição típico. Neste estudo utilizou-se para simulação o *software* Matlab, porém o *software* do mercado mais utilizado mundialmente entre as empresas é o ATPDraw.

O trabalho de Sousa [7] apresenta uma modelagem no ATPDraw de estudo específico do R-SFCL, sem considerar um sistema de rede de distribuição, além disso o R-SFCL usado no trabalho de Sousa [7] era fabricado pela empresa alemã Nexans Superconductors Este dispositivo conhecido como MCP-BSCCO-2212 foi construído na forma de um tubo bifilar e a Nexans suspendeu a fabricação deste equipamento. Hoje no mercado a melhor tecnologia

para o R-SFCL é a baseada em fitas supercondutoras de segunda geração, pelo fato de apresentarem possibilidade de produção em larga escala [8].

Este trabalho visa contribuir com conhecimentos para o setor acadêmico e também para empresas de distribuição, apresentando o R-SFCL 2G modelado no ATPDraw, da mesma forma que foi modelada e simulada a rede de distribuição real que está em operação estudada nesta pesquisa, baseada em uma modelagem em OpenDSS. Com isto, foi possível fazer as simulações e comprovar que o limitador atuou como esperado, limitando a corrente de curto-circuito e ainda, impediu que ocorresse afundamento de tensão no momento que ocorreu a falta na rede de distribuição. Além disso, este trabalho foi elaborado de forma detalhada permitindo que pesquisadores e empresas utilizem das informações para novos desenvolvimentos e aplicações do R-SFCL 2G em redes de distribuição.

1.2. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do R-SFCL aplicado a uma rede de distribuição real, com a utilização do *software* livre de regime transitórios e permanentes ATPDraw. Para isto, foi necessário cumprir uma série de outros objetivos, que foram modelar o R-SFCL no ATPDraw e validar. Encontrar uma rede de distribuição com informações completas, e assim modela-la no ATPDraw e valida-la.

Desta forma, foi possível concluir o objetivo principal fazendo as devidas simulações utilizando o ATPDraw.

Para a avaliação das simulações do R-SFCL e a rede de distribuição real, foram utilizadas quatro barras diferentes para realização das faltas e cada falta foi dividida em um cenário, sendo então quatro cenários a serem estudados e detalhados nesta dissertação. Além disso, foi criado um índice para visualizar a eficiência da limitação da corrente pelo R-SFCL como contribuição ao tema.

1.3. DESCRIÇÃO E METODOLOGIA

O presente trabalho apresenta o estudo de aplicação do R-SFCL 2G, para sistemas elétricos de distribuição modelados no *software* livre de regime permanente e transitório ATPDraw, além do modelo em OpenDSS.

Para iniciar as avaliações, a rede foi modelada no ATPDraw e os resultados em regime permanente e sob condições de curto-circuito foram comparados aos resultados obtidos no OpenDSS, com base no trabalho de Machado [11]. Após modelar uma rede de distribuição real completa, o presente trabalho realiza a aplicação do modelo termoeletrico do R-SFCL 2G de supercondutores de alta temperatura (HTS – *High-Temperature Superconductors*) nesta rede real modelada.

1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em cinco capítulos, contando com esse capítulo introdutório, onde foi apresentada uma introdução ao tema e os principais objetivos do trabalho, além da estrutura do mesmo, que será agora apresentada, organizada de forma a proporcionar ao leitor uma sequência lógica dos tópicos apresentados:

- No capítulo 2, *SUPERCONDUTIVIDADE E LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES*, são apresentados alguns conceitos da teoria da supercondutividade, uma abordagem sobre o princípio de funcionamento do R-SFCL de fitas 2G–YBCO, assim como as equações que definem seu comportamento físico diante à aplicação de correntes de falta;
- O capítulo 3, *MODELAGEM DO LIMITADOR DE CORRENTE E DA REDE ELÉTRICA*, dedica-se a apresentar a modelagem do limitador R-SFCL e de uma rede de distribuição real via ATPDraw, e a comparação com a modelagem no OpenDSS da pesquisa de Machado [11];
- No capítulo 4, *RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO R-SFCL NA REDE*, mostram-se os resultados e discussões sobre as simulações. Além disso, apresenta-se um índice para saber a eficiência da limitação da corrente pelo R-SFCL;
- O capítulo 5, *CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS*, constam as conclusões da dissertação e as ideias e sugestões para trabalhos futuros;

Por fim, têm-se o Apêndice, o qual contém os algoritmos do R-SFCL e também a representação da rede de distribuição real modelada no ATPDraw.

2. SUPERCONDUTIVIDADE E LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES

Neste capítulo, serão apresentados os principais conceitos relacionados com os estudos de supercondutividade, sendo os mesmos de suma importância para desenvolvimento deste trabalho e dos próximos capítulos.

2.1. SUPERCONDUTIVIDADE

A supercondutividade é o fenômeno pelo qual certos materiais apresentam ausência de resistência elétrica em corrente contínua quando resfriados abaixo de determinada temperatura, denominada temperatura crítica (T_c). Além da resistividade nula em DC, os materiais supercondutores apresentam diamagnetismo perfeito.

Três anos depois de liquefazer o gás de Hélio pela primeira vez, o físico holandês Heike Kammerling Onnes descobriu o fenômeno da supercondutividade ao estudar o comportamento da resistência elétrica do mercúrio (Hg) com a diminuição da temperatura. Quando a temperatura de uma amostra pura de Hg atingiu 4,2 K sua resistência elétrica caiu abruptamente para valores incomensuráveis em seu sistema de medida [12]. Anos mais tarde, esta observação experimental confirmou ser característica de uma transição de fase de um estado resistivo normal para um estado com resistência nula, denominado estado supercondutor. Hoje se sabe que a supercondutividade não é um fenômeno raro, ocorrendo com diversos materiais para diferentes temperaturas críticas, incluindo mais de vinte elementos da tabela periódica e dezenas de ligas metálicas e compostos cerâmicos. Em 1986 foram descobertos materiais que possuem temperatura crítica mais elevadas quando comparados ao mercúrio, sendo que alguns deles podem ser resfriados com nitrogênio líquido (77 K). Até hoje não foram descobertos materiais supercondutores em temperatura superiores a 138 K sob pressão atmosférica.

Muitas outras propriedades dos supercondutores foram descobertas nos anos subsequentes e, muitos avanços resultaram no entendimento deste fenômeno, desta forma, Onnes observou que a supercondutividade pode ser destruída a partir da densidade de fluxo magnético superior a certo valor crítico B_c , que é dependente do material e da temperatura. E da mesma forma descobriu que com a aplicação de densidades de corrente elétrica maior que um valor crítico J_c ocorria a mesma coisa. Então se sabe que um supercondutor deixa seu estado de resistência elétrica nula quando o valor de pelo menos um dos seus parâmetros

críticos se excede que são temperatura crítica (T_c), campo crítico (H_c) e densidade de corrente crítica (J_c).

A respeito dos estudos e aplicações da supercondutividade na Engenharia Elétrica pode-se citar [13]:

- Limitadores de corrente de curto-circuito;
- Mancais magnéticos;
- Dispositivos armazenadores de energia supercondutores (SMES);
- Motores, geradores e transformadores;
- Trens de levitação magnética (MagLev);
- Cabos de transmissão de energia elétrica;
- Grandes projetos científicos tais como Grande Colisor de Hádrons;
- Bobinas para separador magnético industrial;

2.2. RESISTÊNCIA ZERO E EFEITO MEISSNER-OCHSENFELD

Em 1911, Onnes de forma experimental verificou que a resistividade do mercúrio parecia desaparecer completamente quando o metal estava submetido a temperaturas inferiores a 4,2 K, conforme Figura 1 (a) [12].

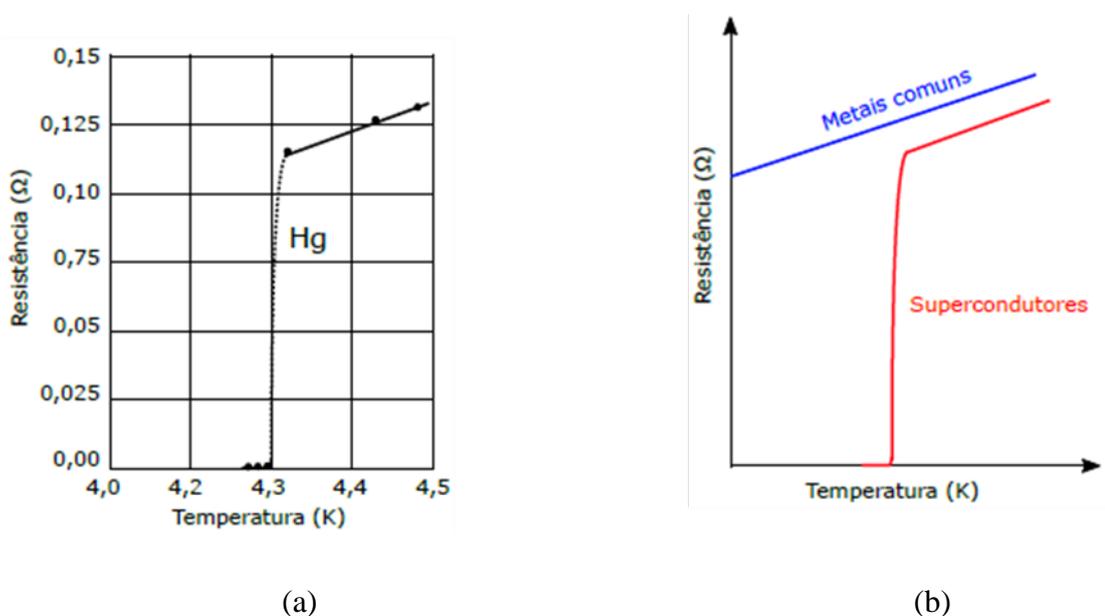


Figura 1: (a) Queda abrupta na resistividade do mercúrio em 4,2 K observada por Onnes [12] e (b) Queda da resistividade do supercondutor e dos metais normais [13].

Posteriormente, Onnes verificou resultados semelhantes para o chumbo em temperatura de 7,2 K e para o estanho em temperatura de 3,7 K. Assim, a temperatura na qual um supercondutor perde a sua resistividade elétrica é chamada de temperatura de transição ou temperatura crítica (T_c). Como pode ser observada pelos experimentos de Onnes [12], a temperatura crítica é uma característica de cada material e a resistividade elétrica cai abruptamente a zero nesta temperatura, como observado na Figura 1 (a). Este curioso comportamento apresentado pelos supercondutores é diferente da queda gradual da resistividade apresentada pela maioria dos metais (metais comuns), como mostra a Figura 1 (b).

Importante destacar que a supercondutividade não é um fenômeno raro, pois aproximadamente metade dos elementos metálicos, e uma grande quantidade de ligas e compostos, também apresentam o fenômeno da supercondutividade. Porém, o fato da temperatura crítica ser, em muitos casos, próximos de zero Kelvin. Este fenômeno não pode ser percebido à temperatura ambiente.

Ao aplicar um campo magnético em um supercondutor no seu estado normal ($T > T_c$) e resfriando o mesmo, observa-se a expulsão do fluxo magnético do interior do material quando este transita do estado normal para o estado supercondutor, os materiais com essa característica recebem o nome também de diamagnetos perfeitos [15]. Este fenômeno citado ficou conhecido como efeito Meissner-Ochsenfeld, em homenagem aos físicos alemães Walther Meissner e Robert Ochsenfeld que fizeram essa descoberta em 1933.

Em uma amostra supercondutora, quando ocorre a transição do estado normal ($T > T_c$) para o estado supercondutor ($T < T_c$) na presença de um campo magnético aplicado menor do que o campo magnético crítico ($B_a < B_c$), pode-se dizer que a densidade de fluxo magnético no interior do supercondutor é anulada por correntes de blindagens que surgem na superfície do supercondutor. Estas correntes induzem uma densidade de fluxo magnético desmagnetizante B_m igual e oposta ao campo aplicado, de forma que o resultado final é uma densidade de fluxo magnético nula ($\sim B = 0$) no interior do supercondutor, conforme representado na Figura 2.

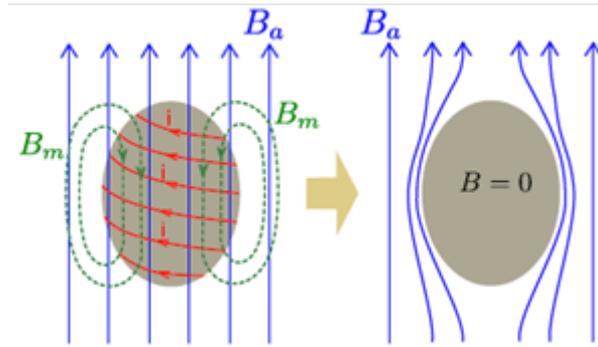


Figura 2: Interação do campo aplicado e o campo desmagnetizante, resultando em densidade de fluxo magnético nula no interior do supercondutor [13].

Para uma abordagem prática, é possível obter a curva de magnetização de um supercondutor da forma apresentada na Equação (1):

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1)$$

Sendo M a magnetização e H o campo magnético aplicado. Como $\vec{B} = 0$ no interior do supercondutor, tem-se a seguinte relação dada pela Equação (2):

$$\vec{H} = -\vec{M} \quad (2)$$

Como será visto adiante, quando ocorre o efeito Meissner-Ochsenfeld conforme indicado na Figura 2, até que B aplicado não ultrapasse B_c , não existirá penetração das linhas de campo magnético dentro do material no estado supercondutor, denominando-se o material do Tipo I. Porém, em alguns materiais, existe um estado intermediário que podem ocorrer uma pequena penetração das linhas de campo dentro dos mesmos, são chamados de supercondutores do Tipo II.

Embora não seja o caso do Efeito Meissner-Ochsenfeld total, a maneira mais simples de se demonstrar a expulsão das linhas de campo nos supercondutores é pela levitação magnética. Ao colocarmos um pequeno ímã sobre uma amostra supercondutora resfriada abaixo de T_c , veremos que este irá levitar devido à força magnética proveniente da circulação de correntes superficiais, força esta que se opõe a força gravitacional exercida sobre o ímã. A Figura 3 apresenta um exemplo de levitação magnética com um ímã posicionado sobre um bloco supercondutor imerso em nitrogênio líquido.



Figura 3: Fotografia do fenômeno de levitação magnética, adaptada de [16].

2.3. PARÂMETROS CRÍTICOS EM MATERIAIS SUPERCONDUTORES

A supercondutividade existe abaixo de um determinado valor de temperatura, ao qual denominamos temperatura crítica T_c . Porém, este não é o único parâmetro que influencia diretamente a supercondutividade, os outros parâmetros são o campo magnético crítico e densidade de corrente crítica.

A supercondutividade existe somente até um valor de campo magnético, ao qual chamamos de campo magnético crítico H_c . Se um campo com intensidade maior que H_c é aplicado a um material supercondutor, todos os fenômenos relacionados à supercondutividade, como o efeito Meissner e resistividade nula, desaparecem. O valor H_c depende da temperatura da qual se encontra o material e pode ser escrito (para supercondutores do Tipo I), de uma maneira aproximada, como na Equação (3) [17]:

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

O valor máximo de corrente que um material no estado supercondutor pode transportar é denominado de densidade de corrente crítica J_c . Caso o material transporte uma densidade corrente maior que J_c , a supercondutividade é destruída. O valor de J_c está relacionado com a temperatura do material e, assim como H_c , também diminui com o aumento da temperatura.

Em supercondutores do Tipo II, o termo densidade de corrente crítica J_c geralmente é utilizado para determinar a densidade de corrente responsável pelos movimentos da rede de vórtices dentro do material supercondutor. Esta pode apresentar diferentes valores para o mesmo material, dependendo do método de fabricação do composto supercondutores.

Desta forma, tem três importantes parâmetros que definem a superfície crítica do estado supercondutor em um material: T_c , J_c e H_c . A Figura 4 mostra o diagrama de fases relacionando estes três parâmetros para um supercondutor do Tipo I.

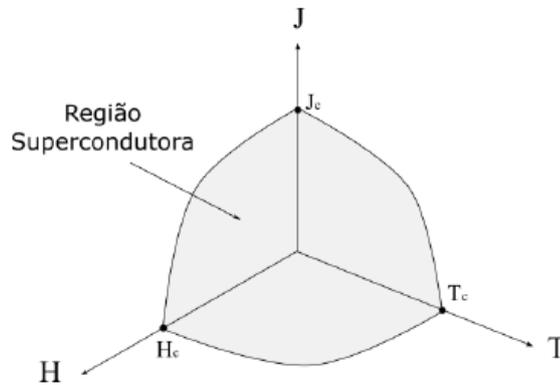


Figura 4: Diagrama de fases de um supercondutor com a relação dos parâmetros J_c , T_c e H_c para supercondutores do Tipo I [3].

2.4. SUPERCONDUTORES DO TIPO I E DO TIPO II

Nos primeiros experimentos, observou-se que os supercondutores não permitiam penetração do campo magnético antes da perda da supercondutividade que seria o efeito Meissner-Ochsenfeld total. No entanto, posteriormente foi verificado experimentalmente que certos supercondutores mantinham a sua resistência elétrica nula e ao mesmo tempo permitiam penetração parcial de campos magnéticos no interior do material, de forma que era possível observar a existência da condição de supercondutor e da condição normal no material, este estado é conhecido como estado misto. Desta forma chamou-se de supercondutores do Tipo I os que possuíam o efeito Meissner-Ochsenfeld total e supercondutores do Tipo II os que possuíam o chamado estado misto.

Para criar limites numéricos entre supercondutores do Tipo I e do Tipo II, o pesquisador russo Alexander Abrikodov [15], sugeriu a criação de um parâmetro k (denominado de parâmetro de Ginzburg-Landau), que é definido como a razão entre a profundidade de penetração (λ) e o comprimento de coerência (ξ), dada pela Equação (4):

$$k = \lambda/\xi \quad (4)$$

A profundidade de penetração (λ) é definida em [14], mede o quão grande é a penetração do campo magnético na superfície do supercondutor. O comprimento de coerência (ξ) é definido em [17], em termos microscópicos é a distância entre os elétrons.

Assim, Abrikodov [18] define que se um supercondutor é do Tipo I, quando $k < 1/\sqrt{2}$ e se $k > 1/\sqrt{2}$ seria um supercondutor do Tipo II.

Os supercondutores do Tipo I possuem dois estados básicos o estado supercondutor e estado normal. O estado supercondutor repele totalmente o fluxo interno (Efeito Meissner-Ochensfeld total). Para valores de campo magnético aplicados imediatamente superior ao campo crítico B_c , o supercondutor transita para o estado normal, perdendo a supercondutividade Figura 5 (a).

Os supercondutores do Tipo II possuem dois campos críticos, o campo crítico inferior (B_{c1}) e campo crítico superior (B_{c2}). O estado supercondutor com expulsão total do fluxo interno (Efeito Meissner-Ochensfeld total) ocorre apenas para pequenos campos aplicados, inferiores a B_{c1} . Para campos superiores a B_{c2} o supercondutor transita para o estado normal. No entanto, para campos aplicados superiores a B_{c1} e inferiores a B_{c2} , o fluxo começa a penetrar no supercondutor na forma de filamentos microscópicos denominados vórtices, que será visto mais à frente neste item. Este estado intermediário em que coexistem os estados supercondutor e normal é chamado estado misto, foi verificado experimentalmente por Shubnikow [19] em 1937 e explicado teoricamente por Abrikosov [18] em 1957.

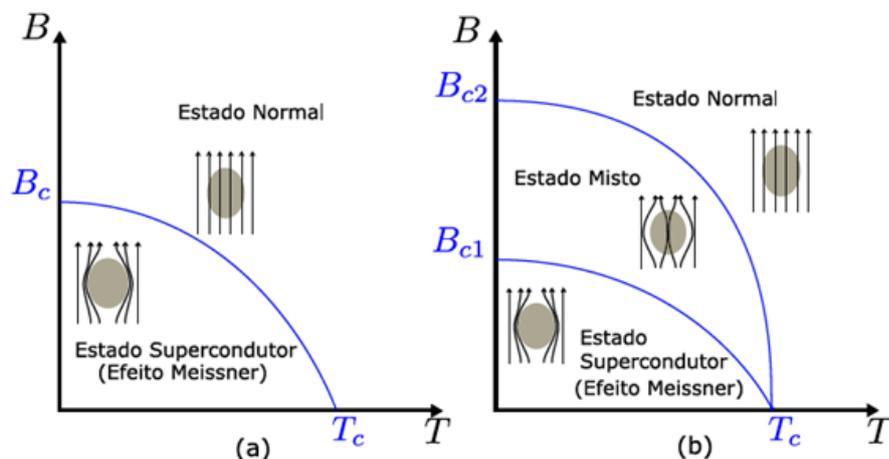


Figura 5: Diagrama de estados para o supercondutor do Tipo I (a) e supercondutor do Tipo II (b) [13].

O campo crítico inferior B_{c1} do supercondutor do Tipo II, assim como o campo crítico B_c dos supercondutores do Tipo I, é muito pequeno, na ordem de mT, assim para as aplicações da supercondutividade tornam-se inviáveis a utilização do Tipo I, sendo utilizado para as aplicações os supercondutores do Tipo II em seu estado misto ($B_{c1} < B < B_{c2}$).

A Tabela 1 apresenta as características de alguns materiais supercondutores. Os supercondutores do Tipo II são utilizados em aplicações comerciais na área de engenharia elétrica por possuírem alta temperatura crítica, sendo possível a utilização do nitrogênio que é o elemento mais abundante na atmosfera e seu custo baixo para liquefação.

Tabela 1: Parâmetros característicos dos principais supercondutores [13]:

Supercondutor	Tipo	T_c	$B_c(OK)$	λ (Ok)	ξ (Ok)
Unidades		K	T	nm	nm
<i>Hg</i>	I	4,2	0,04	-	55
<i>Pb</i>	I	7,2	0,08	37	510
<i>Al</i>	I	1,1	0,01	16	1600
<i>Nb</i>	II	9,2	0,2	39	38
<i>NbTi</i>	II	9,3	13	300	4
<i>Nb₃Sn</i>	II	18	23	65	3
<i>MgB₂</i>	II	39	16	140	5,2
<i>YBa₂Cu₃O₇</i>	II	91	670	150	2
<i>Bi₂Sr₂CaCu₂O₈</i>	II	90	280	300	3
<i>Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀</i>	II	110	250	150	1,5
<i>HgBa₂Ca₂Cu₃O₈</i>	II	135	160	-	1,42

Nos supercondutores, as regiões denominadas vórtices são aquelas onde ocorre penetração de linhas de campo, dentro do material no estado supercondutor. Então somente supercondutores do Tipo II tem vórtices e somente no estado misto, onde há regiões do estado normal.

O estudo da dinâmica de vórtices em materiais supercondutores tem sido muito intenso nos últimos anos, tendo em vista que em aplicações práticas, o movimento de vórtices é capaz de destruir a supercondutividade [20].

O vórtice consiste de uma região que tem formato tubular dentro da qual a supercondutividade é destruída. Ao redor de cada vórtice fluem supercorrentes que blindam a região em estado supercondutor da região interna do vórtice em estado normal conforme

mostra a Figura 6 (a). Sabe-se ainda que cada vórtice carrega uma quantidade de fluxo quantizada Φ no valor de [13]:

$$\Phi = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$

A penetração da densidade de campo magnético no vórtice se dá numa distância da ordem da profundidade de penetração λ , atingindo seu máximo no centro de cada vórtice, vide Figura 6 (b). De forma oposta, a densidade de superelétrons decai desde a borda até o centro do vórtice de acordo com o comprimento de coerência ξ , tornando-se nula no centro Figura 6 (c).

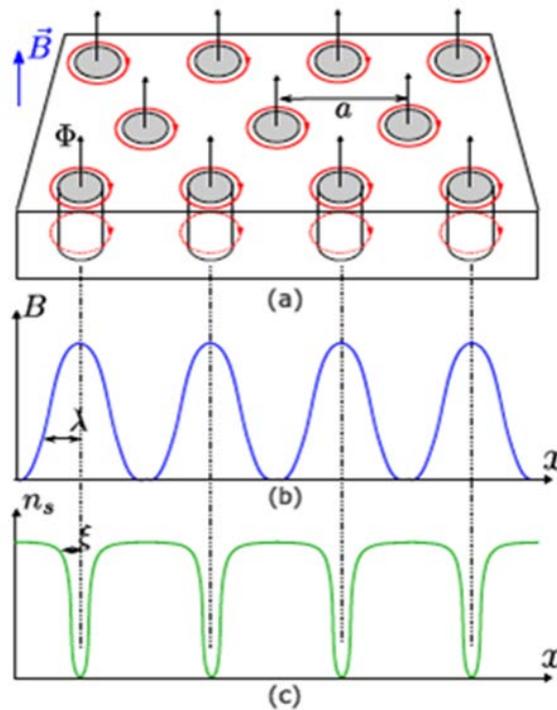


Figura 6: Rede de vórtices triangular formada no estado misto [13]; (a) e a variação do campo magnético (b) e da densidade de superelétrons (c) ao longo do supercondutor.

2.5. SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA

Foi uma grande surpresa no mundo científico quando Bednorz e Muller descobriram a supercondutividade do composto LaBaCuO com temperatura crítica entre 30 K e 40 K [21]. A partir de então houve grande esforço científico para descoberta e desenvolvimento de novos materiais com temperaturas críticas cada vez mais altas, os quais foram chamados de

supercondutores de alta temperatura crítica (em inglês, *High Temperature Superconductors - HTS*).

Supercondutores com temperaturas críticas acima de 25 K já são considerados supercondutores de alta temperatura crítica. Hoje já são conhecidos supercondutores com T_c acima de 130 K. A grande vantagem de um supercondutor possuir T_c acima de 77 K vem do fato de ser esta a temperatura de liquefação do nitrogênio.

O nitrogênio é o elemento mais abundante de nossa atmosfera, além disso é relativamente barato e fácil de liquefazer, quando comparado com Hélio líquido utilizado para resfriar os materiais supercondutores de baixa temperatura, desta forma amplia o potencial das aplicações tecnológicas dos supercondutores de alta temperatura refrigerado com nitrogênio líquido.

Os supercondutores de alta temperatura crítica são exemplos extremos de supercondutores do Tipo II: Possuem grande profundidade de penetração e pequeno comprimento de coerência ($\lambda \gg \xi$) e, portanto, o parâmetro k muito alto.

O valor do campo crítico inferior (B_{c1}) é em geral muito baixo e o campo crítico superior (B_{c2}) pode ser extremamente alto, como pode ser visto na Tabela 1.

Os mais importantes supercondutores de alta temperatura são compostos óxido de cobre do tipo cerâmicos. Estes são formados por estruturas de camadas cristalinas, nas quais os planos que contêm os átomos de oxigênio e cobre são os responsáveis pelo transporte de corrente. Isso explica o fato de as propriedades supercondutoras no material serem extremamente anisotrópicas, ou seja, tanto a corrente crítica quanto o campo crítico são bem maiores na direção paralela do plano de óxido-cobre do que na região perpendicular. Um ponto importante, é que os materiais cerâmicos são, em geral, mecanicamente frágeis, o que dificulta a sua aplicação prática. Atualmente destacam-se dois tipos principais de materiais supercondutores de alta temperatura crítica para aplicações de engenharia:

- Óxido de ítrio-bário-cobre - YBCO

Sendo o primeiro composto descoberto que apresenta supercondutividade com temperatura crítica maior que 77 K, o $YBa_2Cu_3O_7$ ou YBCO apresenta T_c da ordem de 91 K. As propriedades supercondutoras deste sistema praticamente não se alteram quando o Ítrio é substituído pela maioria dos átomos da família de terras-raras (*La, Nd, Gd, Lu, Ho, Sm, Eu*,

Dy, Er, Tm, Yb). O YBCO apresenta bom desempenho em relação a campos magnéticos mas possui fraca ligação entre os grãos supercondutores, sendo mais adequado para fabricação de fitas supercondutoras. As fitas supercondutoras produzidas com este material em escala industrial fazem parte da chamada segunda geração de supercondutores de alta temperatura (2G-HTS).

- Óxido de bismuto-estrôncio-cálcio-cobre - BSCCO

Diferentemente do YBCO, o BSCCO não apresenta elementos de terras raras. O BSCCO pode existir em duas principais variações: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) com temperatura crítica de 90 K e $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2213) com temperatura crítica de 110 K. O composto Bi-2212 é muito utilizado para produção de compostos massivos como discos, cilindros e barras. Já o Bi-2213 é mais adequado para produção de fitas e cabos supercondutores. Os cabos e fitas feitos de BSCCO são conhecidos como a primeira geração de supercondutores de alta temperatura (1G-HTS).

2.6. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES

Os limitadores de correntes de curto-circuito baseados em supercondutores de alta temperatura crítica conhecidos como limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores (*Resistive Superconducting Fault Current Limiters – R-SFCL*), são considerados uma das soluções mais promissoras para o problema dos altos níveis de curto-circuito nos sistemas elétricos. As principais características gerais destes equipamentos são [11]:

- Baixa impedância em condições normais: estes dispositivos apresentam resistência desprezível e indutância baixa, evitando assim quedas de tensão e dissipação de energia em operação normal;
- Rápido tempo de atuação: atuam na limitação de corrente em períodos da ordem de meio ciclo ou menos;
- Grande capacidade de limitação: possibilidade de ajuste da corrente a ser limitada de acordo com as especificações;

- Sem necessidade de substituição de partes ou componentes: não necessitam de substituição de partes ou nenhum tipo de rearme em caso de atuação;
- Não utilizam sensores para detecção do curto-circuito: Na maioria dos tipos de SFCL a limitação da corrente de curto-circuito ocorre devido à propriedade intrínseca do material de transitar do estado supercondutor para o estado normal em razão do rápido aumento da temperatura que ocorre durante o curto-circuito;
- Falha-segura: a maioria dos tipos de SFCL são intrinsecamente seguros. Qualquer defeito no sistema criogênico ou outro problema no equipamento durante um curto-circuito faz com que o material transite para o estado normal, com resistividade diferente de zero, limitando assim a corrente de curto-circuito;
- Período de recuperação curto e automático: após a falta é necessário um determinado tempo para que o material supercondutor do limitador retorne ao seu estado de resistividade nula, sendo este tempo inferior a 1 minuto nos limitadores supercondutores, desde que providos de refrigeração adequada.

A Figura 7 apresenta a forma de onda típica de uma corrente limitada por um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor. Durante o período de operação normal, o SFCL é projetado para apresentar impedância nula, de forma a ser "invisível" ao sistema, não interferindo em seu funcionamento e operação.

Na ocorrência do curto-circuito, o SFCL passa a apresentar rapidamente uma impedância finita e atua na limitação do curto-circuito já no primeiro ciclo. Alguns ciclos depois, após a extinção da falta por dispositivos de proteção convencionais, o SFCL em geral precisa de um tempo para se recuperar e retornar à sua operação normal. Este período é chamado de tempo de recuperação.

A duração deste tempo depende muito da configuração de cada limitador, das condições de refrigeração e do tempo que o limitador ficou sujeito às correntes de falta. Quanto maior a energia a ser dissipada, maior a temperatura e mais tempo é necessário para a recuperação.

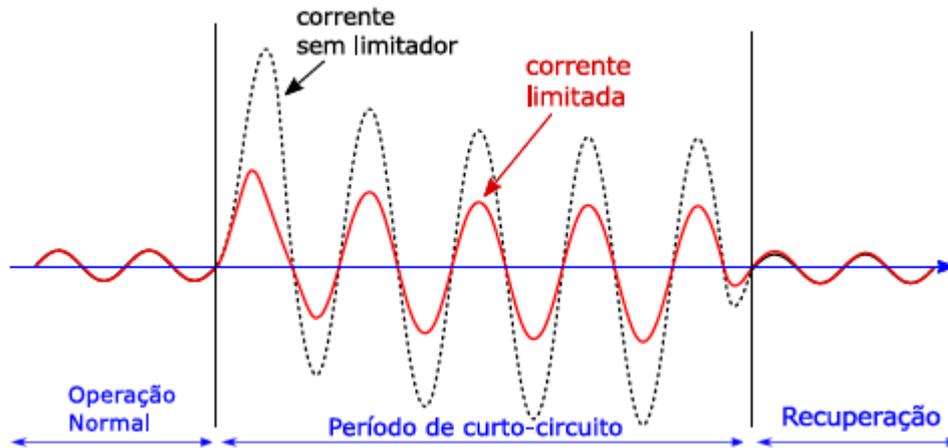


Figura 7: Forma de onda típica de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor com os períodos de operação normal, curto-circuito e recuperação [13].

Os primeiros limitadores supercondutores disponíveis comercialmente foram instalados pela empresa Nexans Superconductors GmbH para uma rede de distribuição de 12 kV [21]. Atualmente existem uma grande quantidade de projetos de limitadores supercondutores em fase de pesquisa, desenvolvimento e testes em todo mundo. Embora existam protótipos de limitadores supercondutores para alta tensão em fase de testes, podemos dizer que os limitadores supercondutores têm sido desenvolvidos predominantemente para aplicações em média tensão. Os maiores desafios para a comercialização em maior escala dos SFCL são o alto custo dos materiais supercondutores e dos sistemas de refrigeração. A respeito disso, avanços consideráveis nos processos de fabricação dos materiais supercondutores e nas tecnologias de refrigeração indicam que estes dispositivos irão entrar no mercado com maior intensidade [7].

Alguns conceitos de SFCL são baseados na transição do material supercondutor do seu estado de resistência nula para o seu estado normal. Outros conceitos utilizam os elementos supercondutores sempre em seu estado de resistência nula em combinação com outros elementos, com o único objetivo de reduzir perdas. Na seção 2.7 será apresentada uma revisão do princípio de funcionamento dos principais tipos de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores que têm sido propostos.

2.7. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTORES RESISTIVOS

O limitador de corrente de curto-circuito do tipo resistivo é o que possui topologia mais simples, constituído basicamente de um elemento supercondutor em série com o sistema a ser protegido. Este conceito foi proposto pela primeira vez em 1936 [22] é baseado na propriedade intrínseca do supercondutor de aumentar sua resistência elétrica de um valor nulo para um valor finito, com a mudança do supercondutor de seu estado de resistência nula para o estado normal. Em condições normais de operação, com a corrente próxima de seu valor nominal, o material supercondutor se encontra em seu estado de resistência nula e, portanto, sem dissipação de energia. Quando ocorre um curto-circuito, a corrente elétrica e a temperatura do supercondutor sofrem um rápido aumento, fazendo com que material supercondutor transite para o estado normal, passando a apresentar resistência não nula. A Figura 8 (a) apresenta um diagrama esquemático de um limitador resistivo inserido no sistema a ser protegido.

Apesar da aparente simplicidade do limitador resistivo, este conceito possui algumas dificuldades de implementação. Como este tipo de limitador pode ser formado por longos condutores feitos de supercondutores de alta temperatura, é possível a ocorrência de inhomogeneidades no material, fazendo com que haja variação nas propriedades supercondutoras ao longo do material. Por esta razão, a transição do estado supercondutor para o estado normal geralmente não é uniforme. Partes do material podem transitar antes que outras, gerando os chamados pontos de calor, referidos na literatura como *hot-spots* apresentados na Figura 8 (b). O surgimento dos *hot-spots* é totalmente indesejado, uma vez que a região do material que transita precocemente acaba por dissipar toda a energia do curto-circuito sozinha, o que pode resultar em danos e até mesmo a destruição total do dispositivo.

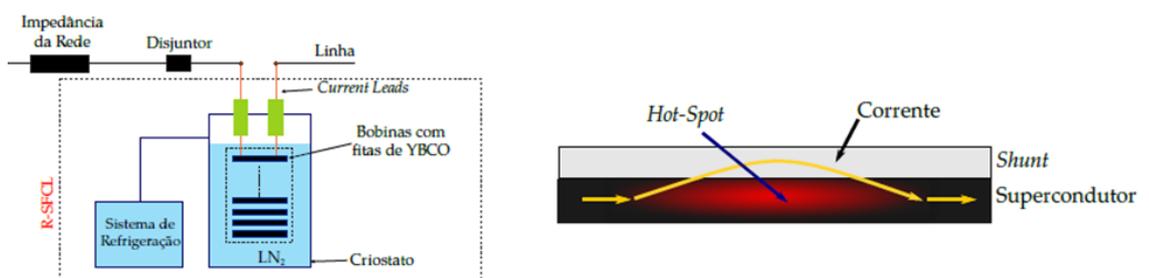


Figura 8: Ilustração de limitador supercondutor resistivo (a) e surgimento de *hot-spots* e desvio da corrente para o elemento *shunt* (b); adaptado de [13].

Para lidar com a existência dos *hot-spots*, é usual a utilização de um elemento *shunt* conectado em paralelo com o limitador. Desta forma, a maior parte da corrente é conduzida pelo elemento *shunt* durante a ocorrência de uma falta. Além disso, o elemento *shunt* permite o ajuste da impedância da linha em condições de limitação de corrente e evita o surgimento de sobretensões que ocorreriam com o rápido aumento da resistência do material supercondutor [13]. A Figura 9 apresenta o circuito equivalente de um limitador resistivo com elemento *shunt*.

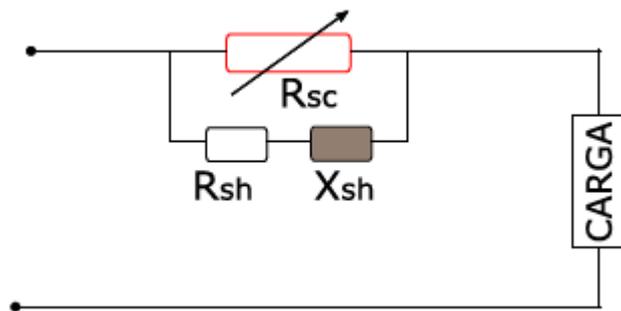


Figura 9: Circuito equivalente de um limitador supercondutor resistivo com elemento *shunt* [13].

Outra questão que deve ser levada em conta é que, devido ao equipamento estar conectado em série diretamente com a corrente a ser limitada, existe a necessidade de utilização de conectores para possibilitar a passagem desta corrente do ambiente externo (temperatura ambiente) para temperaturas criogênicas (em inglês, *current leads*). Desta forma, ainda que a tecnologia dos *current leads* permita boa isolamento, há condução de calor para dentro do ambiente resfriado, o que ocasiona perdas térmicas que precisam ser compensadas pelo sistema de refrigeração [22].

Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores resistivos (*Resistive Superconducting Fault Current Limiters – R-SFCL*), são estudados e desenvolvidos por muitos grupos de pesquisa e empresas, podem ser encontrados em diversos formatos e topologias. Os primeiros protótipos foram fabricados usando condutores maciços (*bulk*), conhecidos como MCP-BSCCO-2212. A sigla MCP vem do inglês Melt Casting Process (Processo de Modelagem por Fundição) e se refere exclusivamente ao processo de fabricação destes limitadores [7]. Atualmente existe uma maior quantidade de pesquisa e desenvolvimento nos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores baseados em fitas supercondutoras de segunda geração do tipo óxido de ítrio-bário-cobre. (R-SFCL 2G-YBCO) [8].

As maiores vantagens do R-SFCL 2G-YBCO em relação ao MCP-BSCCO-2212, são a sua configuração simples, pequeno volume e peso, impedância desprezível em condições normais de operação e mais rápido tempo de atuação. Os dois tipos de limitadores tem as seguintes desvantagens, o uso de *current leads* e a necessidade de lidar com os *hot-spots*.

2.8. TESTE E MODELAGEM DE LIMITADORES DE CORRENTE NO BRASIL

No Laboratório de Alta Corrente do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), ensaios foram realizados para determinar o comportamento do módulo limitador de fitas 2G-YBCO especificado em [8]. O R-SFCL foi submetido a faltas monofásicas, por meio do circuito equivalente apresentado pela Figura 10. A resistência e reatância de controle do circuito 2, R_c e X_c , respectivamente, formam a impedância total que define o nível de corrente de curto-circuito ou corrente sem o limitador (I_{seml}), que se deseja aplicar no dispositivo limitador conectado ao circuito 3.

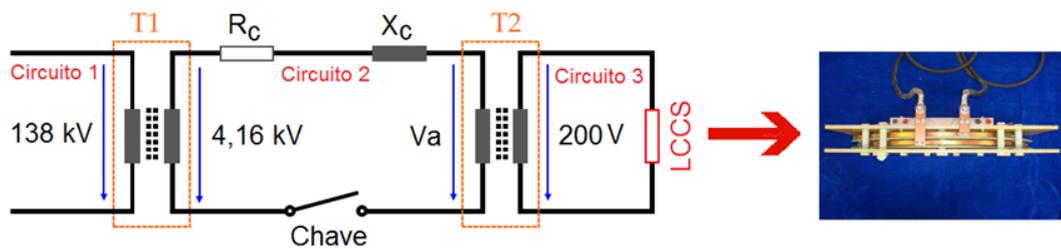


Figura 10: Circuito equivalente utilizado para ensaio do R-SFCL [8].

O ensaio, assim como a simulação computacional, foi configurado com os parâmetros da Tabela 2 descrito em [8]:

Tabela 2 - Parâmetros do ensaio e simulação computacional; adaptada de [8].

Tempo de Falta	60 ms
Tensão	200 V _{rms}
Corrente de curto-circuito	30 kA _{rms}
R _c	0,52 mΩ
X _c	6,6 mΩ

O primeiro pico mensurado de I_{seml} foi de $80,5 \text{ kA}_{pico}$ e da corrente limitada (I_{lim}) foi de $4,5 \text{ kA}_{pico}$, com picos subsequentes de aproximadamente 3 kA_{pico} , conforme indicado na Figura 11. Posteriormente, esses valores serão utilizados para validar o R-SFCL.

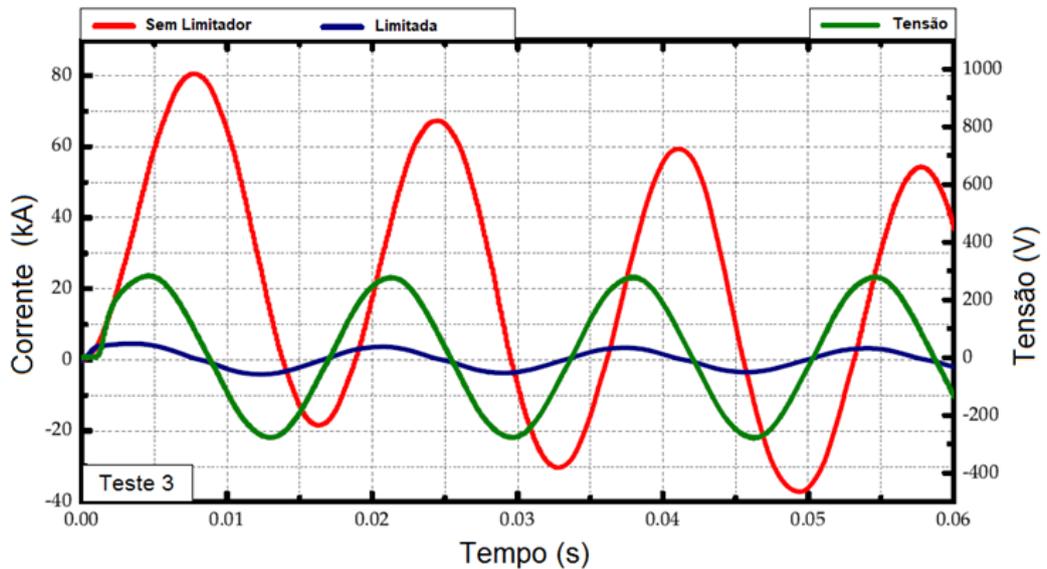


Figura 11: Comparação entre as correntes sem limitador e limitada obtidas experimentalmente [8].

Os resultados encontrados através de simulações no MATLAB em [8] também são considerados para validação do modelo, ligados a variação da temperatura em cada camada e da resistência equivalente variável do R-SFCL, indicadas nas Figuras 12. e 13, respectivamente. É extremamente difícil medir essa variação de temperatura em testes, de modo que a sua previsão através de simulações se torna uma ferramenta importante para compreender o comportamento deste dispositivo.

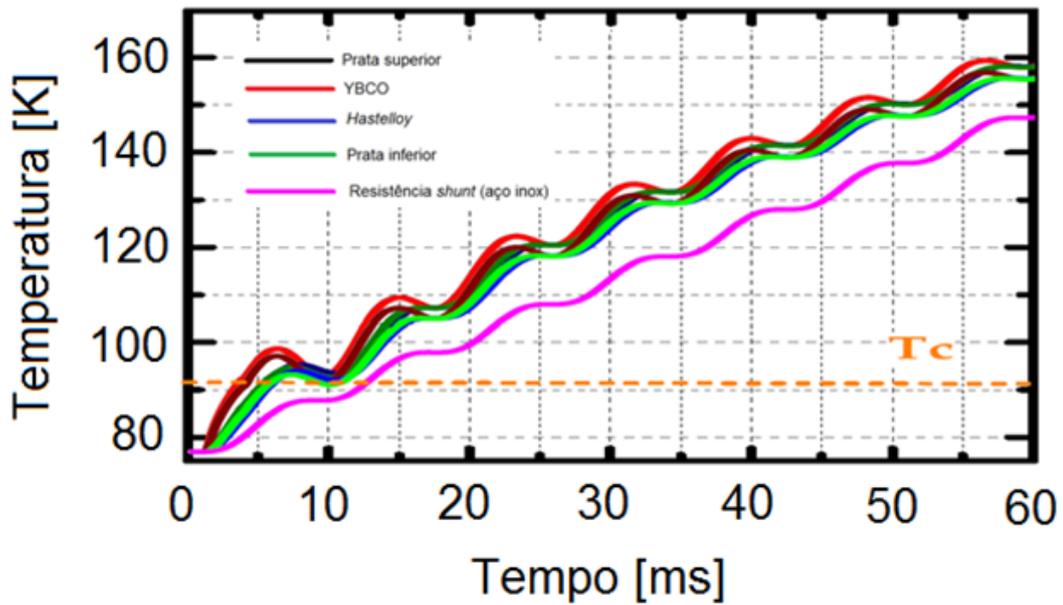


Figura 12: Variação da temperatura das camadas, obtidas via MATLAB. Adaptada de [8].

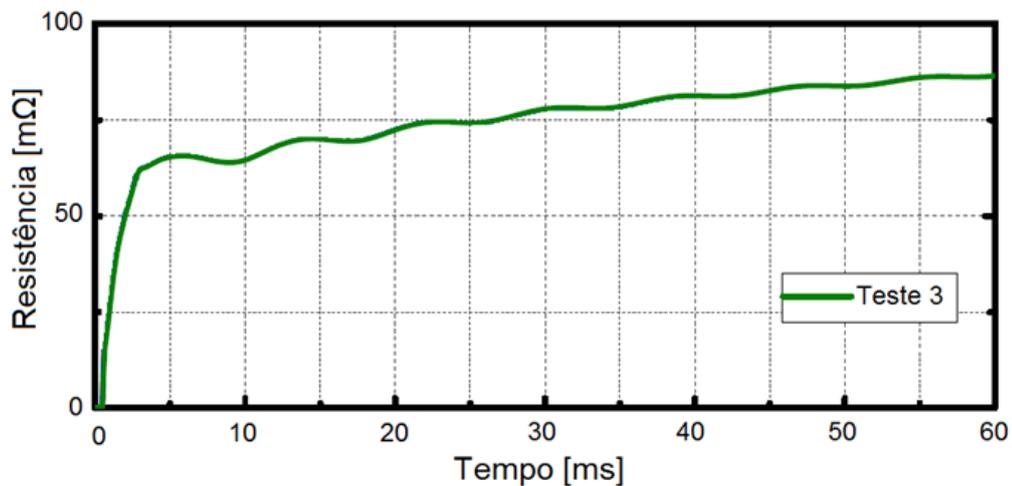


Figura 13: Variação da resistência equivalente do R-SFCL, obtida via simulação MATLAB. Adaptada de [8].

2.9. CURVA E - J

O conhecimento do valor da densidade de corrente crítica J_c é fundamental para as aplicações com supercondutores, especialmente no caso dos supercondutores de alta temperatura crítica. Esta determinação pode ser feita por medições de densidade de corrente aplicada em uma amostra supercondutora a partir de critérios de campo elétrico ou

resistividade, sendo mais comum o critério de campo elétrico. Considera-se que a partir de um determinado campo elétrico crítico E_c o supercondutor passa ao estágio dissipativo e, portanto a corrente aplicada é igual à corrente crítica ($J = J_c$). Normalmente, este critério é adotado como [23], [24]:

$$E_c = 1\mu V/cm$$

Quando a densidade de corrente de transporte aplicada é muito baixa e gera forças de Lorentz inferiores à máxima força de aprisionamento, não há qualquer movimentação da rede de vórtices. Na medida em que aplicamos uma corrente crescente no material supercondutor, nota-se que o campo elétrico E passa a aumentar para valores superiores a E_c . Podem ser identificados 3 estágios principais nesta transição:

- *Flux Creep*: a densidade de corrente de transporte gera forças de Lorentz superiores, mas na mesma ordem de grandeza das forças de aprisionamento, o que acarreta em um lento movimento dos vórtices e campo elétrico superior a E_c ;
- *Flux Flow*: a densidade de corrente de transporte gera forças de Lorentz bem maiores do que as forças de aprisionamento, o que acarreta em um movimento livre dos vórtices no material supercondutor;
- Normal: o material perde totalmente as propriedades da supercondutividade e passa para o estágio normal, não existindo mais a rede de vórtices. A curva $E - J$ passa a ter uma característica linear.

Quando não há campo magnético externo aplicado, o campo elétrico pode ser considerado uma função da densidade de corrente e da temperatura e a Equação (5) pode ser utilizada para descrever os três estágios principais da curva $E - J$ [3], sendo n o índice de transição que varia fortemente com o tipo do material e do estágio da transição [3].

$$E(J, T) = E_c \left[\frac{J}{J_c(T)} \right]^n \quad (5)$$

Apesar de existirem diferentes formas de modelagem da curva $E-J$ na literatura, a Equação (5) é suficiente para resultados satisfatórios para os supercondutores de alta temperatura crítica [3], especialmente para as aplicações de limitação de corrente de curto-circuito. Nesta equação, J_c decresce com o aumento da temperatura, fazendo com que o

campo elétrico aumente, deslocando a curva para cima. Para os supercondutores de alta temperatura resfriados por nitrogênio líquido, a variação de J_c pode ser modelada como função linear, em relação a temperatura, em 77 K e a temperatura crítica (T_c), de acordo com a Equação (6) [3].

$$J_c(T) = J_{c(77K)} \left(\frac{T_c - 77}{T_c - T} \right) \quad (6)$$

Os diferentes estágios de transição do material são denominados de *flux creep*, *flux flow* e estado normal, nos quais n assume valores diferentes. Para o regime *flux creep*, n pode ser calculado conforme Equação (7). Para o regime *flux flow*, o valor é constante e será definido para cada material especificamente, como por exemplo para fitas YBCO n pode variar entre 2 e 4. Para o estado normal, o valor de n é igual a 1, pois o material se comporta como um condutor normal e apresenta resistência linear conforme insicado em Sousa [8].

$$n = \frac{U_0}{K_b T_{sp}} \quad (7)$$

Na qual:

- U_0 é o potencial de aprisionamento (eV);
- K_b é a constante de Boltzmann (eV/K);
- T é a temperatura do material supercondutor (K).

A Figura 14 apresenta, em escala logarítmica, um exemplo de curva E-J para uma determinada temperatura, representando os 3 estágios da transição.

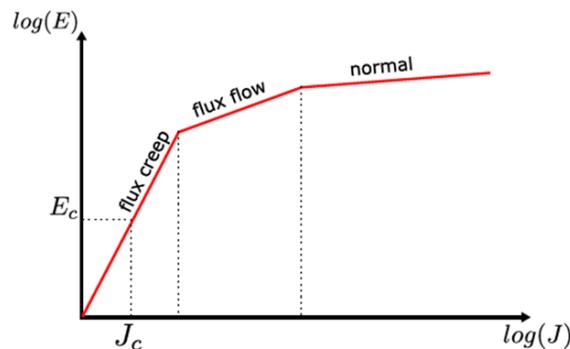


Figura 14: Curva E - J de um supercondutor de alta temperatura em escala logarítmica [13].

3. MODELAGEM DO LIMITADOR DE CORRENTE E DA REDE ELÉTRICA

3.1. LIMITADOR DE FITAS 2G - YBCO

A tecnologia de limitadores baseados em fitas 2G do tipo YBCO (2G-YBCO) apresentam vantagens em relação aos limitadores com MCP-BSCCO-2212 [7], tais como: maior limitação do primeiro pico, menor tempo de recuperação e menor peso [10]. Ainda, existe grande disponibilidade de fornecedores destas fitas, que possibilita a diminuição dos custos de produção do R-SFCL 2G-YBCO por evitar a necessidade de plantas de fabricação do material supercondutor [13].

Os limitadores supercondutores de fitas 2G YBCO do modelo SF12100 da SuperPower, utilizadas em [3], ilustrada na Figura 15, que tem como características comprimento de 430 cm, largura de 1,2 cm, corrente crítica de 275 A para 77 K, temperatura crítica de 92 K e uma tensão máxima de 430 V_{rms}.

A fita é composta basicamente de 5 camadas:

- Prata com 1 μm nas partes externas (superior e inferior), responsável pela estabilização térmica e ajuda na proteção da camada supercondutora;
- Prata com 3 μm depositada sobre a camada supercondutora, responsável pela estabilização térmica e ajuda na proteção da camada supercondutora;
- Camadas de *Buffer*, melhoram a aderência do material supercondutor ao substrato, entre outras funções;
- Substrato de *Hastelloy*, que minimiza os esforços mecânicos devido à contração térmica.

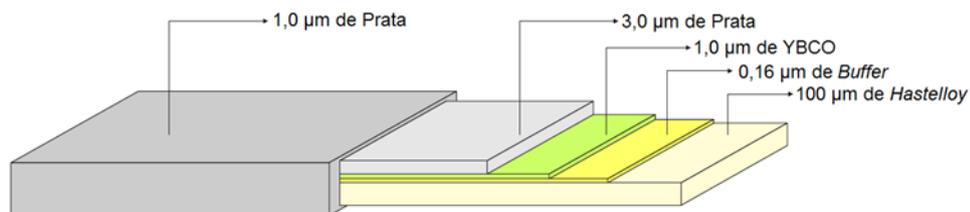


Figura 15: Espessuras de cada camada da fita 2G YBCO modelo SF12100 da SuperPower; adaptada de [8].

O protótipo de R-SFCL da Figura 16 consiste em 8 fitas 2G YBCO, sendo 4 fitas em paralelo na entrada conectadas com mais 4 fitas em paralelo na saída, por meio de uma resistência de contato, em um arranjo antiparalelo para compensar as perdas AC e diminuir o campo induzido pelas mesmas. A resistência *shunt* é conectada em paralelo com o arranjo de fitas e tem a finalidade de conduzir e limitar a corrente de falta após o supercondutor transitar para o estado normal, evitando a degradação da fita supercondutora por Efeito Joule.



Figura 16: Arranjo da bobina de R-SFCL adaptada de [8].

3.2. EQUIVALENTE ELÉTRICO DO R-SFCL

O limitador supercondutor é modelado como um grupo de resistências variáveis em paralelo, sendo que cada resistência corresponde a uma camada do material. O valor da resistência de cada camada, depende da resistividade do material que a compõe. Além disso, a resistividade de cada camada é linearmente dependente da temperatura (com exceção do YBCO quando abaixo de T_c).

A Figura 17 (a) apresenta uma representação das camadas da fita 2G-YBCO enquanto que a Figura 17 (b) apresenta o equivalente elétrico de cada fita. A arquitetura ilustrada na Figura 17 (a) apresenta quatro camadas com diferentes espessuras (v_n): camada de prata superior; camada supercondutora (YBCO); camada de substrato (*Hastelloy*) e; camada de prata inferior.

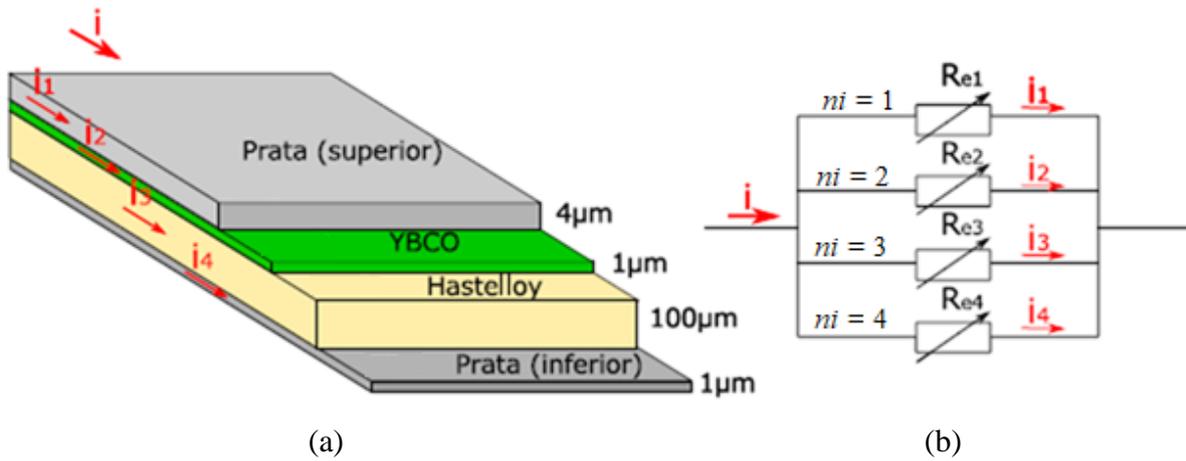


Figura 17: Seção transversal da fita 2G YBCO do limitador resistivo (a) e sua representação elétrica (b); adaptada de [13].

A resistência de cada camada n_i é dada pela Equação (8):

$$R_{\eta} = \rho_{\eta} \frac{l}{A_{\eta}} \quad (8)$$

Sendo ρ_{η} em *ohm* a resistividade elétrica do material de cada camada, $A_n = v_n \times d$ a área da seção transversal em cm^2 de cada camada e l o comprimento total da fita em cm . A resistência total do SFCL (R_{total}) é determinada através do arranjo de fitas utilizadas para limitação, em paralelo à resistência *shunt* (R_5), conforme indicada na Figura 18.

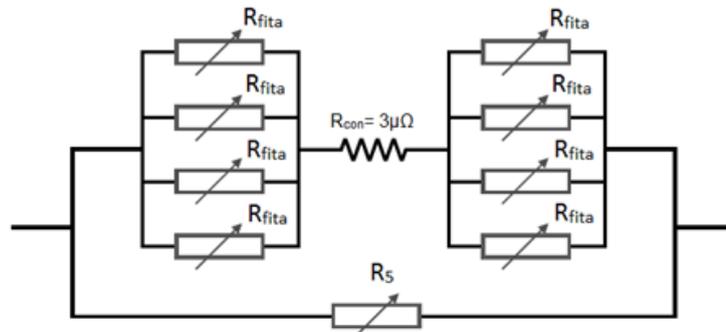


Figura 18: Circuito equivalento do protótipo de SFCL.

3.3. ANALOGIA ELETROTÉRMICA PARA A MODELAGEM DO LIMITADOR

Para modelar a troca de calor entre as diversas camadas das fitas 2G no R-SFCL e a variação da resistência elétrica nos materiais, será adotada uma analogia eletrotérmica. As analogias entre circuitos térmicos e elétricos são utilizadas por pesquisadores para prever o comportamento térmico de muitos equipamentos e dispositivos elétricos. Este método foi

recentemente proposto para aplicação da simulação dos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores [9].

O método consegue prever com precisão o comportamento térmico e elétrico do limitador. Para análise do circuito elétrico, o limitador supercondutor é modelado como um grupo de resistências variáveis em paralelo, cujos valores dependem da temperatura de cada camada. A variação desta temperatura no tempo é obtida pela solução das equações de um circuito equivalente térmico-elétrico. Basicamente, as saídas do equivalente elétrico são usadas como entradas no circuito termelétrico, o que possibilita uma solução acoplada das equações elétricas e térmicas.

Para análise da condução de calor, a Figura 19 representa um elemento de volume infinitesimal, como o fluxo de calor é considerado unidimensional na direção do eixo Z, então pode se considerar:

- Q_z , taxa de fluxo de calor que entra no material, dada por $dV = dx \, dy \, dz$.
- Q_{z+dz} , taxa de fluxo de calor que sai do material, dada por $Q_z + (\partial Q_z / \partial z) \, dz$.

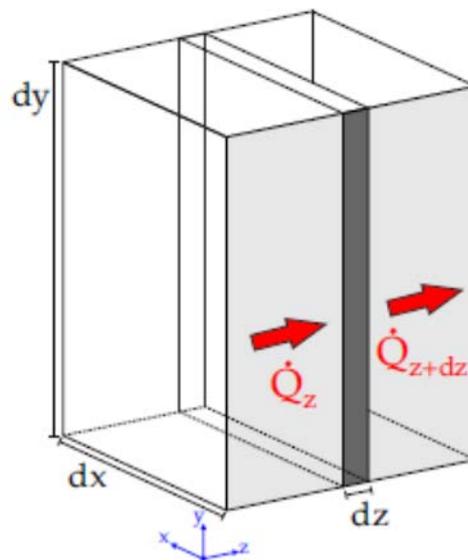


Figura 19: Elemento de volume infinitesimal para análise de condução de calor; adaptada de [3].

A Equação (9), representa a diferença entre a taxa de fluxo de calor que entra no material e a que sai do mesmo.

$$Q_z - \left[\dot{Q}_z + \left(\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} \right) dz \right] = - \left(\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} \right) dz \quad (9)$$

A relação entre a taxa de fluxo de calor \dot{Q}_z e o gradiente de temperatura no eixo Z, é dada $\partial T / \partial z$ pela Equação (10):

$$\dot{Q}_z = -\lambda da \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

Sabe – se:

- λ – Condutividade térmica.
- da - Área da superfície de troca de calor ortogonal ao eixo Z, dada por $dx \cdot dy$.

A Equação (11) representa a taxa de variação da energia térmica armazenada pelo material do elemento de volume, que é a diferença das taxas de transferência de calor para dentro e para fora de um elemento de volume infinitesimal dV , somada à taxa de geração de calor dentro deste volume.

$$-\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} dz + \dot{g} dV = \gamma c dV \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

Sabe – se:

- \dot{g} – Taxa de geração de calor dentro do elemento de volume infinitesimal dV .
- γ – Massa específica.
- c – Calor específico do material do elemento de volume

Na Equação (12), está a substituição da Equação (10) na Equação (11), para obtenção da equação de condução de calor transiente unidimensional de acordo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{g}}{\gamma c} \quad (12)$$

Conforme demonstrado pelo trabalho de Sousa [8], pensando do ponto de vista de linhas de transmissão, de forma semelhante, é possível desenvolver as equações de parâmetros distribuídos, compostas por resistências em série e capacitores em paralelo. A Figura 20 apresenta o modelo equivalente de linha de transmissão por meio de parâmetros distribuídos com resistências em série e capacitâncias em paralelo.

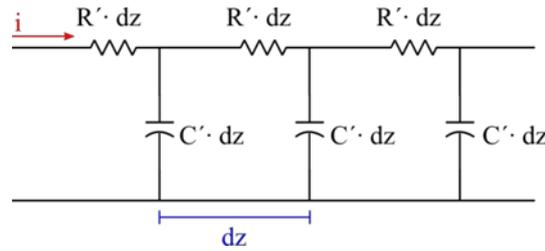


Figura 20: Modelo de linha elétrica por parâmetros distribuídos, composto por resistências em série e capacitâncias em paralelo [3].

Pela Figura 20, sabe-se:

- R' – Resistência por unidade de comprimento.
- C' – Capacitância por unidade de comprimento.
- dz – Segmento infinitesimal da linha.

A relação entre a variação de tensão no segmento infinitesimal da linha e a corrente está na Equação (13):

$$-\frac{\partial v}{\partial z} dz = R' dz i \quad \therefore i = -\frac{1}{R'} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (13)$$

A variação da corrente e a capacitância do segmento infinitesimal de linha $C' \cdot dz$. Está apresentada na Equação (14) que é a Lei de Kirchoff:

$$-\frac{\partial i}{\partial z} dz = C' dz \frac{\partial v}{\partial z} \quad \therefore \frac{\partial i}{\partial z} = -C' dz \frac{\partial v}{\partial z} \quad (14)$$

Substituindo a Equação (13) na Equação (14), obtêm-se a Equação (15).

$$-\frac{\partial v}{\partial t} dz = \frac{1}{R' C'} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (15)$$

A partir da abordagem apresentada, conclui-se que a Equação (15) é matematicamente equivalente à Equação (12), exceto pelo termo referente à geração de calor interno ao material dentro do volume infinitesimal. O termo adicional pode ser adicionado à Equação (15) através da introdução de uma fonte de corrente em paralelo com a capacitância na linha de transmissão [8].

Sendo assim, é possível modelar qualquer problema de condução de calor transiente unidimensional através de um circuito elétrico equivalente como o circuito apresentado na Figura 20.

Com a utilização de método de diferenças finitas, é possível resolver o problema de condução de calor transiente com geração interna de calor para uma estrutura com várias camadas. A discretização espacial de cada camada de espessura l é feita por uma malha contendo 3 nós, sendo um nó no meio da camada e os outros dois nós nas extremidades compartilhadas com as demais camadas.

A partir de [8], verifica-se que as equações do circuito RC de parâmetros concentrados equivalentes à linha elétrica por parâmetros distribuídos também são matematicamente idênticas às equações de condução de calor transiente com geração de calor interno através da utilização do método de diferenças finitas.

Portanto, a solução da condução de calor transiente com geração de calor interno para cada camada de uma estrutura pode ser obtida utilizando o circuito em forma de “T” apresentado na Figura 21.

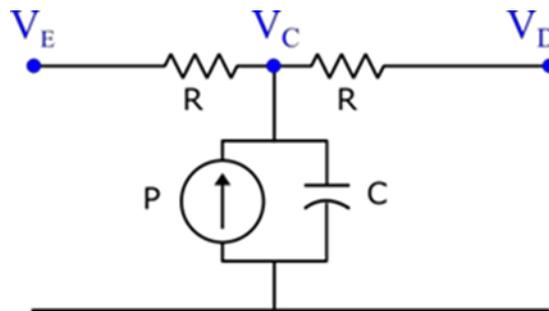


Figura 21: Circuito RC equivalente para a linha de transmissão por parâmetros distribuídos [3].

3.4. EQUIVALENTE TÉRMICO DO R-SFCL

Para determinação das temperaturas de cada camada é feita uma análise da transferência de calor, onde uma transferência unidimensional de calor entre as camadas na direção transversal do condutor é assumida. É neste ponto que a analogia existente entre circuitos térmicos e elétricos é utilizada para auxiliar na modelagem e solução do problema. Empregando esta analogia, o forte acoplamento entre as equações elétricas e térmicas torna-se mais simples de ser resolvido, uma vez que as equações de transferência de calor são equivalentes a equações elétricas de um circuito, conforme Figura 21. Maiores detalhes da fundamentação matemática deste método podem ser encontrados nas referências [8] e [9]. A

Tabela 3 lista as propriedades análogas entre os sistemas térmicos e elétricos utilizadas na elaboração dos circuitos termelétricos.

Tabela 3- Propriedades análogas entre os sistemas térmicos e os sistemas elétricos.

Adaptada em [13].

Sistemas Térmicos			Sistemas Elétricos		
Propriedade	Símbolo	Unidade	Propriedade	Símbolo	Unidade
Temperatura	T	K	Tensão	V	Volt
Potência	P	Watt	Corrente	i	Ampere
Capacidade Térmica	C	J / K	Capacitância	C	Farad
Resistência Térmica	R	K / Watt	Resistência Elétrica	R	Ohm (Ω)

Desta forma, o problema unidimensional de condução de calor entre as camadas da fita 2G-YBCO na Figura 17 pode ser representado pelo circuito térmico elétrico apresentado na Figura 22. Neste circuito, as resistências R_n (sendo $n_i = 1; 2; 3; 4$) representam a oposição ao fluxo de calor por condução em cada camada n_i da fita 2G. O valor de R_n e é dado pela Equação (16):

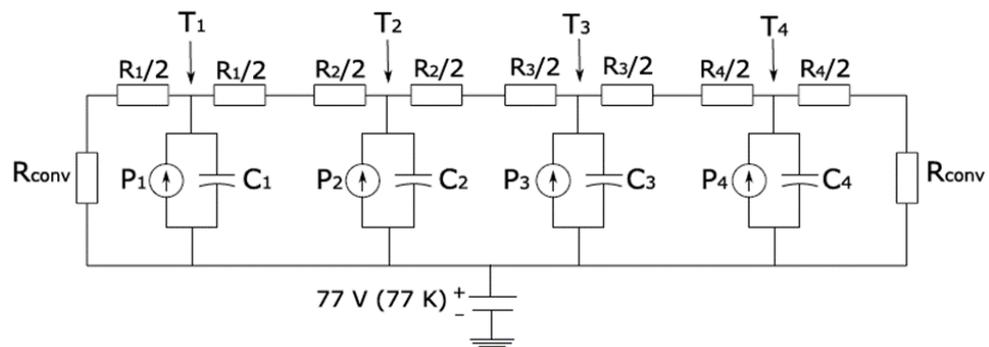


Figura 22: Circuito termelétrico para resolver o comportamento térmico do módulo 2G-YBCO [13].

$$R_{\eta} = \frac{v_{\eta}}{k_{\eta} S'} \quad (16)$$

Sendo k_{η} a condutividade térmica de cada camada, v_{η} a espessura de cada camada e $S = l \times d$ a área em cm^2 da Seção longitudinal da fita.

Os capacitores C_n representam a capacidade térmica dentro de cada camada n_i , e seu cálculo é dado pela Equação (17):

$$C_n = \gamma_n \zeta_n v_n S \quad (17)$$

Em que ζ_n representa o calor específico em $J/(g.K)$ e γ_n a densidade volumétrica g/cm^3 de cada camada n_i .

As fontes de corrente P_n estão associadas com a potência elétrica dissipada dentro de cada camada por efeito joule, descrita na Equação (18), e são obtidas a partir do equivalente elétrico visto na Figura 22:

$$P_n = R_n i_n^2 \quad (18)$$

A fonte CC de tensão de 77 V da Figura 22 representa o líquido refrigerante (nitrogênio líquido - 77 K) que é utilizado para resfriar o limitador.

Finalmente, as resistências R_{conv} estão inversamente relacionadas com a transferência convectiva de calor entre o nitrogênio líquido e as camadas externas (superior e inferior), e são relacionadas na Equação (19):

$$P_{conv} = \frac{1}{h_c S'} \quad (19)$$

Sendo h_c o coeficiente de transferência de calor por convecção.

No circuito termelétrico da Figura 22, as temperaturas de cada camada da fita são numericamente iguais às tensões para os nós centrais das respectivas camadas com relação ao terra do circuito. Desta forma as analogias térmicas e elétricas estão feitas.

3.5. O R-SFCL MODELADO NO ATPDRAW

Para aplicar o R-SFCL em uma rede de distribuição real, será descrito o comportamento elétrico e térmico do mesmo no *software Electromagnetic Transients Program* (EMTP), através da interface gráfica ATPDraw e linguagem de programação MODELS. O fluxograma na Figura 23, apresenta a lógica e a dinâmica de atuação descrita em

MODELS, além disso no Apêndice no Quadro A1, está o código completo elaborado. Este algoritmo controla R-SFCL em função da corrente total que o atravessa, mensurada pela chave (C_h), ambos representados no circuito equivalente da Figura 24 que é utilizado para simulação no ATPDraw

Considera-se que o R-SFCL esteja em equilíbrio com a temperatura do nitrogênio líquido (77 K), sendo a tensão (V) do circuito de $200 V_{\text{rms}}$ (passo "01"). No instante igual a zero ($t=0$), uma corrente de curto-circuito com valor definido por R_c e X_c circulará através de R-SFCL e C_h (passo "02"), conforme indicados na Figura 23, sendo essa, a última responsável por mensurar a corrente de falta (passo "03").

A partir dos dados de entrada (módulo das correntes de fase), a rotina programada no MODELS inicia o cálculo das resistividades e das resistências elétricas das camadas ou *layers* (passo "04"), com base na última temperatura atualizada (no caso inicial, 77 K). Com o valor da resistência equivalente do R-SFCL, determina-se a corrente que passa pela camada supercondutora, por meio de divisor de corrente. Devido a não linearidade da resistência do supercondutor, o método iterativo para estabilizar numericamente estes valores de corrente e resistividade é iniciado (passo "05"), conforme ilustrado na Figura 23 [25].

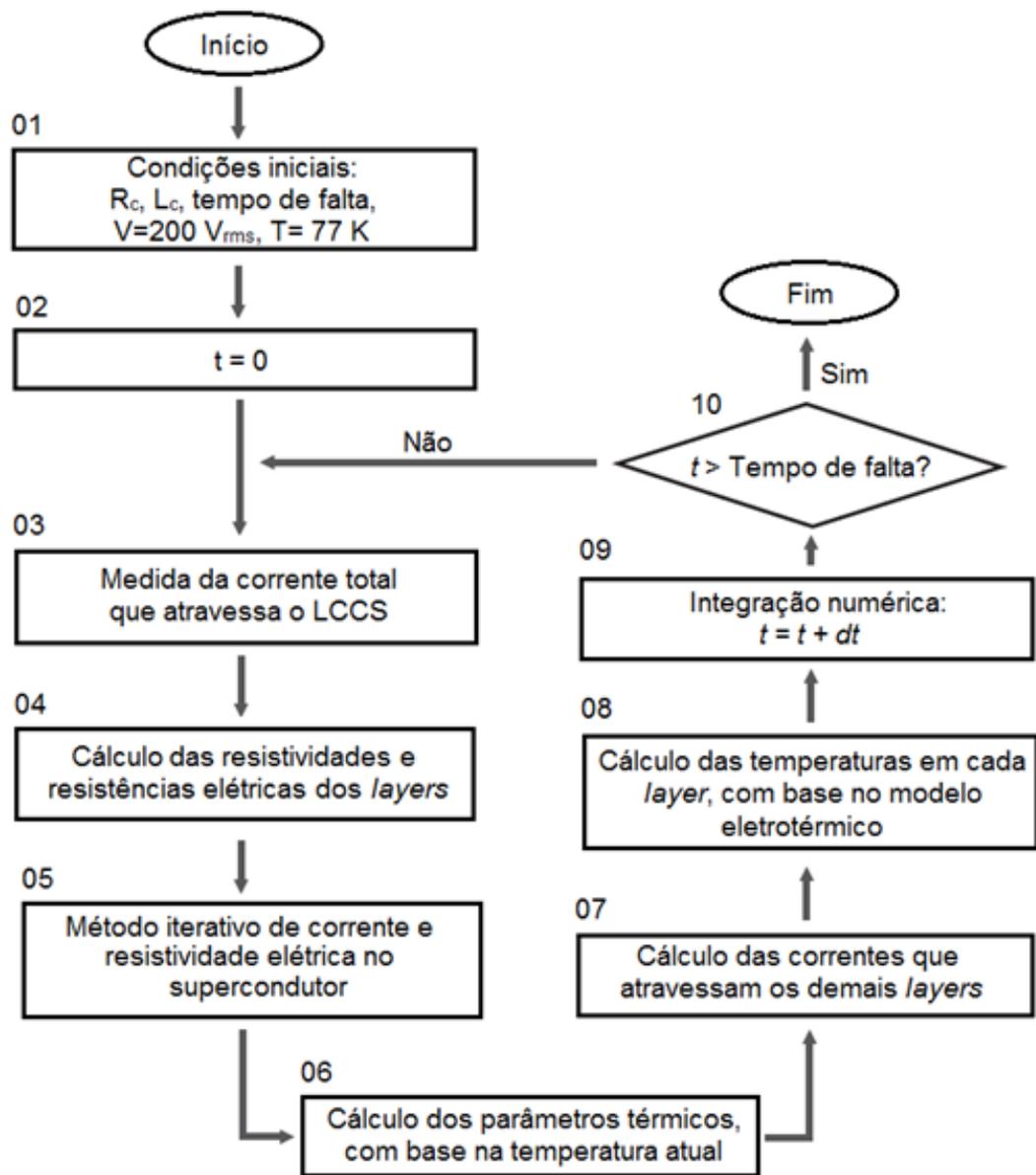


Figura 23: Fluxograma da rotina de simulação do R-SFCL programada no MODELS [25].

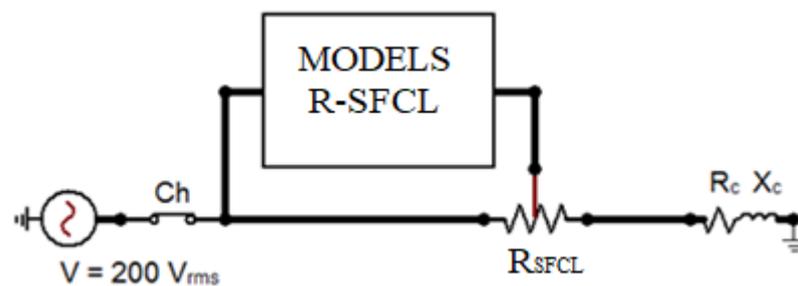


Figura 24: Circuito equivalente utilizado para simulação do R-SFCL no ATPDraw [25].

A próxima etapa (passo "06") realiza os cálculos dos parâmetros térmicos em função da temperatura atual (calor específico, condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor por convecção), assim como os elementos referentes à analogia eletrotérmica (resistências por condução e convecção, e capacitâncias ligadas à capacidade térmica). Para determinação da geração interna de calor devido à passagem de corrente, realiza-se também o divisor de corrente nas demais camadas (passo "07"). Baseado no circuito eletrotérmico da Figura 18, atualiza-se as temperaturas das camadas, devido à passagem dessa corrente de falta (passo "08").

Finalizada a rotina, o valor de R-SFCL é atualizado e o programa segue para a próxima etapa ($t=t+dt$), sendo o valor de passo (dt) definido pelo usuário (passo "09"). Se t for menor que o tempo de falta, estipulado inicialmente pelo usuário no (passo "01"), a rotina se repete a partir do (passo "03") até alcançar o valor do tempo de falta (passo "10"), finalizando a simulação.

3.6. VALIDAÇÃO DO R-SFCL NO ATPDRAW

Neste item serão apresentadas as simulações do R-SFCL modelado no *software* ATPDraw, os resultados desta seção serão validados com os valores apresentados na seção 2.8.

As formas de onda das correntes I_{seml} e I_{lim} foram obtidas através da simulação no *software* ATPDraw, estão mostradas na Figuras 25 e 26, sendo a última apenas a forma de onda de I_{lim} , em uma escala menor para melhor visualização.

O primeiro pico de I_{seml} foi de 76,2 kA_{pico} e de I_{lim} igual a 4,9 kA_{pico}, com picos subsequentes próximos de 3,3 kA_{pico}, exibindo uma diferença de 5,34%, 8,9% e 10% em relação aos valores mensurado em teste real.

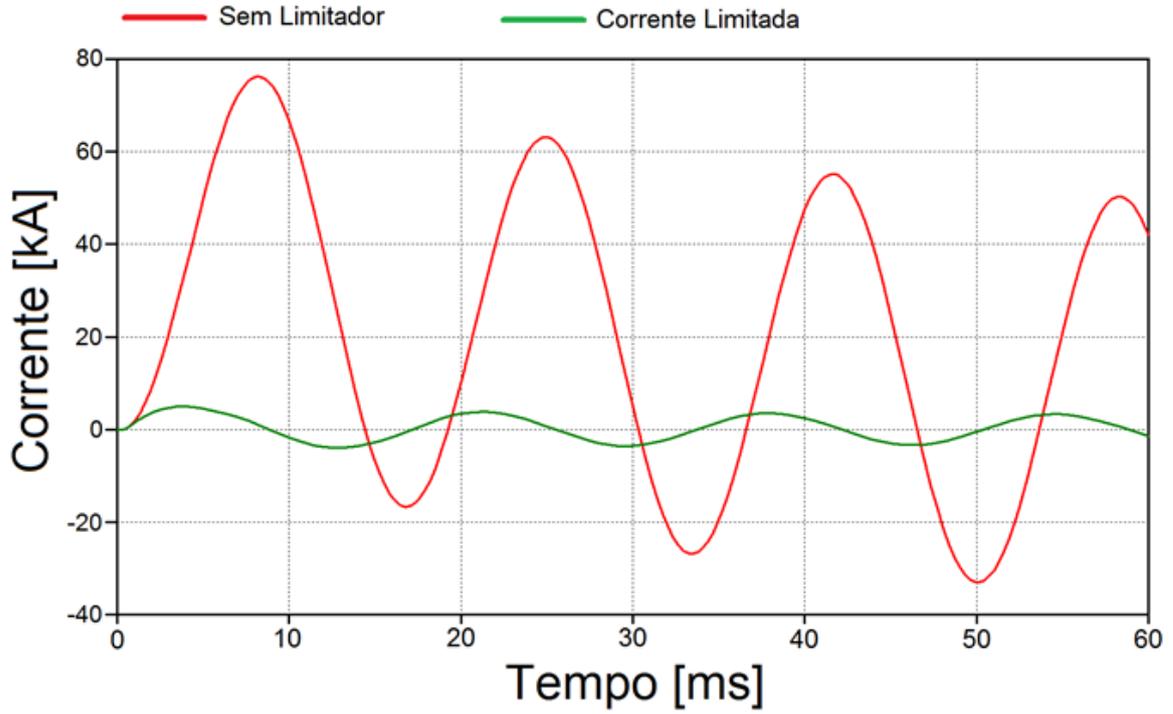


Figura 25: Correntes sem limitador e limitada, obtida via simulação ATPDraw [25].

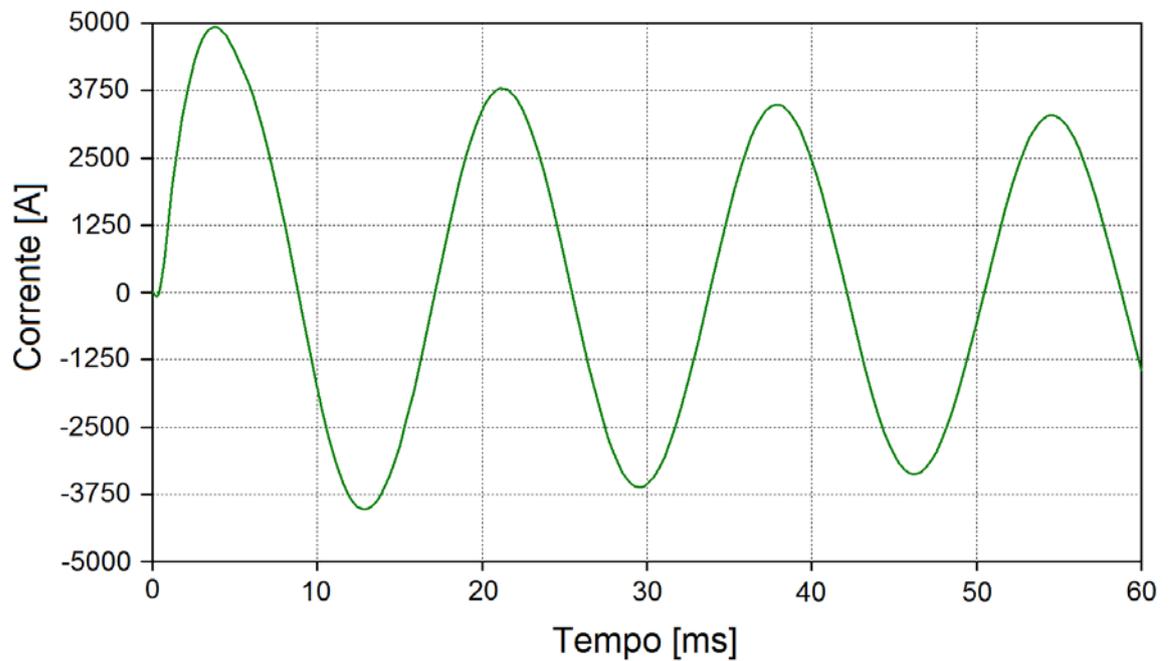


Figura 26: Corrente limitada em escala menor, obtida via simulação ATPDraw [25].

A Figura 27, exibe a variação da resistência equivalente variável do R-SFCL (R_{R-SFCL}) na ocorrência desta falta, simulada por este trabalho. Em [8], o valor total de R_{R-SFCL} alcançado em 60 ms foi de 87,5 m Ω , e através do ATPDraw foi de 86,4 m Ω , resultando em uma diferença de 1,26% entre os dois casos observados.

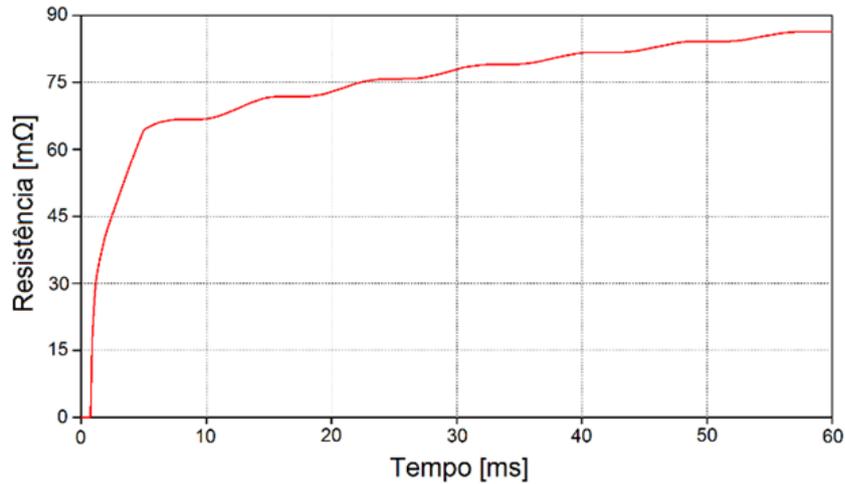


Figura 27: Variação da resistência equivalente do R-SFCL, obtida via simulação ATPDraw [25].

A Figura 28 apresenta a variação de temperatura em cada camada, devida à passagem da corrente de curto-circuito pelos mesmos. Ao compará-la com a Figura 12, ambas apresentaram valores próximos a 148 K para a resistência *shunt* (aço inox) e também na faixa de 155 K a 160 K para as demais camadas, em um tempo igual a 60 ms.

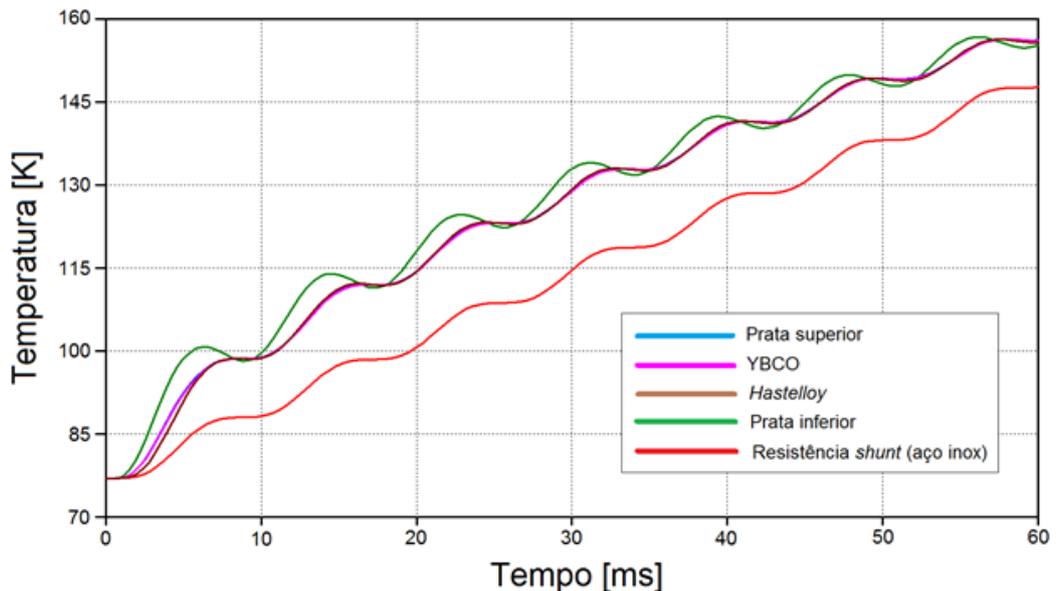


Figura 28: Variação da temperatura das camadas, obtidas via ATPDraw [25].

De acordo com os resultados apresentados nesta seção, é possível afirmar que a modelagem proposta apresenta comportamentos semelhantes aos exibidos em ensaios e simulações na seção 2.8, em relação aos módulos de corrente, temperatura e resistência do R-SFCL. A comparação entre os resultados obtidos mostram que o modelo está validado para aplicação em um caso real de rede de distribuição, conforme realizado no capítulo 4 desta dissertação.

3.7. MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO REAL NO ATPDRAW

Para a avaliação do desempenho do R-SFCL baseado em fitas 2G-YBCO, cuja modelagem foi descrita nas seções anteriores, foi feita uma pesquisa no sistema elétrico do Brasil para encontrar dados de uma rede de uma distribuidora. Observou-se que a rede de distribuição de Búzios no Estado do Rio de Janeiro é um exemplo de sistema que está em constante modernização e crescimento [26], [27], [29]. A concessionária local iniciou um projeto em 2011 para transformar a cidade de Búzios na primeira cidade inteligente da América Latina [26], sendo assim, a rede de Búzios foi modelada em um *software* criado em 1997 de regime permanente conhecido como *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) [28] com execução por meio de programa por linha de comando. O modelo para simulação da rede em Open DSS foi originalmente apresentado em [11].

Pela facilidade de encontrar dados na literatura que permitissem sua modelagem em detalhes levando em conta vários parâmetros da rede real, foi selecionada a rede de distribuição de Búzios para simular transitórios eletromagnéticos após a inserção do R-SFCL. Esta rede será modelada no ATPDraw, *software* de regime permanente e transitórios, que possui uma interface gráfica onde é possível reconhecer os componentes elétricos com grande facilidade, agilizando o trabalho do operador.

Na Figura 29 está o alimentador da rede de distribuição de Búzios estudado, com 16,7 km atendendo 1.550 clientes distribuídos conforme indicado na Tabela 4, entre os 20 bairros no município: Armação, Manguinhos, Búzios, Ferradura, Vila Caranga, Ferradurinha, Cem Bracas, Geribá, Rasa, Bahia Formosa, Centrinho, Jose Gonçalves, Alto de Búzios, Ossos, Portal da Ferradura, Marina Porto Búzios, Bosque Geribá, Ossos, Enseada do Alba e Albatroz.

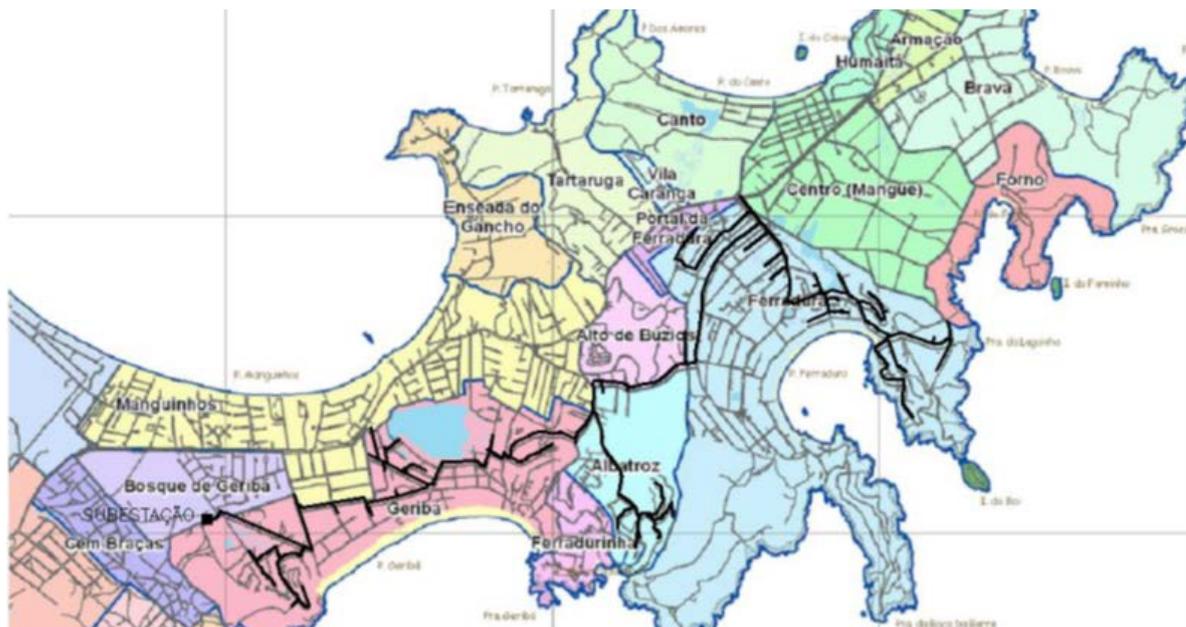


Figura 29: Alimentador da cidade de Armação dos Búzios/RJ; [11].

Tabela 4 - Número de clientes por bairro [11].

Bairro	Nº de Clientes
Armação	29
Manguinhos	334
Búzios	19
Praia Ferradura	286
Vila Carranga	15
Ferradurinha	113
Cem Bracas	18
Geribá	692
Rasa	14
Bahia Formosa	1
Centro	1
Tucuns	1
José Gonçalves	8
Alto de Búzios	2
Portal da Ferradura	5
Marina Porto Búzios	2
Bosque Geribá	1
Ossos	5
Enseada do Alba	2
Albatroz	2
TOTAL	1550

O transformador da subestação ao qual esse alimentador pertence apresenta potência nominal de 25 MVA com uma tensão de 69 kV no primário e 13,8 kV no secundário. A rede de distribuição consiste em um circuito primário radial com 113 transformadores, sendo que grande parte destes (40%) com potência nominal de 75 kVA. Este alimentador possui, 16,7 km de extensão, podendo ser observado na Figura 29. A tensão é de 13,8 kV no sistema de média tensão e 127/220 V na rede de baixa tensão. O tronco desse alimentador possui trechos de rede convencional e compacta.

A Rede de Distribuição (RD) de Búzios já havia sido está modelada anteriormente no OpenDSS [28], é um programa livre e de código aberto. Seu desenvolvimento iniciou em 1997 na Electrotek Concepts, Inc. por Roger Dungan e Thomas McDemolt. Em 2004, o OpenDSS foi comprado pela EPRI Solutions [28]. Essa ferramenta tem sido utilizada para avaliação do ponto de vista de regime permanente o perfil de tensão, perdas elétricas, corrente de operação e fluxo de potência [28]. Porém, como o OpenDSS não é dedicado à simulação de transitórios eletromagnéticos, será necessário realizar sua modelagem em outro programa com essa função. Dessa forma o programa ATPDraw foi escolhido, tendo como motivações o fato de ser um programa livre e extremamente consolidado no meio acadêmico. A rede de distribuição de Búzios foi modelada no ATPDraw e está apresentada completa no Apêndice de quadro A3. A Tabela 5 apresenta os componentes utilizados para modelagem, via biblioteca disponível pela interface do ATPDraw.

Foram estabelecidas 4 análises para comparação dos resultados em regime permanente entre o OpenDss e o ATPDraw: o primeiro cenário imediatamente no secundário do transformador (Barra 1); o segundo próximo ao secundário do transformador (Barra 6); o terceiro cenário na metade do alimentador (Barra 171); e o último cenário foi selecionada a barra que apresentou o maior afundamento de tensão quando o sistema está em operação normal (Barra 343), conforme mostradas na Tabela 6.

Tabela 5 - Componente aplicados para simulação, via ATPDraw.

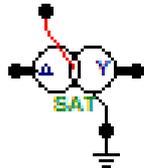
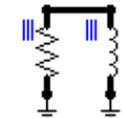
Componente	Descrição	Imagem no ATPDraw
Fonte de tensão componente "ACSOURCE"	- V = 69 kV Alternada	
Transformador componente "SATRAFO"	- V = 69 kV, delta / 13,8 kV, estrela. - R = 0,2665 % para o lado de alta tensão. - X = 7,9956 % para o lado de alta tensão.	
Fonte Equivalente de curto-circuito da Subestação componente "LINESY_3"	- Curto-circuito trifásico = 16,7346 kA. - Curto-circuito Monofásico = 16,7346 kA. - No OpenDss estavam os mesmos valores para curto circuito trifásico e monofásico dentro da Subestação.	
Redes de Distribuição componente "LINEPI3S"	- Para os valores de resistência, indutância e capacitância, foram utilizadas as informações modeladas no OpenDss em [7].	
Cargas componentes "RLC3" em paralelo	- Para os valores de resistência e indutância das cargas, foram utilizadas as informações modeladas no OpenDss em [7]	

Tabela 6 - Análises das tensões de pré-faltas em regime permanente entre OpenDSS e ATPDraw [30].

Cenários	Barras	Tensão OpenDSS (pu)	Tensão ATPDraw (pu)	Erro %
1	1	0,9865	0,9874	0,09
2	6	0,9777	0,9798	0,21
3	171	0,9440	0,9494	0,57
4	343	0,9220	0,9295	0,81

Os valores de tensão em regime permanente obtido na simulação antes das faltas apresentam erros menores que 0,9 %, estando dentro de uma margem de erro aceitável. Os resultados obtidos indicam que a modelagem apresenta resultados consistentes e confiáveis, obtendo desvio máximo de 0,81 %. Os erros apresentados são justificáveis, pois ocorrem devido a quantidade de casas decimais consideradas entre cada programa.

Iniciando as análises das faltas, os sistemas de distribuição de energia elétrica estão susceptíveis as mesmas que podem ser temporárias ou permanentes. As faltas temporárias são

aquelas cuja duração é limitada ao período necessário para restabelecer o serviço, através da operação automática do equipamento de proteção que desligou o circuito ou parte dele. As faltas permanentes, são todas as interrupções não classificadas como temporárias ou programadas. A Tabela 7 fornece os dados estatísticos entre os tipos de faltas e a composição das mesmas [31].

Tabela 7 - Apresenta a composição probabilística entre dos tipos de faltas [31].

Tipos de Curto-circuitos	%	Permanentes (%)	Temporárias (%)
Trifásicas	2	95	5
Bifásica	11	70	30
Monofásica (Fase-Terra)	79	20	80
Outros	8	-	-

Essas faltas no sistema são normalmente provocadas pela ação de descargas atmosféricas, contatos de árvores e animais às partes vivas do sistema, falhas de equipamento e erro humano [31], [32]. Neste trabalho serão consideradas as faltas em regime permanente trifásicas, bifásicas (fase-fase) e monofásicas (fase-terra). Pela Tabela 8, os valores das faltas são maiores na análise 1, pois a falta deste cenário é no secundário do transformador de 25 MVA. Observa-se que a discrepância máxima dos resultados entre ATP e OpenDSS está da ordem de até 1% para a maior parte dos cenários estudados.

Tabela 8 - Faltas analisadas em cada cenário no OpenDSS e ATPDraw [30].

Cenários	Barras	Tipo de Faltas	Faltas OPEN DSS (kA)	Faltas ATP Draw (kA)	Erro %
1	1	Trifásica	11,34	11,31	0,26
		Bifásica	11,51	11,59	0,70
		Fase Terra	11,86	11,84	0,17
2	6	Trifásica	8,97	9,08	1,23
		Bifásica	8,32	8,31	0,08
		Fase Terra	6,76	6,77	0,15
3	171	Trifásica	2,63	2,76	4,94
		Bifásica	2,33	2,33	0,00
		Fase Terra	1,71	1,73	1,17
4	343	Trifásica	1,73	1,83	5,78
		Bifásica	1,57	1,57	0,00
		Fase Terra	1,07	1,08	0,93

Ao analisar as correntes mostradas na Tabela 8, o cenário 1 e 3 apresentaram os maiores e menores valores, uma vez que os pontos escolhidos foram o secundário do trafo de 25 MVA e a barra fisicamente mais distante do sistema, respectivamente. Conforme ilustrado na Figura 29, o sistema é do tipo radial e não contém GD conectada ao mesmo, portando existe uma tendência de que aumente o valor total da impedância da linha ao longo de seu comprimento, diminuindo o valor da corrente de falta nos pontos mais distantes.

Como pode ser observado nos resultados, os softwares OpenDSS (de regime permanente) e ATPDraw (de transitórios eletromagnéticos e regime permanente) apresentam respostas compatíveis, desta forma validando a utilização dos mesmos.

3.8. SIMULAÇÃO DO LIMITADOR DE CORRENTE NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Cada rede de distribuição tem as suas características, sendo assim, para o dimensionamento do limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo de fitas 2G-YBCO é necessário investigar a rede de distribuição do município de Búzios apresentada anteriormente. Como o sistema de Búzios não é tão grande, a localização do limitador de corrente deve ficar no alimentador da rede em série com a mesma. O transformador da subestação ao qual esse alimentador pertence apresenta potência nominal de 25 MVA com uma tensão de 69 kV no primário e 13,8 kV no secundário. Para o R-SFCL funcionar limitando a corrente na subestação, o mesmo será instalado no secundário deste transformador. Como o sistema é trifásico será necessário um banco com três limitadores, sendo um para cada fase.

No Brasil o CEPEL com seu laboratório de supercondutividade elaborou um trabalho com o R-SFCL [33] instalado no secundário do transformador, porém foram utilizados limitadores do tipo MCP-BSCCO-2212 que são módulos na forma de bastão submetidos uma carga hipotética. Porém, nesta dissertação está sendo utilizado o limitador supercondutor resistivo de fitas 2G-YBCO, pelo fato de apresentar mais vantagens conforme indicado no capítulo 2 desta dissertação. Esta seção tem como objetivo apresentar o dimensionamento do R-SFCL modelado ATPDraw para o mesmo ser aplicado na rede de distribuição real utilizada.

A Figura 30 apresenta o alimentador analisado da rede de Búzios, com marcação da posição do disjuntor que interliga o secundário do transformador com a primeira barra do sistema, que vai para as redes de distribuição e cargas. A subestação, na qual o alimentador analisado se encontra, existe um transformador de 25 MVA, delta-estrela aterrado, com uma relação de transformação de 69 kV para 13,8 kV.

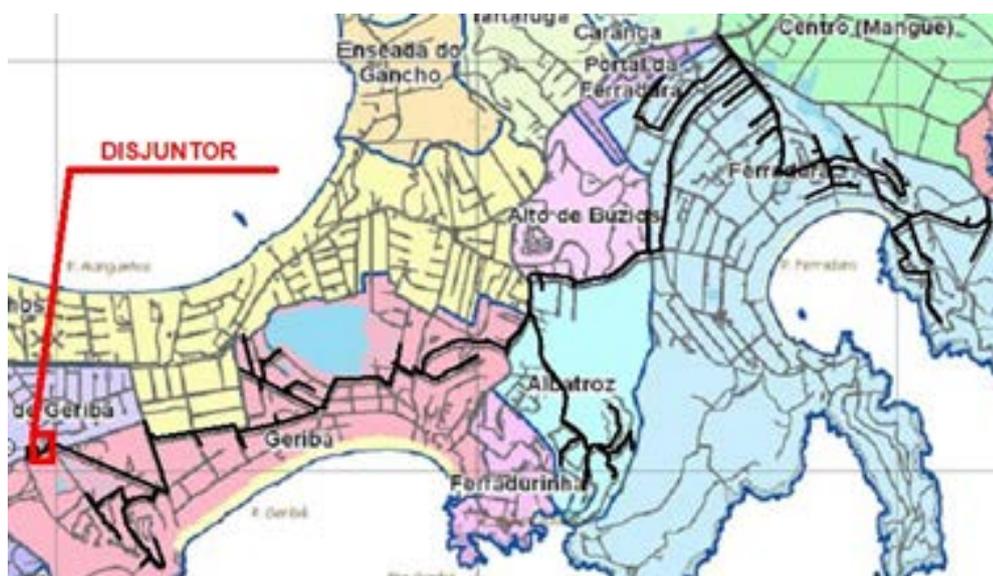


Figura 30: Alimentador da cidade de Armação dos Búzios/RJ. Com disjuntor entre o secundário do transformador e a primeira barra [11].

Foi escolhido o secundário do transformador para instalação do R-SFCL, pelo fato de ser o local do sistema com o maior nível de curto-circuito devido a contribuição do gerador. O restante do sistema é radial apenas com a rede de distribuição e os clientes conectados ao alimentador de Búzios, foi constatado que mais de 89% das unidades consumidoras são residências [11] e o restante são pequenas lojas, desta forma as cargas não contribuem com entrada de corrente para o sistema, sendo a carga representada pelo modelo de uma impedância conectada na barra, isto produz uma variação da potência proporcional ao quadrado da tensão, conforme a fórmula $P + jQ = |V|^2 / Z$ (modelo chamado de impedância constante).

Para a correta aplicação do limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo, é necessário que o dispositivo seja especificado de acordo com as características do sistema de Búzios. Há três questões principais a serem tratadas na especificação do limitador para que seja adequadamente instalado junto ao disjuntor no secundário do transformador:

- O valor máximo de corrente esperado em condições normais de operação em regime permanente;
- O valor máximo da tensão admissível sobre o limitador, sendo que a tensão máxima que cada elemento limitador escolhido por este trabalho pode suportar é de 430 V;
- O valor de limitação de corrente de curto-circuito que se deseja limitar.

Pelo fato da Armação dos Búzios ser um polo turístico, durante a alta temporada é o período que ocorre o máximo carregamento do sistema. Como janeiro é o mês com maiores níveis de consumo, foi utilizada a média das medições do mês de janeiro de 2014 que está no OpenDSS [11] ilustrado no Anexo I.

Para a determinação da corrente total fluindo no secundário do transformador de regime permanente, foi realizada uma simulação de acordo com o circuito apresentado na Figura 31. A simulação considera o gerador 100 % carregado alimentando a rede com as cargas através do transformador, o valor da corrente eficaz resultante foi de 384,34 A_{rms} e fazendo $I = 384,34 \times \sqrt{2}$, tem o valor de pico 543,54 A_{pico}.

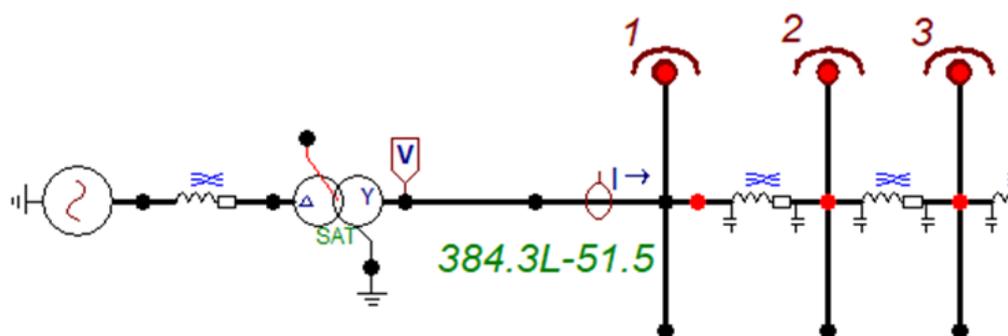


Figura 31: Corrente total no secundário do transformador.

O critério apresentado em [10] utiliza a Equação (20) de forma adaptada ao dimensionamento do número de elementos limitadores do equipamento R-SFCL em paralelo. Essa análise é necessária, para não queimar fitas supercondutoras. O limitador, deve ser dimensionado de forma que permita a operação normal do sistema, em condições de operação com a corrente nominal.

$$n_{elementos} = \frac{I_{pico}}{I_c n_{fios}} \quad (20)$$

Sabe-se que:

- $n_{elementos}$ – Número de elementos em paralelo;
- I_{pico} – Valor de pico da corrente máxima fluindo pelo limitador em regime permanente (A);
- I_c – Valor de corrente crítica do material supercondutor (A);
- n_{fios} – Número de fitas 2G-YBCO em paralelo utilizadas em um elemento limitador do R-SFCL.

Considerando o valor de pico da corrente máxima na fase A obtido de 543,54 A_{pico}, a corrente crítica das fitas 2G HTS de 275 A. Para um arranjo de 4 fitas em paralelo por elemento limitador, obtêm-se o valor aproximado de 0,49. Desta forma é constatado que 1 elemento limitador é suficiente.

No caso da rede de distribuição analisada o equipamento que contribui para o curto circuito é o gerador, porque fornece potência de 25 MVA no sistema, então os maiores níveis de curto-circuito seriam nas proximidades do gerador e do transformador que abaixa a tensão para 13,8 kV no secundário do mesmo. Estes equipamentos fazem parte da subestação, assim como, os equipamentos de controle e proteção. Importante destacar que a impedância dos geradores possui a razão entre reatância e resistência, X/R, muito elevada, apresentando correntes de curto-circuito com grande assimetria. Esta assimetria leva à especificação de equipamentos com capacidade de corrente de curto-circuito ainda maiores, seja corrente de pico no primeiro ciclo ou de corrente eficaz de interrupção [34].

A corrente máxima de curto-circuito da rede de distribuição de Búzios ocorre no secundário do transformador. Na Figura 32 está a realização da falta na Barra 1 (secundário do transformador).

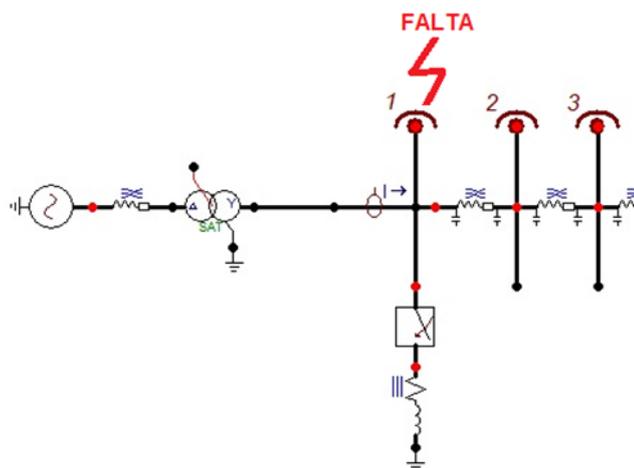


Figura 32: Corrente de curto-circuito no secundário do transformador.

A falta na Barra 1, indica o nível máximo de falta assimétrica da rede de distribuição de Búzios de $12,36 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $17,47 \text{ kA}_{\text{pico}}$, sabe-se que a RD opera atualmente sem problemas com relação as faltas. Porém, para que seja possível aplicar e avaliar o R-SFCL em uma rede de distribuição real, essa dissertação vai considerar um disjuntor posicionado no secundário do transformador antes da Barra 1, para proteger a rede de distribuição e os consumidores (clientes) com capacidade de interrupção assimétrica de $6 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e de $8,48 \text{ kA}_{\text{pico}}$. A utilização deste disjuntor supõe, a necessidade de proteção das redes de distribuição e dos consumidores (clientes) a partir da Barra 1 para este nível de falta do disjuntor. O limitador supercondutor será dimensionado para reduzir o nível de curto para níveis menores que do disjuntor, através da resistência *shunt* que tem a finalidade de conduzir e limitar a corrente de falta após o supercondutor transitar para o estado normal, evitando a degradação da fita supercondutora por Efeito Joule.

Antes de definir o valor o *shunt* é preciso dimensionar o limitador, com relação ao critério de tensão, por que desta forma sabe-se a quantidade de limitadores que são necessários em série para suportar a tensão dos barramentos que será instalado. A máxima tensão na barra, que o limitador está instalado no secundário do transformador é $13,8 \text{ kV}_{\text{Linha}}$ e por fase seria $13800 / \sqrt{3} = 7967,4334 \text{ V} = 7,97 \text{ kV}$.

A tensão de $7,97 \text{ kV}$ é a tensão total que o limitador será submetido, como o valor máximo de tensão suportável pelas fitas 2G-YBCO é tipicamente de $0,5 \text{ V/cm}$ [3] e conforme mostrado no capítulo 2, o modelo da fita é SF12100 da *SuperPower*, que tem como características comprimento de 430 cm , desta forma, uma fita resulta em $0,5 \times 430 = 215 \text{ V}$.

Conforme dimensionado na Equação (20), está sendo proposto um limitador com 4 fitas em paralelo em série com mais 4 fitas em paralelo conforme Figura 33.

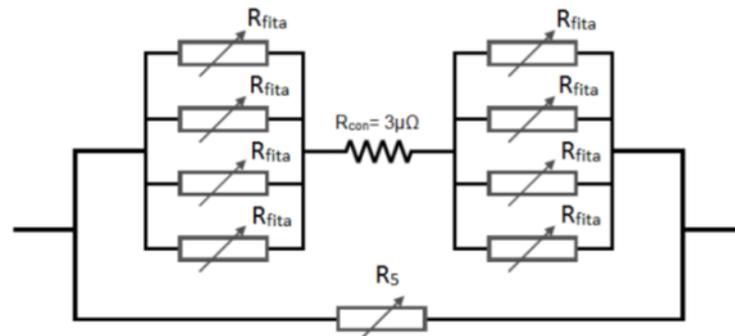


Figura 33: Circuito equivalente do protótipo do R-SFCL dimensionado.

Na Figura 33 como são utilizadas 4 fitas em paralelo em série com mais 4 fitas em paralelo, conclui-se que um limitador tem a tensão máxima de 430 V. Desta forma, pela Equação (21) é apresentada a forma de calcular a quantidade de limitadores em série necessários por fase:

$$n_{elementos} = \frac{V_{fase}}{V_{Limitador}} \quad (21)$$

Sabe – se que:

- $n_{elementos}$ – Número de limitadores em série por fase;
- V_{fase} – Tensão em cada fase, que o limitador é submetido (kV);
- $V_{Limitador}$ – Tensão máxima que o limitador suporta (kV).

A partir dos valores de $V_{fase} = 7,97$ kV e $V_{Limitador} = 430$ V, se obtêm o quociente aproximado de 18,53. Desta forma é constatado que 19 limitadores em série em cada fase atendem as condições de falta propostas neste estudo.

Finalmente, com as informações completas levantadas, é possível dimensionar o *shunt* e conecta-la em paralelo com o arranjo de fitas, conforme apresentado no circuito equivalente do protótipo na Figura 34, que ilustra o arranjo sugerido.



Figura 34: Arranjo da bobina do R-SFCL com *shunt* paralelo [8].

Para dimensionar o *shunt* o R-SFCL foi ajustado com relação à quantidade de elementos em paralelo e com relação a quantidade de elementos em série. Sabendo que o disjuntor tem capacidade de interrupção assimétrica de $6 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $8,48 \text{ kA}_{\text{pico}}$. O limitador foi ajustado e indicado no Apêndice de quadro A2, com relação a resistência *shunt*.

A resistência *shunt* foi dimensionada da seguinte forma, primeiramente executa o limitador ajustado e proposto nesta seção 3.8 na rede de Búzios modelada no ATPDraw e validada na seção 3.7, conforme Figura 35.

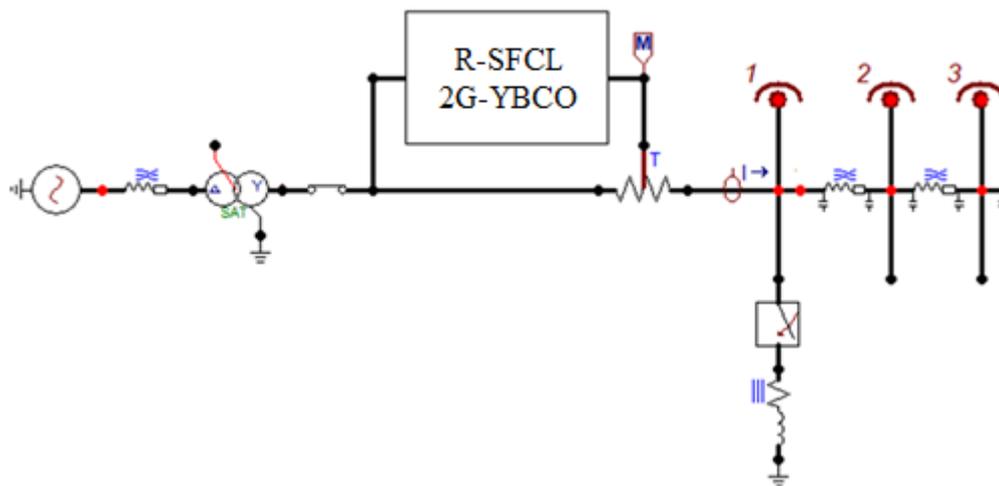


Figura 35: R-SFCL no secundário do transformador

Se na primeira vez que executar o ATPDraw a corrente de curto-circuito, não estiver limitada até valores inferiores aos disjuntores de proteção do sistema, então aumenta-se a resistência do *shunt* e executa-se novamente. Deve-se executar sucessivamente até que a corrente de curto-circuito seja limitada para valores inferiores ao do disjuntor de proteção, de pelo menos 1 kA [13].

Sendo assim, o comprimento do *shunt* resultou em 510 cm. Na Figura 36 estão indicados os valores de faltas assimétricas de 4,90 kA_{rms} e 6,93 kA_{pico} para este *shunt* dimensionado.

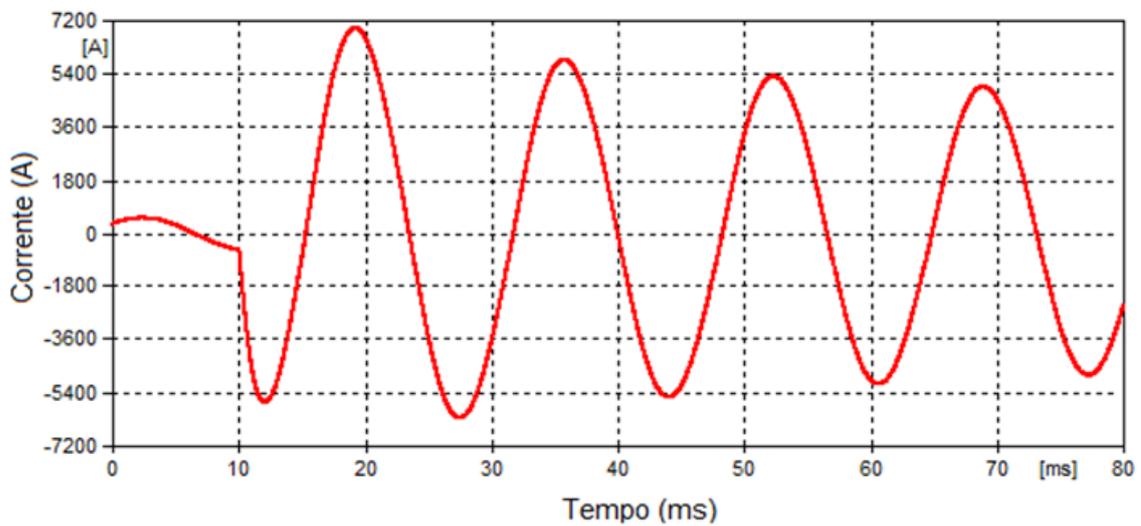


Figura 36: Corrente com curto-circuito na Barra 1 para dimensionamento do *shunt*.

Para avaliar o desempenho do R-SFCL dimensionado nesta seção, o R-SFCL será incluído no modelo dinâmico da rede de Búzios. Foram criados 4 cenários para as análises que serão discutidos em conjunto com os resultados das simulações apresentados no capítulo 4.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO R-SFCL NA REDE

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações realizadas com o limitador de curto-circuito supercondutor inserido no sistema da rede de distribuição de Búzios. A atuação do limitador foi analisada por meio de 4 cenários e as medições apresentadas na forma de gráficos no secundário do transformador, onde o curto-circuito é mais crítico (elevado), independe da barra que a falta foi aplicada. Como o curto-circuito é trifásico, as formas de onda nas três fases são semelhantes, sendo a diferença entre elas basicamente dada pelo ângulo da tensão de cada fase no momento da falta. Assim, optou-se por apresentar somente os gráficos da fase A.

Para o primeiro cenário a falta é aplicada imediatamente no secundário do transformador, na Barra 1, pois é o local que apresentou o maior nível de curto-circuito (11,86 kA_{rms} para falta fase-terra). No segundo cenário o curto-circuito é realizado nas proximidades do secundário do (Barra 6). O terceiro cenário é a realização da falta aproximadamente no meio do arranjo radial da rede (Barra 171), para analisar o quanto o R-SFCL reduziu a corrente de falta no secundário do transformador desta barra, uma vez que a rede de Búzios é um arranjo com somente um alimentador no início. O último cenário selecionou para falta a Barra 335, que é no final da rede de distribuição de Búzios, com objetivo similar ao da Barra 171.

Nas simulações foram aplicadas as faltas ocorrendo em $t = 0,1$ s, com tempo total de simulação pós-falta de 0,08 s. Com os resultados apresentados nos 4 cenários, observa-se a efetiva limitação da corrente de falta pela utilização do R-SFCL, no primeiro pico de corrente após a falta a corrente limitada é maior que os demais. Isto devido a transição das fitas 2G-YBCO do estado supercondutor para o estado normal. Durante o primeiro ciclo, a transição para o estado normal ainda está ocorrendo, ou seja, as fitas 2G-YBCO ainda estão transitando para um estado resistivo. Após a transição, a resistência elétrica das fitas 2G-YBCO se torna maior que a do *shunt*, fazendo com que a corrente de curto-circuito atravessasse pelo *shunt* e seja limitada.

4.1. CENÁRIO 1 – FALTA NA BARRA 1:

A seguir serão apresentados os resultados e simulações da falta na Barra 1 observando a corrente no secundário do transformador. Antes da falta o sistema estava em regime permanente, com corrente de $384,34 \text{ A}_{\text{rms}}$ e $543,54 \text{ A}_{\text{pico}}$. Após a falta na Barra 1, a corrente sem o limitador chegou a $10,80 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $15,28 \text{ kA}_{\text{pico}}$. Com a atuação do R-SFCL, a corrente foi limitada para $4,90 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $6,93 \text{ kA}_{\text{pico}}$, conforme apresentado na Figura 37 e Tabela 9, desta forma conclui-se a redução percentual da corrente de falta pela utilização do R-SFCL.

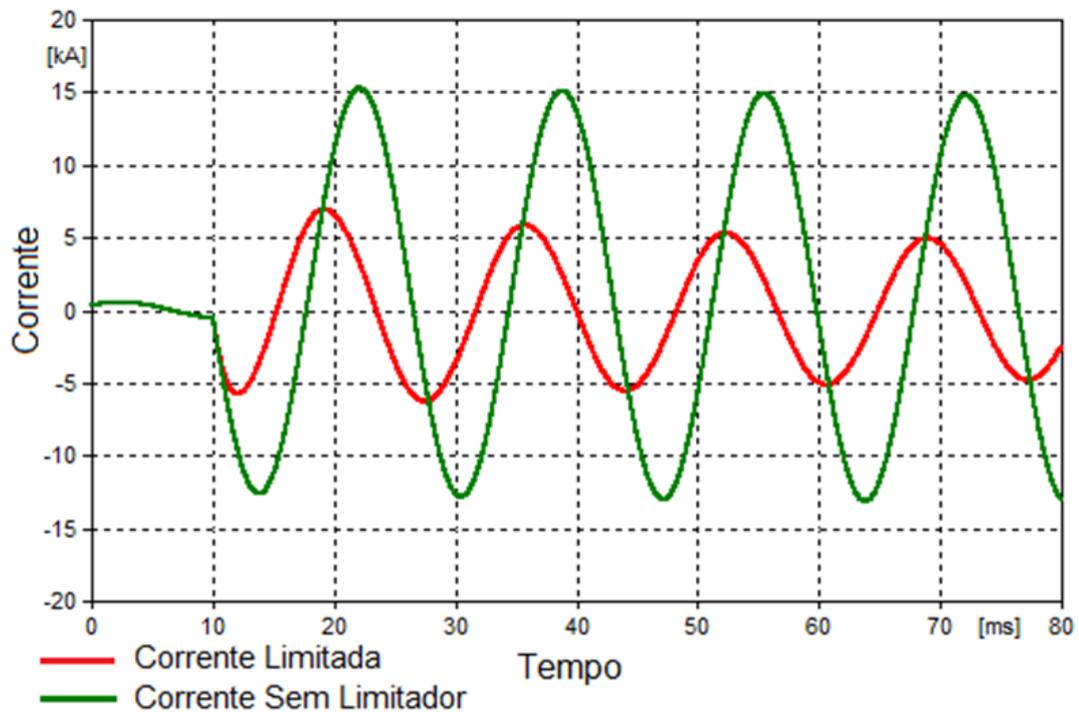


Figura 37: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 1.

O R-SFCL atuou reduzindo a corrente de falta atendendo o limite do disjuntor, que protege a rede de distribuição de búzios localizado na Barra 1. Conforme citado no capítulo 3, o disjuntor tem capacidade de interrupção assimétrica para faltas com limite máximo de $6 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e de pico $8,48 \text{ kA}_{\text{pico}}$, o R-SFCL limitou para $4,90 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $6,93 \text{ kA}_{\text{pico}}$ a falta, isto é, para valores abaixo do limite do disjuntor permitindo a atuação correta do mesmo sem danificar os equipamentos de proteção e da rede de distribuição de Búzios.

A Figura 38 apresenta os resultados simulados da tensão no secundário do transformador. Antes da falta em $t = 0,1 \text{ s}$ o sistema estava em regime permanente, com tensão de $11,12 \text{ kV}_{\text{pico}}$. Ao realizar a falta, a tensão sem a atuação do limitador reduziu de forma brusca, afundando para $1,4 \text{ kV}_{\text{pico}}$. Entretanto, com a atuação do R-SFCL, essa redução

brusca de tensão é evitada, de forma que o limitador mantém o nível de tensão praticamente sem alteração, em níveis adequados de utilização de $10,16 \text{ kV}_{\text{pico}}$.

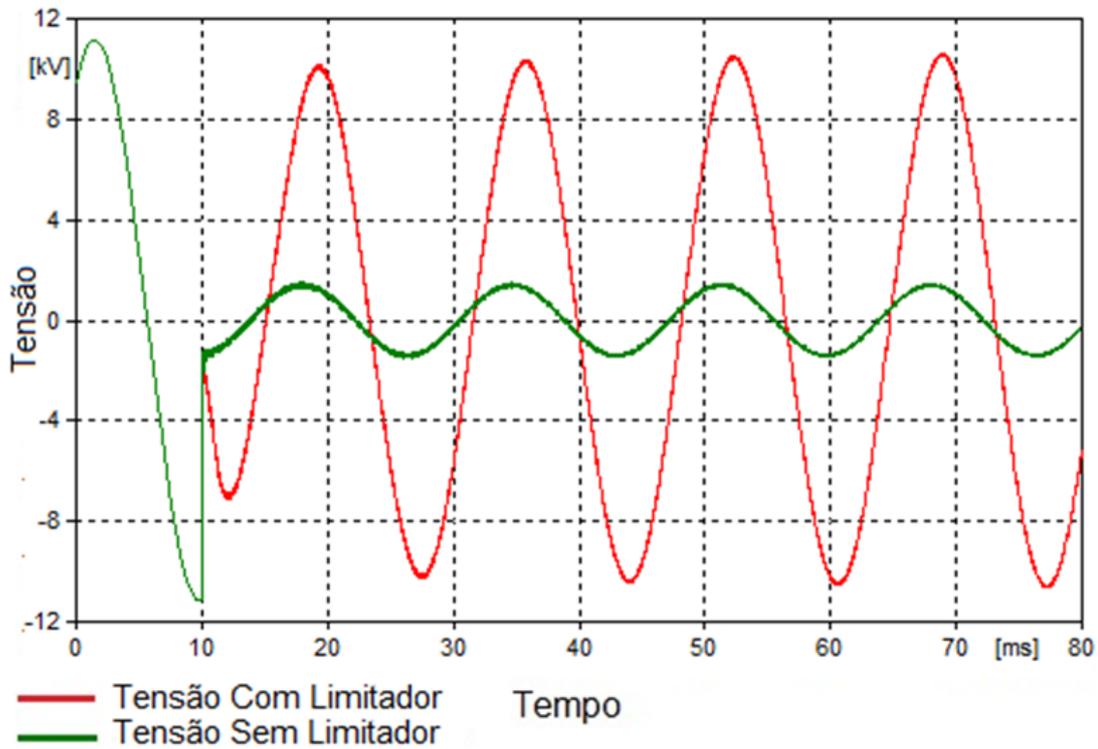


Figura 38: Comparação da medição da tensão no secundário do transformador com falta na Barra 1

4.2. CENÁRIO 2 – FALTA NA BARRA 6:

Foi escolhida para falta uma barra nas proximidades do secundário do transformador para analisar os resultados das simulações (Barra 6). O sistema estava em regime permanente antes da falta, com corrente de $384,34 \text{ A}_{\text{rms}}$ e $543,54 \text{ A}_{\text{pico}}$. Ao realizar a falta na Barra 6, a corrente sem o limitador assimétrica chegou a $9,07 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $12,82 \text{ kA}_{\text{pico}}$. Com a atuação do R-SFCL, a corrente foi limitada para $4,46 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $6,31 \text{ kA}_{\text{pico}}$ conforme apresentado na Figura 39 e Tabela 9. Desta forma conclui-se a redução percentual da corrente de falta pela utilização do R-SFCL.

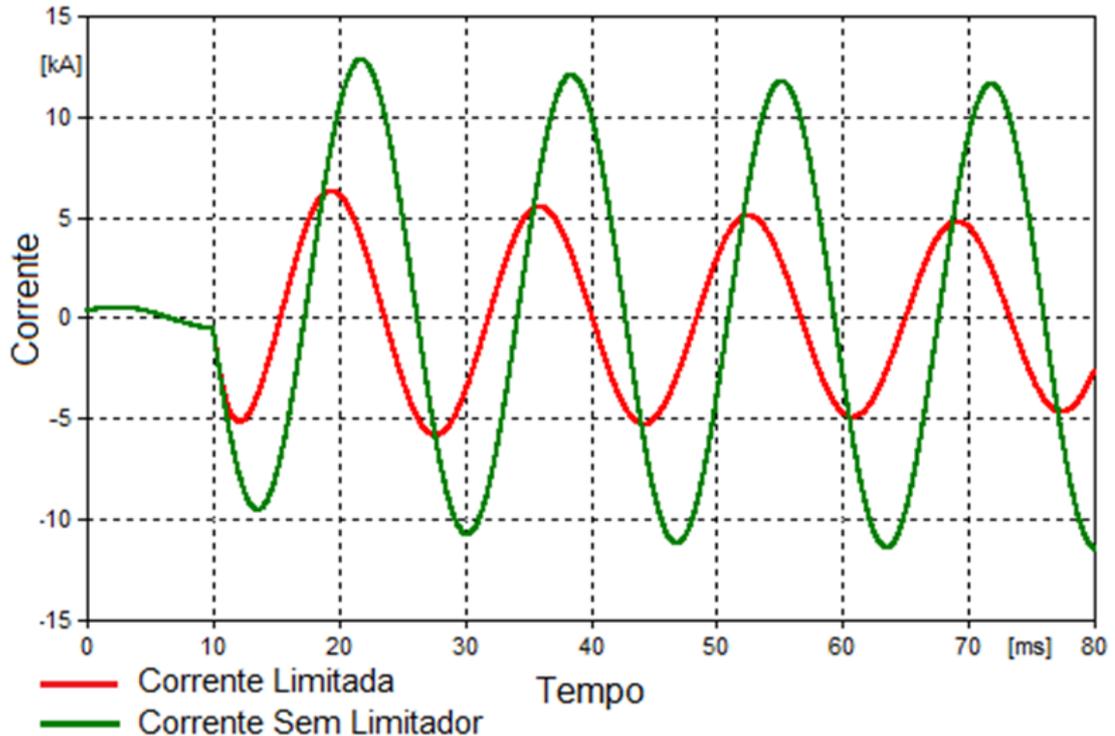


Figura 39: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 6.

O R-SFCL atuou reduzindo a corrente de falta atendendo o limite do disjuntor, que protege a rede de distribuição de búzios localizado na Barra 1. Conforme indicado no capítulo 3 o disjuntor tem capacidade de interrupção assimétrica para faltas com limite máximo de $6 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e de pico $8,48 \text{ kA}_{\text{pico}}$, o R-SFCL limitou para $4,46 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e $6,31 \text{ kA}_{\text{pico}}$ a falta, isto é, para valores abaixo do limite do disjuntor permitindo a atuação correta do mesmo sem danificar os equipamentos de proteção e da rede de distribuição de Búzios.

Antes da falta em $t = 0,1 \text{ s}$, o sistema estava em regime permanente, com tensão de $11,12 \text{ kV}_{\text{pico}}$. Ao realizar a falta, a tensão sem a atuação do limitador reduziu de forma brusca (afundamento) para $3,45 \text{ kV}_{\text{pico}}$. Observa-se que reduziu menos que para o cenário 1 por que como a rede de búzios tem um arranjo radial, quanto mais distante do ponto da geração for a falta, menor será o afundamento de tensão no secundário do transformador. Com a atuação do R-SFCL conforme apresentado na Figura 40, a redução brusca de tensão é evitada, de forma que o limitador mantém o nível de tensão em níveis adequados de utilização de $9,72 \text{ kV}_{\text{pico}}$.

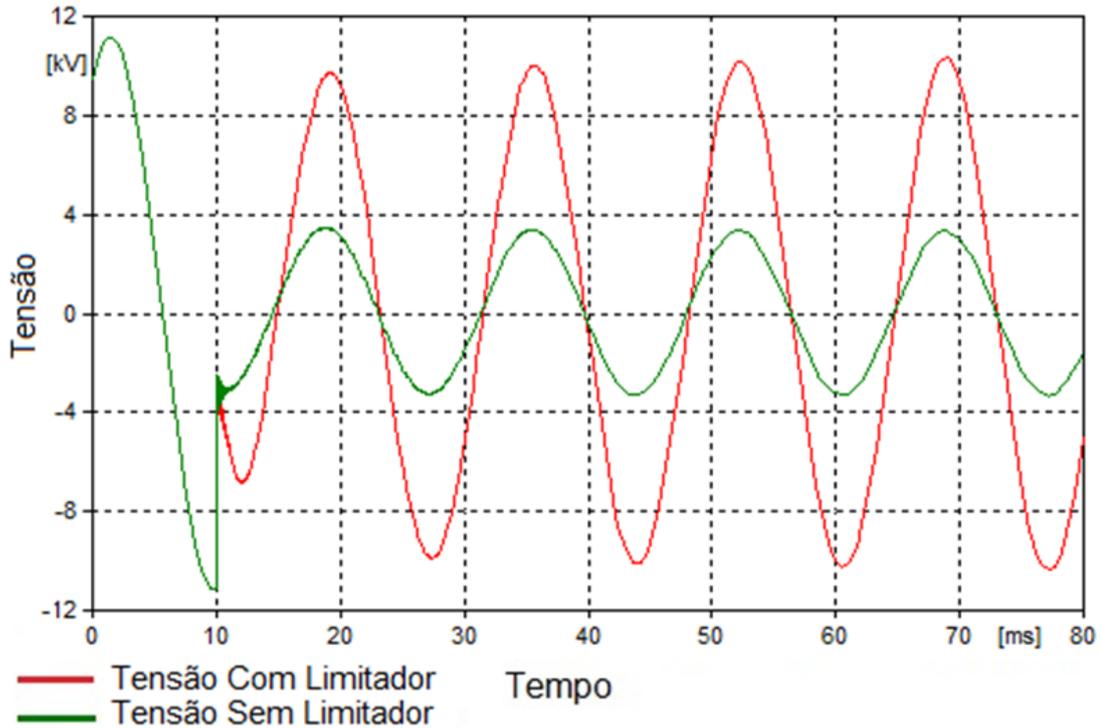


Figura 40: Comparação da medição da tensão no secundário do transformador com falta na Barra 6.

4.3. CENÁRIO 3 – FALTA NA BARRA 171:

O terceiro cenário é a realização da falta aproximadamente no meio do arranjo radial da rede de Búzios, na Barra 171 com medição da corrente no secundário do transformador. Antes da falta o sistema estava em regime permanente, com corrente de $384,34 A_{\text{rms}}$ e $543,54 A_{\text{pico}}$. Ao realizar a falta na Barra 171, a corrente sem o limitador assimétrica chegou a $2,95 kA_{\text{rms}}$ e $4,17 kA_{\text{pico}}$. Com a atuação do R-SFCL, a corrente foi limitada para $2,23 kA_{\text{rms}}$ e $3,15 kA_{\text{pico}}$ conforme apresentado na Figura 41 e Tabela 9. Como a corrente de falta assimétrica no secundário do transformador sem o limitador é pequena devido à falta ser em uma barra mais distante, como consequência a limitação da corrente também é pequena [7]. Em [7], também constatou que os limitadores supercondutores, são mais eficientes na limitação quando a corrente de falta é maior, pois quanto maior o valor da corrente de falta, maior será o valor da densidade de corrente J_{sp} que flui no material supercondutor. E quanto maior o valor desta densidade de corrente, maior será a derivada temporal da resistência do limitador. Quando mais rápido este aumento da resistência do limitador, mais rápida será a atuação deste, acarretando uma limitação de corrente de curto-circuito mais efetiva [7].

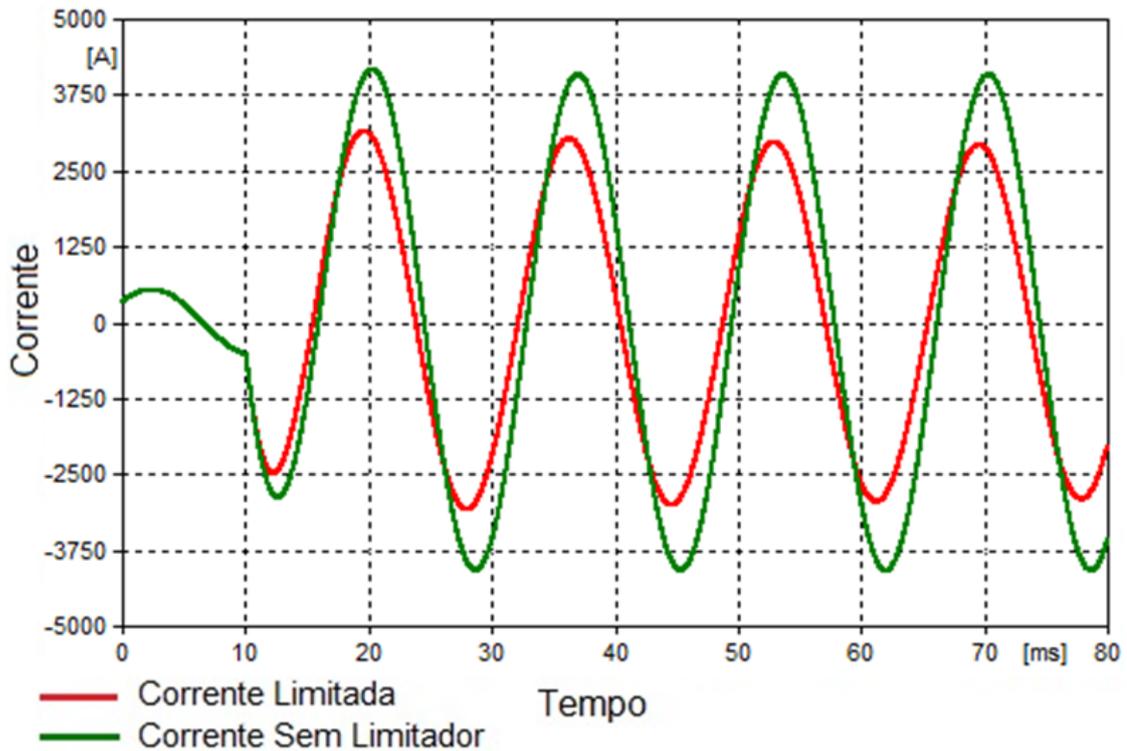


Figura 41: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 171.

Neste caso como a corrente de falta no secundário do transformador sem o limitador é pequena, o disjuntor não tem a necessidade de atuar por que o limite de capacidade de interrupção assimétrica para faltas do mesmo é no máximo de $6 \text{ kA}_{\text{rms}}$ e de pico $8,48 \text{ kA}_{\text{pico}}$. Não precisaria nem da atuação do R-SFCL para proteção do circuito, porém melhor visualizar-se como ficaria a limitação de corrente em um caso deste, foi mantido o limitador.

Como a falta está na Barra 171, que está longe do ponto de medição que é no secundário do transformador, então a falta sem o limitador tem apenas uma pequena redução da tensão de $11,12 \text{ kV}_{\text{pico}}$ para $9,29 \text{ kV}_{\text{pico}}$. Não precisaria do limitador, para manter a tensão em níveis aceitáveis, porém para visualizar como ficaria com atuação do R-SFCL, a Figura 42 indica o nível de $10,16 \text{ kV}_{\text{pico}}$ de tensão mantida pelo limitador.

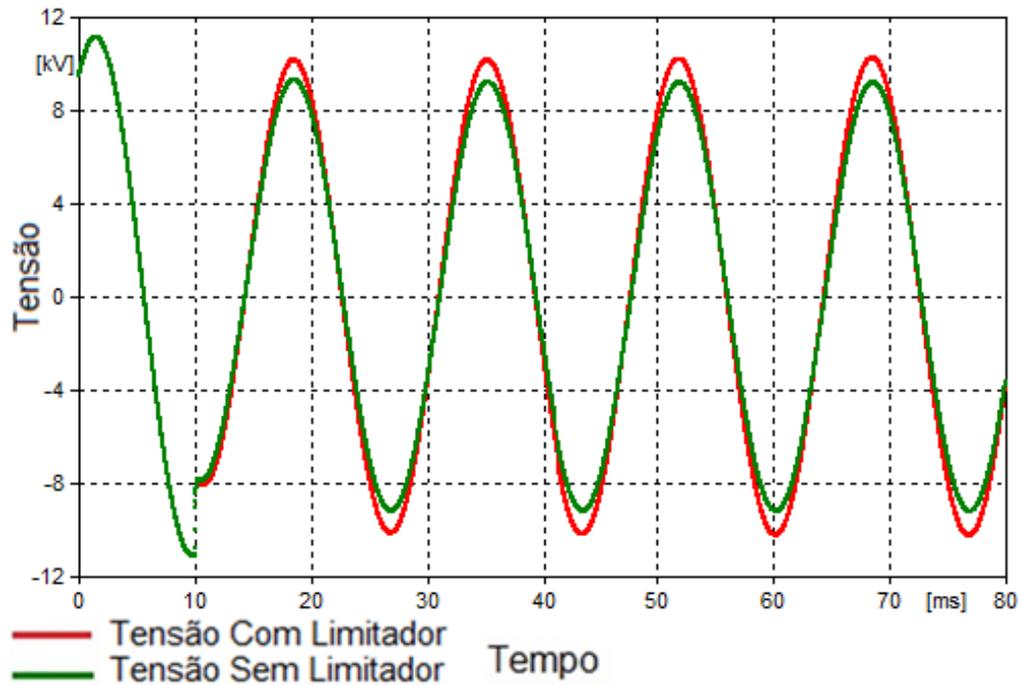


Figura 43: Comparação da medição da tensão no secundário do transformador com falta na Barra 171.

4.4. CENÁRIO 4 – FALTA NA BARRA 335:

O último cenário selecionado para falta a Barra 335, foi escolhido apenas porque é o final da rede de distribuição, para visualizar a resposta do R-SFCL com uma falta distante do secundário do transformador. Antes da falta o sistema estava em regime permanente, com corrente de $384,34 A_{rms}$ e $543,54 A_{pico}$. Ao realizar a falta na Barra 335, a corrente sem o limitador assimétrica chegou a $2,29 kA_{rms}$ e $3,24 kA_{pico}$. Com a atuação do R-SFCL, a corrente foi limitada para $1,90 kA_{rms}$ e $2,68 kA_{pico}$ conforme apresentado na Figura 43 e Tabela 9. De acordo com os valores, o comportamento desta simulação é similar ao cenário 3, com falta na Barra 171.

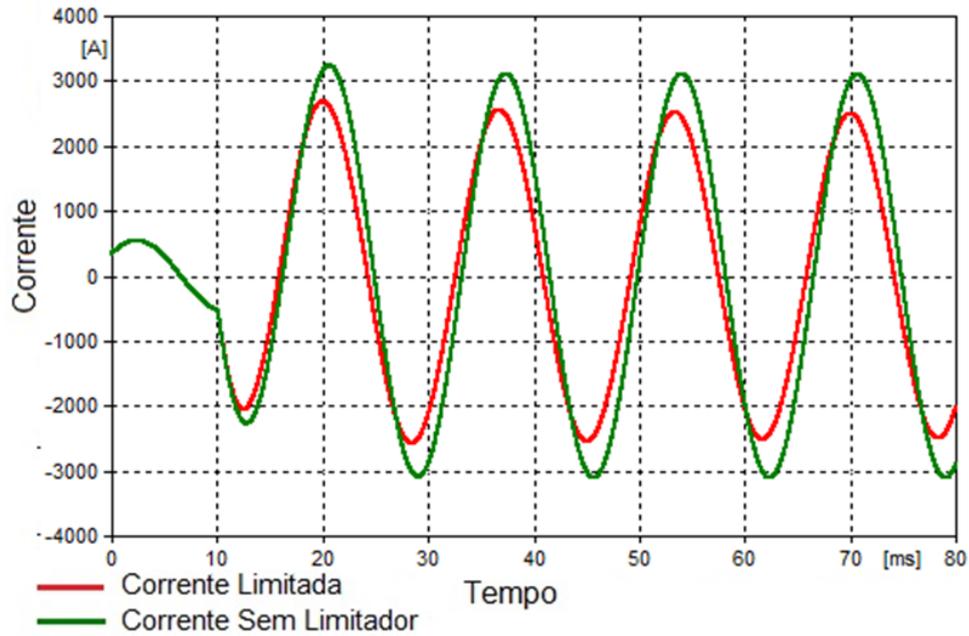


Figura 44: Comparação entre corrente limitada e sem limitador com falta na Barra 335.

Assim como no Cenário 3, a falta na Barra 335 está longe da medição, que é no secundário do transformador. Desta forma espera-se um comportamento similar com o mesmo. Então a falta sem o limitador tem apenas uma pequena redução da tensão de 11,12 kV_{pico} para 9,55 kV_{pico} . Desta forma, o limitador não é necessário para manter a tensão em níveis aceitáveis, porém para visualizar como ficaria com atuação do R-SFCL, na Figura 44 indica o nível de 10,03 kV_{pico} de tensão mantida pelo limitador.

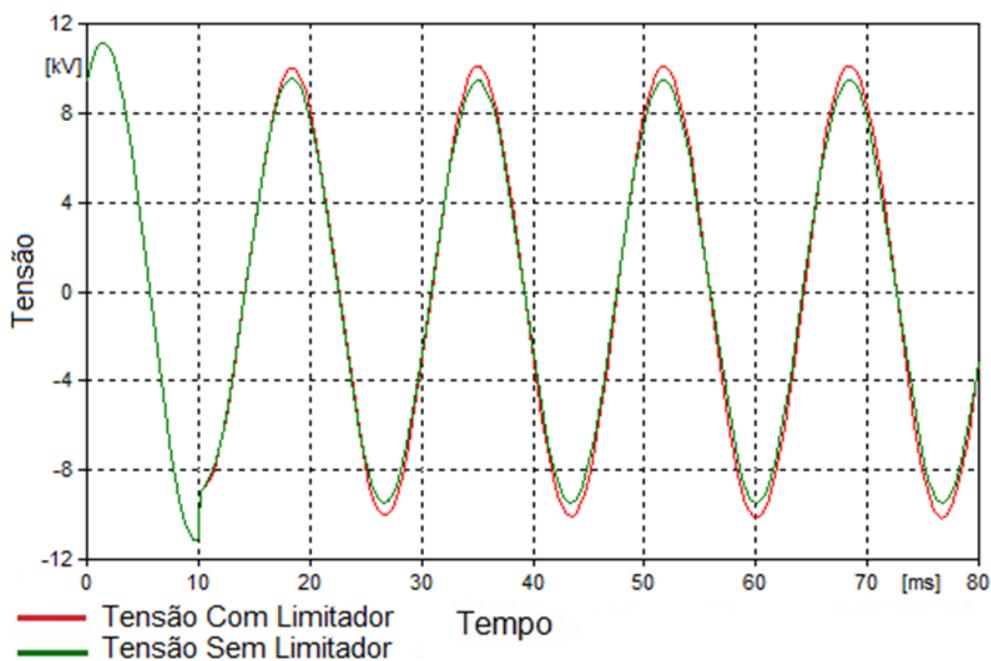


Figura 45: Comparação entre tensões sem e com limitador para falta na Barra 335.

4.5. ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DA LIMITAÇÃO DE CORRENTE COM RELAÇÃO AOS CENÁRIOS

Para visualizar de forma numérica a eficiência da limitação da corrente, pode-se definir um índice de limitação de corrente de crista β , como sendo a razão do valor do primeiro pico da corrente limitada pelo valor da primeira crista da corrente sem o limitador, de acordo com a Equação (22):

$$\beta = \frac{1^{\circ} \text{ Pico Limitada}}{1^{\circ} \text{ Pico Sem Limitador}} \quad (22)$$

Para saber o quanto é eficaz a limitação da corrente, quanto mais próximo de zero for o valor de β , melhor será a limitação. E quanto mais próximo de 1, pior será a limitação.

A Tabela 9 mostra que a limitação mais eficiente é com maior corrente de falta sem o limitador. Isto por que quanto maior for o valor da corrente de falta, maior será o valor da densidade de corrente que flui no material supercondutor e quanto maior esta, mais rápido será o desenvolvimento da resistência do limitador. Quanto mais rápido este aumento da resistência do limitador, mais rápida também é a atuação deste, acarretando numa limitação de corrente de curto-circuito mais efetiva, conforme também constatado em [7].

Tabela 9 - Indica o índice de eficiência dos 4 cenários.

Cenários	Faltas nas Barras	1º Pico corrente limitada (kA)	1º Pico Corrente Sem Limitador (kA)	β (índices de eficiência)
1	1	6,93	15,28	0,45
2	6	6,31	12,82	0,49
3	171	3,15	4,17	0,76
4	335	2,68	3,24	0,83

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo da utilização dos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores resistivos (R-SFCL) em uma rede de distribuição real, através da utilização do *software* mais conhecido no mercado, para sistemas elétricos de regime transitórios e permanente o ATPDraw (*Alternative Transients Program*). Para isto foi modelado um R-SFCL de fitas 2G no ATPDraw.

Foi escolhida a rede de distribuição de Búzios e modelada também no ATPDraw e comparada com resultados obtidos em regime permanente no *software* OpenDSS. Desta forma, conclui-se a possibilidade de utilizar um *software* que além de ser utilizado para regime permanente é usado para regime transitório.

Dentre os limitadores supercondutores, foi utilizada a tecnologia baseada nas fitas 2G, pelo fato destes limitadores serem comerciais e terem diversas vantagens como: simplicidade topológica, pequeno volume e peso, rápido tempo de atuação e falha-segura.

Como cada rede de distribuição tem as suas características, concluiu-se que o R-SFCL deve ser dimensionado de forma específica para cada sistema que este for aplicado.

Como principal contribuição do trabalho, foi realizada a integração da analogia eletrotérmica do R-SFCL em um modelo detalhado de uma rede de distribuição real, considerando toda a complexidade de um caso real em operação. Essa abordagem permitiu a análise de diferentes localizações de faltas, divididas em 4 cenários.

Nos cenários 1 e 2, que são próximos do local da geração de energia, observou-se que o limitador atua de forma mais eficiente, limitando mais efetivamente a corrente durante o curto. Já os cenários 3 e 4, onde o limitador como está distante da geração, o mesmo atua limitando em proporções bem menores, devido a distância da falta com relação ao secundário do transformador. Outro fato interessante concluído foi que para os cenários 1 e 2 o R-SFCL manteve os níveis de corrente de faltas do sistema de distribuição pré-existentes controlados, dentro dos limites de falta do disjuntor que protege a rede de distribuição de Búzios na Barra 1.

Portanto, conclui-se que não há a necessidade da substituição dos equipamentos por razões de capacidade de curto-circuito, uma vez que os cenários apresentaram níveis de curto-circuitos que permitiram a atuação do disjuntor da forma adequada.

Como conclusão final, a utilização do R-SFCL é recomendada, pois como comprovado neste trabalho reduz as correntes de curto-circuito, podendo evitar trocas de equipamentos, além de contribuir para o sistema possuir melhor qualidade de energia, como mitigações no afundamento de tensões devido aos curto-circuito. Deve-se considerar também como uma vantagem a oportunidade de manter os equipamentos de proteção existentes, no caso de ocorrer a expansão da rede, sendo interessante a inserção do limitador como elemento de garantia de operação da proteção.

Este trabalho resultou na contribuição dos seguintes artigos:

- QUEIROZ, A. T.; LESSA, T. S.; SOTELO, G. G.; FORTES, M. Z.; POLASEK, A.; Simulação de Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor do Tipo Resistivo em ATPDraw [25].
- LESSA, T. S.; QUEIROZ, A. T.; SOTELO, G. G.; FORTES, M. Z.; SILVA, R. M. JUNIOR, S. G.; Simulação de Rede de Distribuição Real com Softwares Livres para Regime Permanente e Transitórios [30].

5.2. TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho e a partir das conclusões obtidas, foram identificados alguns pontos que podem ser estudados em trabalhos futuros:

- Avaliar as características internas do limitador, no sistema em que o mesmo for aplicado, como a temperatura de cada camada da fita, resistência e temperatura do *shunt*, no momento que o limitador estiver em transição para o estado normal. Além disso, avaliar também no momento da recuperação do sistema, isto é, depois da falta.

- Aplicar o R-SFCL dimensionado no capítulo 3 no ATPDraw, em outras topologias reais de redes de distribuição, com motores e gerações distribuídas para visualizar o comportamento do mesmo nestas condições. Além disso, ainda no capítulo 3 foi visto que para cada rede de distribuição o R-SFCL deve ser dimensionado. Então, seria outro ponto para avaliar, estes novos dimensionamentos do limitador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Moura, Fabrício Augusto Matheus, “Geração Distribuída – Impactos e Contribuições para a Qualidade da Energia Elétrica e Dinâmica dos Sistemas Elétricos – Uma Análise Através do ATP-EMTP”, Tese de Doutorado, Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia 26 de junho de 2011.
- [2] Frederico A. S. Marques, Jesus A. Moran, Lísias Abreu, Luiz C. P. da Silva, Walmir Freitas, “Impactos da Expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica”, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- [3] Mafra, Gabriel Ricardo Ferreira Queiroga, “Aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores em sistemas elétricos de distribuição e plataformas de produção de petróleo e gás natural”, Dissertação de Mestrado em Montagem Industrial, Universidade Federal Fluminense, Niterói 25 de Fevereiro de 2016.
- [4] M. STEMMLE, F. MERSCHEL, M. NOE, A. HOBL, “AmpaCity – Advanced Superconducting Medium Voltage System for Urban Area Power Supply”, IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp.1-5, 2014.
- [5] B. LIN, C. LI, F. GUO, Y. XIN, “Overcurrent Protection Coordination in a Power Distribution Network With the Active Superconductive Fault Current Limiter”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v.24, n.5, pp.1-4, Outubro, 2014.
- [6] X. YUAN, K. TEKLETSADIK, L. KOVALSKY, “Proof-of-concept prototype test results of a superconducting fault current limiter for transmission-level applications”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v.15, n.2, pp.1982-1985, Junho, 2005.
- [7] SOUSA, Wescley Tiago Batista de. Simulações e ensaios com limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores do tipo resistivo. Rio de Janeiro, 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

- [8] SOUSA, Wescley Tiago Batista de. “Transient Simulations of Superconducting Fault Current Limiters”. Rio de Janeiro, 2015. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [9] DE SOUSA, W., POLASEK, A., DIAS, R., et al. “Thermal–electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters”, *Cryogenics*, v. 62, pp. 97–109, 2014.
- [10] ELSCHNER, S. et al. ENSYSTROB: design, manufacturing and test of a 3-phase resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application. *Physica C: Superconductivity*. Philadelphia: Elsevier, v. 482, p. 98-104, nov. 2012.
- [11] MACHADO, Ivan de Souza. Análise Técnico-Econômica do Impacto da Penetração da Geração Distribuída em Redes de Distribuição. Rio de Janeiro, 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) – UFF, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2016.
- [12] ONNES, H. K. “Further experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical, Resistance of Pure Metals, etc. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears”, *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences*, v. 14, pp. 818–821, 1911.
- [13] Schettino, Henrique Junqueira. “Análise de Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo para Inserção de Geradores ao Sistema de Transmissão”. Rio de Janeiro, 2016. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [14] ROSE-INNES, A., RHODERICK, E. *Introduction to superconductivity*. 1 ed. New York, Pergamon Publishing Company, 1969.
- [15] MEISSNER, W., OCHSENFELD, R. “Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit”, *Naturwissenschaften*, v. 21, n. 44, pp. 787–788, 1933.
- [16] DOS SANTOS, Carlos Alberto, Artigo “A centenária e misteriosa supercondutividade.” Disponível em:
<<http://www.portalmedquimica.com.br/dicas.php?id=194>> Acesso em: 30/01/18.

- [17] TINKHAM, MICHAEL, Introduction to Superconductivity, 2° ed. New York, McGraw-Hill, 1996.
- [18] ABRIKOSOV, A. “The magnetic properties of superconducting alloys”, Journal of Physics and Chemistry of Solids, v. 2, n. 3, pp. 199–208, 1957.
- [19] RJABININ, J., SHUBNIKOW, L. “Magnetic properties and critical currents of superconducting alloys”, Nature, v. 135, n. 3415, pp. 581–582, 1935.
- [20] SASS, Felipe. “Manuais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração”. Rio de Janeiro, 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [21] BEDNORZ, J. “Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System”, Zeitschrift für Physik, v. 64, pp. 189–193, 1986.
- [22] REY, C. Superconductors in the power grid: Materials and applications. London, Elsevier, 2015.
- [23] WANG, Y. Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering. North China Electric Power University. 1st ed. New Delhi, John Wiley & Sons, 2013.
- [24] SHI, D. High-temperature superconducting materials science and engineering: new concepts and technology. a, Elsevier, 1995.
- [25] QUEIROZ, A. T.; LESSA, T. S.; SOTELO, G. G.; FORTES, M. Z.; POLASEK, A.; Simulação de Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor do Tipo Resistivo em ATPDraw. Artigo, VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Maio de 2018.
- [26] Natalia M.C.A.A. Vilaca, Vinicius N. Figueiredo, Lorena Baptista de Oliveira, Vitor H. Ferreira, Marcio Z. Fortes¹, Weules F. Correia, Orestes L.C. Pacheco, "Smart City – Caso da Implantação em Buzios – RJ”, Revista SODEBRAS – Vo. 9 – Nº 98, Fevereiro, 2014.

- [27] Z. F. Márcio, Vitor H. Ferreira, Weules F. Correia, A. B. Leonardo, " Smart City Búzios – Experiência para à Expansão de Sistemas de Geração com Fontes Alternativas”: Políticas Energéticas para a Sustentabilidade, Agosto, 2014.
- [28] C.D. Roger, “Reference guide – The open distribution system simulator (OpenDSS)”, Electric Power Research Institute, Inc., November, 2012.
- [29] A. F. João, “Cidade inteligente Búzios: Entre paradigmas e percepções”, dissertação de mestrado, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, Fevereiro, 2016.
- [30] LESSA, T. S.; QUEIROZ, A. T.; SOTELO, G. G.; FORTES, M. Z.; SILVA, R. M. JUNIOR, S. G.; Simulação de Rede de Distribuição Real com Softwares Livres para Regime Permanente e Transitórios. Artigo, VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Maio de 2018.
- [31] A. F. P. Rodrigo, “Localização de faltas fase-terra em circuitos radiais de distribuição através de algoritmos de busca inteligente”, dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Ilha do Solteira - UNESP, São Paulo, 2003.
- [32] S. S. B. Lorrane, “Avaliação da presença de curtos-circuitos na rede elétrica usando o software OpenDSS”, monografia de graduação em Engenharia de Energia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- [33] A. POLASEK, R. DIAS, F.A. SILVA, F. C. LOPES, E.T. SERRA, O. ORSINO FILHO, “ENSAIOS COM MÓDULOS SUPERCONDUTORES PARA LIMITAÇÃO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO”, artigo publicado no ERIAC XIV - UNESP, Paraguai, 2011.
- [34] KHAN, S. Industrial Power Systems. Florida: CRC Press, 2007. 455 p.

APÊNDICE

No apêndice, serão apresentados os códigos utilizados e a rede de Búzios modelada no ATPdraw.

O código de implementação do modelo do R-SFCL, baseado em fitas 2G - YBCO, validado com [8], utilizado neste trabalho, é apresentado a seguir, no Quadro A1:

MODEL 2G – YBCO VALIDADO COM SOUSA [8].

```

-- st (silver top)
-- y (superconductor)
-- h (hastelloy)
-- sb (silver bottom)
-- ss (stainless steel) "shunt"
-- It (corrente[A])
-- Rl (resistência do limitador[ohm])
-- Te (temperatura de cada layer[K])
-- py (resistividade elétrica do supercondutor[ohm*cm])
-- Va (variáveis do código)
-- Ct (constantes do código)
-- X (contator)
-- h (passo utilizado para a integração, através do Método de Euler)

INPUT It[1..3]

OUTPUT Rl[1..3]

VAR Rl[1..3],Te[1..15],py[1..3],Va[1..44],Ct[1..7],X[1..5],h

HISTORY Te[1..15]{DFLT:77},py[1..3]{DFLT:0}

INIT

h:=timestep

ENDINIT

EXEC

Ct[1]:=430 -- C (comprimento dos layers[cm])
Ct[2]:=600 -- Css (comprimento do shunt[cm])
-- L:=1.2 (largura dos layers[cm])
-- Lss:=1.2 (largura do shunt[cm])
-- hc:=0.2 (coeficiente de transferência de calor por convecção[W/(K.cm²)])
-- A:=C*L (área de transferência de calor entre os layers e meio[cm²])
-- Ass:=Css*Lss (área de transferência de calor do shunt com o meio[cm²])
-- Ec1:=0.000001 (campo elétrico crítico, para "flux creep"[V/cm])
-- Ec2:=0.015 (campo elétrico crítico, para "flux flow"[V/cm])
-- Ic:=299.375 (corrente crítica do supercondutor[A])
-- Tc:=92 (temperatura crítica do supercondutor[K])
-- n1:=30 (índice de transição, para "flux-creep")
-- n2:=5 (índice de transição, para "flux-flow")
-- n°:=1 (número de limitadores em série)

-- e (espessura[cm])

```

```

-- est:=0.0004
-- ey:=0.0001
-- eh:=0.01
-- esb:=0.0001
-- ess:=0.24

Va[1]:=abs(It[1]) -- módulo da corrente da fase A
Va[2]:=abs(It[2]) -- módulo da corrente da fase B
Va[3]:=abs(It[3]) -- módulo da corrente da fase C

X[1]:=1 -- contador "a"
X[2]:=1 -- contador "b"

WHILE X[1]<=3 DO -- executa o código três vezes (um para cada fase)

-- p (resistividade elétrica[ohm*cm])
Va[4]:=(-0.0000002)+(0.000000007*Te[X[2]]) -- pst
Va[6]:=(0.0001202)+(0.000000008957*Te[X[2]+2]) -- ph
Va[7]:=(-0.0000002)+(0.000000007*Te[X[2]+3]) -- psb
Va[8]:=(0.00012)-(0.0000753*exp(-Te[X[2]+4]/647.113)) -- pss

-- R (resistência elétrica[ohm])
Va[4]:=Va[4]*(Ct[1]/0.00048) -- Rst
Va[5]:=(py[X[1]]*(Ct[1]/0.00012))+0.0000000000000001 -- Ry
Va[6]:=Va[6]*(Ct[1]/0.012) -- Rh
Va[7]:=Va[7]*(Ct[1]/0.00012) -- Rsb
Va[8]:=Va[8]*(Ct[2]/0.288) -- Rss

Va[9]:=1/((1/Va[4])+(1/Va[5])+(1/Va[6])+(1/Va[7])) -- Re (resistência equivalente dos layers[ohm])

Rl[X[1]]:=1/((1/(Va[9]/2))+(1/Va[8]))

Va[10]:=(Rl[X[1]]/Va[5])*Va[X[1]] -- Iy (corrente do supercondutor[A])

Va[11]:=1 -- Er (erro antigo)

WHILE abs(Va[11])>0.01 DO --Er

IF Te[X[2]+1]<92 THEN
  Va[12]:=0.000001*((Va[10]*15)/(299.375*(92-Te[X[2]+1]))**30)
  Va[12]:=Va[12]/(Va[10]/0.00012) -- py1 (flux-creep)

  Va[13]:=0.015*((Va[10]*15)/(299.375*(92-Te[X[2]+1]))**5)
  Va[13]:=Va[13]/(Va[10]/0.00012) -- py2 (flux-flow)

  Va[14]:=(0.01*Te[X[2]+1])-0.1 -- py3 (normal state)

  py[X[1]]:=min(Va[12],Va[13],Va[14]) -- py
ELSE
  py[X[1]]:=(0.01*Te[X[2]+1])-0.1 -- py (normal state)
ENDIF

Va[5]:=(py[X[1]]*(Ct[1]/0.00012))+0.0000000000000001 -- Ry
Va[9]:=1/((1/Va[4])+(1/Va[5])+(1/Va[6])+(1/Va[7])) -- Re
Rl[X[1]]:=1/((1/(Va[9]/2))+(1/Va[8]))
Va[15]:=(Rl[X[1]]/Va[5])*Va[X[1]] -- Iyn (nova corrente no supercondutor)
Va[6]:=100*((Va[15]-Va[10])/Va[15]) -- Ern (erro novo) = 100*((Iyn-Iy)/Iyn)

IF (Va[15]>0 AND Va[11]>0) OR (Va[15]<0 AND Va[11]<0) THEN -- Ern(Va[15]) AND Er(Va[11])
  Ct[3]:=0.1 -- B (fator de correção)
ELSE

```

```

Ct[3]:=0.02 -- B (fator de correção)
ENDIF

Va[10]:=Va[10]+(Ct[3]*(Va[15]-Va[10])) -- Iy:=Iy+(B*(Iyn-Iy))
Va[11]:=Va[6] -- Er:=Ern

ENDWHILE

Va[10]:=Va[15]

-- ce (calor específico[J/(g.K)])
Va[17]:=(220.56+(0.0460488*Te[X[2]]))*0.001 -- cest
Va[18]:=(0.39*((250/Te[X[2]+1])**2))*((exp(250/Te[X[2]+1]))/(((exp(250/Te[X[2]+1]))-1)**2)) -- cey
Va[19]:=0.18995+(0.38278*(1-(exp(-Te[X[2]+2]/309.98354)))) -- ceh
Va[20]:=(220.56+(0.0460488*Te[X[2]+3]))*0.001 -- cesb
--Ct[20]:=0.2 -- cess

-- m (massa específica[g/cm³])
-- mst:=10.47
-- my:=6.3
-- mh:=8.9
-- msb:=10.47
-- mss:=7.9

-- Ca (Capacitância[F])
Va[21]:=0.0050256*Va[17]*Ct[1] --Cast
Va[22]:=0.000756*Va[18]*Ct[1] --Cay
Va[23]:=0.1068*Va[19]*Ct[1] --Cah
Va[24]:=0.0012564*Va[20]*Ct[1] --Casb
Ct[4]:=0.45504*Ct[2] --Cass

-- k (condutividade térmica[W/(cm.K)])
Va[25]:=4.20864+(5.01782*(0.956**Te[X[2]])) -- kst
-- ky:=0.05
Va[26]:=0.03873+(0.00017*Te[X[2]+2]) -- kh
Va[27]:=4.20864+(5.01782*(0.956**Te[X[2]+3])) -- ksb
-- kss:=0.15

-- Rco:=4.167/C (resistência por convecção dos layers[ohm])
-- Rcos:=4.167/Css (resistência por convecção do shunt[ohm])

-- Rc (resistência por condução[ohm])
Va[28]:=0.0004/(Va[25]*(Ct[1]*1.2)) -- Rcst
Ct[5]:=0.0001/(0.05*(Ct[1]*1.2)) -- Rcy
Va[29]:=0.01/(Va[26]*(Ct[1]*1.2)) -- Rch
Va[30]:=0.0001/(Va[27]*(Ct[1]*1.2)) -- Rcsb
Ct[6]:=0.24/(0.15*(Ct[2]*1.2)) -- Rcsc

-- G (condutâncias[S])
Va[31]:=1/((Va[28]/2)+(4.167/Ct[1])) -- G1
Va[32]:=1/((Va[28]+Ct[5])/2) -- G2
Va[33]:=1/((Ct[5]+Va[29])/2) -- G3
Va[34]:=1/((Va[29]+Va[5])/2) -- G4
Va[35]:=1/((Va[30]/2)+(4.167/Ct[1])) -- G5
Ct[7]:=1/(Ct[6]+(4.167/Ct[2])) -- G6

-- I (correntes nos layers[a])
Va[36]:=(Rl[X[1]]/Va[4])*Va[X[1]] -- Ist
Va[37]:=(Rl[X[1]]/Va[6])*Va[X[1]] -- Ih
Va[38]:=(Rl[X[1]]/Va[7])*Va[X[1]] -- Isb
Va[39]:=(Rl[X[1]]/Va[8])*Va[X[1]] -- Iss

```

```

Va[40]:=h*((Va[4]*(Va[36]**2))+(77*Va[31])+(Va[32]*Te[X[2]+1]))
Va[41]:=h*((Va[5]*(Va[10]**2))+(Va[33]*Te[X[2]+2])+(Va[32]*Te[X[2]]))
Va[42]:=h*((Va[6]*(Va[37]**2))+(Va[34]*Te[X[2]+3])+(Va[33]*Te[X[2]+1]))
Va[43]:=h*((Va[7]*(Va[38]**2))+(77*Va[35])+(Va[34]*Te[X[2]+2]))
Va[44]:=h*((Va[8]*(Va[39]**2))+(77*Ct[7]))

Te[X[2]]:=(Va[21]*Te[X[2]])+Va[40]/(Va[21]+(h*(Va[31]+Va[32]))) -- Test
Te[X[2]+1]:=(Va[22]*Te[X[2]+1])+Va[41]/(Va[22]+(h*(Va[32]+Va[33]))) -- Tey
Te[X[2]+2]:=(Va[23]*Te[X[2]+2])+Va[42]/(Va[23]+(h*(Va[33]+Va[34]))) -- Teh
Te[X[2]+3]:=(Va[24]*Te[X[2]+3])+Va[43]/(Va[24]+(h*(Va[34]+Va[35]))) -- Tesb
Te[X[2]+4]:=(Ct[4]*Te[X[2]+4])+Va[44]/(Ct[4]+(h*Ct[7])) -- Tss

Rl[X[1]]:=26*Rl[X[1]] -- Resistência total do limitador[ohm]

X[1]:=X[1]+1 -- incrementa +1 ao contador "a"
X[2]:=X[2]+5 -- incrementa +5 ao contador "b"

ENDWHILE

ENDEXEC

ENDMODEL

```

Quadro A1

O código de implementação do modelo do R-SFCL, dimensionado para rede de Búzios, utilizado neste trabalho, é apresentado a seguir, no Quadro A2:

```

MODEL 2G - YBCO DIMENSIONADO PARA REDE DE BÚZIOS

-- st (silver top)
-- y (superconductor)
-- h (hastelloy)
-- sb (silver bottom)
-- ss (stainless steel) "shunt"
-- It (corrente[A])
-- Rl (resistência do limitador[ohm])
-- Te (temperatura de cada layer[K])
-- py (resistividade elétrica do supercondutor[ohm*cm])
-- Va (variáveis do código)
-- Ct (constantes do código)
-- X (contator)
-- h (passo utilizado para a integração, através do Método de Euler)

INPUT It[1..3]

OUTPUT Rl[1..3]

VAR Rl[1..3],Te[1..15],py[1..3],Va[1..44],Ct[1..7],X[1..5],h

HISTORY Te[1..15]{DFLT:77},py[1..3]{DFLT:0}

INIT

h:=timestep

ENDINIT

```

EXEC

```

Ct[1]:=430 -- C (comprimento dos layers[cm])
Ct[2]:=510 -- Css (comprimento do shunt[cm])
-- L:=1.2 (largura dos layers[cm])
-- Lss:=1.2 (largura do shunt[cm])
-- hc:=0.2 (coeficiente de transferência de calor por convecção[W/(K.cm²)])
-- A:=C*L (área de transferência de calor entre os layers e meio[cm²])
-- Ass:=Css*Lss (área de transferência de calor do shunt com o meio[cm²])
-- Ec1:=0.000001 (campo elétrico crítico, para "flux creep"[V/cm])
-- Ec2:=0.015 (campo elétrico crítico, para "flux flow"[V/cm])
-- Ic:=275 (corrente crítica do supercondutor[A])
-- Tc:=92 (temperatura crítica do supercondutor[K])
-- n1:=30 (índice de transição, para "flux-creep")
-- n2:=5 (índice de transição, para "flux-flow")
-- n°:=1 (número de limitadores em série)

-- e (espessura[cm])
-- est:=0.0004
-- ey:=0.0001
-- eh:=0.01
-- esb:=0.0001
-- ess:=0.24

Va[1]:=abs(It[1]) -- módulo da corrente da fase A
Va[2]:=abs(It[2]) -- módulo da corrente da fase B
Va[3]:=abs(It[3]) -- módulo da corrente da fase C

X[1]:=1 -- contador "a"
X[2]:=1 -- contador "b"

WHILE X[1]<=3 DO -- executa o código três vezes (um para cada fase)

  -- p (resistividade elétrica[ohm*cm])
  Va[4]:=(-0.0000002)+(0.000000007*Te[X[2]]) -- pst
  Va[6]:= (0.0001202)+(0.000000008957*Te[X[2]+2]) -- ph
  Va[7]:=(-0.0000002)+(0.000000007*Te[X[2]+3]) -- psb
  Va[8]:= (0.00012)-(0.0000753*exp(-Te[X[2]+4]/647.113)) -- pss

  -- R (resistência elétrica[ohm])
  Va[4]:=Va[4]*(Ct[1]/0.00048) -- Rst
  Va[5]:= (py[X[1]]*(Ct[1]/0.00012))+0.0000000000000001 -- Ry
  Va[6]:=Va[6]*(Ct[1]/0.012) -- Rh
  Va[7]:=Va[7]*(Ct[1]/0.00012) -- Rsb
  Va[8]:=Va[8]*(Ct[2]/0.288) -- Rss

  Va[9]:=1/((1/Va[4])+(1/Va[5])+(1/Va[6])+(1/Va[7])) -- Re (resistência
  equivalente dos layers[ohm])

  Rl[X[1]]:=1/((1/(Va[9]/2))+1/Va[8]) -- (4 fitas em paralelo e em série
  com mais 4 em paralelo)

  Va[10]:= (Rl[X[1]]/Va[5])*Va[X[1]] -- Iy (corrente do supercondutor[A])

  Va[11]:=1 -- Er (erro antigo)

  WHILE abs(Va[11])>0.01 DO --Er

    IF Te[X[2]+1]<92 THEN
      Va[12]:=0.000001*(((Va[10]*15)/(275*(92-Te[X[2]+1))))**30)
      Va[12]:=Va[12]/(Va[10]/0.00012) -- py1 (flux-creep)

```

```

Va[13]:=0.015*(((Va[10]*15)/(275*(92-Te[X[2]+1])))**5)
Va[13]:=Va[13]/(Va[10]/0.00012) -- py2 (flux-flow)

Va[14]:=(0.01*Te[X[2]+1])-0.1 -- py3 (normal state)

py[X[1]]:=min(Va[12],Va[13],Va[14]) -- py
ELSE
py[X[1]]:=(0.01*Te[X[2]+1])-0.1 -- py (normal state)
ENDIF

Va[5]:=(py[X[1]]*(Ct[1]/0.00012))+0.0000000000000001 -- Ry
Va[9]:=1/((1/Va[4])+(1/Va[5])+(1/Va[6])+(1/Va[7])) -- Re
Rl[X[1]]:=1/((1/(Va[9]/2))+(1/Va[8]))
Va[15]:=(Rl[X[1]]/Va[5])*Va[X[1]] -- Iyn (nova corrente no supercondutor)
Va[6]:=100*((Va[15]-Va[10])/Va[15]) -- Ern (erro novo) = 100*((Iyn-
Iy)/Iyn)

IF (Va[15]>0 AND Va[11]>0) OR (Va[15]<0 AND Va[11]<0) THEN -- Ern(Va[15])
AND Er(Va[11])
Ct[3]:=0.1 -- B (fator de correção)
ELSE
Ct[3]:=0.02 -- B (fator de correção)
ENDIF

Va[10]:=Va[10]+(Ct[3]*(Va[15]-Va[10])) -- Iy:=Iy+(B*(Iyn-Iy))
Va[11]:=Va[6] -- Er:=Ern

ENDWHILE

Va[10]:=Va[15]

-- ce (calor específico[J/(g.K)])
Va[17]:=(220.56+(0.0460488*Te[X[2]]))*0.001 -- cest

Va[18]:=(0.39*((250/Te[X[2]+1])**2))*((exp(250/Te[X[2]+1]))/(((exp(250/Te[X
[2]+1]))-1)**2)) -- cey
Va[19]:=0.18995+(0.38278*(1-(exp(-Te[X[2]+2]/309.98354)))) -- ceh
Va[20]:=(220.56+(0.0460488*Te[X[2]+3]))*0.001 -- cesb
--Ct[20]:=0.2 -- cess

-- m (massa específica[g/cm³])
-- mst:=10.47
-- my:=6.3
-- mh:=8.9
-- msb:=10.47
-- mss:=7.9

-- Ca (Capacitância[F])
Va[21]:=0.0050256*Va[17]*Ct[1] --Cast
Va[22]:=0.000756*Va[18]*Ct[1] --Cay
Va[23]:=0.1068*Va[19]*Ct[1] --Cah
Va[24]:=0.0012564*Va[20]*Ct[1] --Casb
Ct[4]:=0.45504*Ct[2] --Cass

-- k (condutividade térmica[W/(cm.K)])
Va[25]:=4.20864+(5.01782*(0.956**Te[X[2]])) -- kst
-- ky:=0.05
Va[26]:=0.03873+(0.00017*Te[X[2]+2]) -- kh
Va[27]:=4.20864+(5.01782*(0.956**Te[X[2]+3])) -- ksb
-- kss:=0.15

-- Rco:=4.167/C (resistência por convecção dos layers[ohm])

```

```

-- Rcos:=4.167/Css (resistência por convecção do shunt[ohm])

-- Rc (resistência por condução[ohm])
Va[28]:=0.0004/(Va[25]*(Ct[1]*1.2)) -- Rcst
Ct[5]:=0.0001/(0.05*(Ct[1]*1.2)) -- Rcy
Va[29]:=0.01/(Va[26]*(Ct[1]*1.2)) -- Rch
Va[30]:=0.0001/(Va[27]*(Ct[1]*1.2)) --Rcsb
Ct[6]:=0.24/(0.15*(Ct[2]*1.2)) -- Rcsc

-- G (condutâncias[S])
Va[31]:=1/((Va[28]/2)+(4.167/Ct[1])) -- G1
Va[32]:=1/((Va[28]+Ct[5])/2) -- G2
Va[33]:=1/((Ct[5]+Va[29])/2) -- G3
Va[34]:=1/((Va[29]+Va[5])/2) -- G4
Va[35]:=1/((Va[30]/2)+(4.167/Ct[1])) -- G5
Ct[7]:=1/(Ct[6]+(4.167/Ct[2])) -- G6

-- I (correntes nos layers[a])
Va[36]:= (Rl[X[1]]/Va[4])*Va[X[1]] -- Ist
Va[37]:= (Rl[X[1]]/Va[6])*Va[X[1]] -- Ih
Va[38]:= (Rl[X[1]]/Va[7])*Va[X[1]] -- Isb
Va[39]:= (Rl[X[1]]/Va[8])*Va[X[1]] -- Iss

Va[40]:=h*((Va[4]*(Va[36]**2))+(77*Va[31])+(Va[32]*Te[X[2]+1]))
Va[41]:=h*((Va[5]*(Va[10]**2))+(Va[33]*Te[X[2]+2])+(Va[32]*Te[X[2]]))
Va[42]:=h*((Va[6]*(Va[37]**2))+(Va[34]*Te[X[2]+3])+(Va[33]*Te[X[2]+1]))
Va[43]:=h*((Va[7]*(Va[38]**2))+(77*Va[35])+(Va[34]*Te[X[2]+2]))
Va[44]:=h*((Va[8]*(Va[39]**2))+(77*Ct[7]))

Te[X[2]]:=((Va[21]*Te[X[2]])+Va[40])/(Va[21]+(h*(Va[31]+Va[32]))) -- Test
Te[X[2]+1]:=((Va[22]*Te[X[2]+1])+Va[41])/(Va[22]+(h*(Va[32]+Va[33]))) --
Tey
Te[X[2]+2]:=((Va[23]*Te[X[2]+2])+Va[42])/(Va[23]+(h*(Va[33]+Va[34]))) --
Teh
Te[X[2]+3]:=((Va[24]*Te[X[2]+3])+Va[43])/(Va[24]+(h*(Va[34]+Va[35]))) --
Tesb
Te[X[2]+4]:=((Ct[4]*Te[X[2]+4])+Va[44])/(Ct[4]+(h*Ct[7])) -- Tss

Rl[X[1]]:=19*Rl[X[1]] -- Resistência total do limitador[ohm]

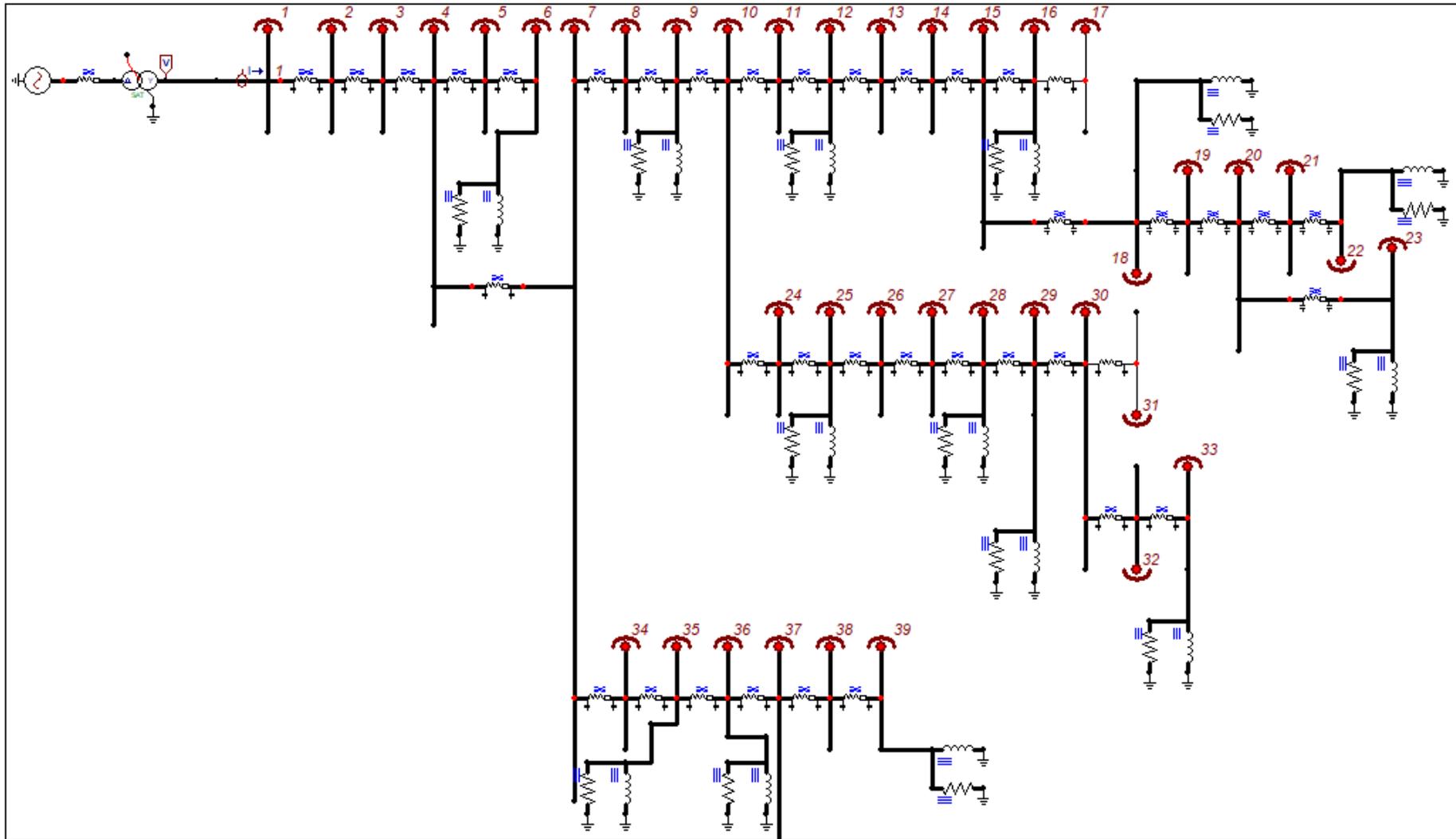
X[1]:=X[1]+1 -- incrementa +1 ao contador "a"
X[2]:=X[2]+5 -- incrementa +5 ao contador "b"

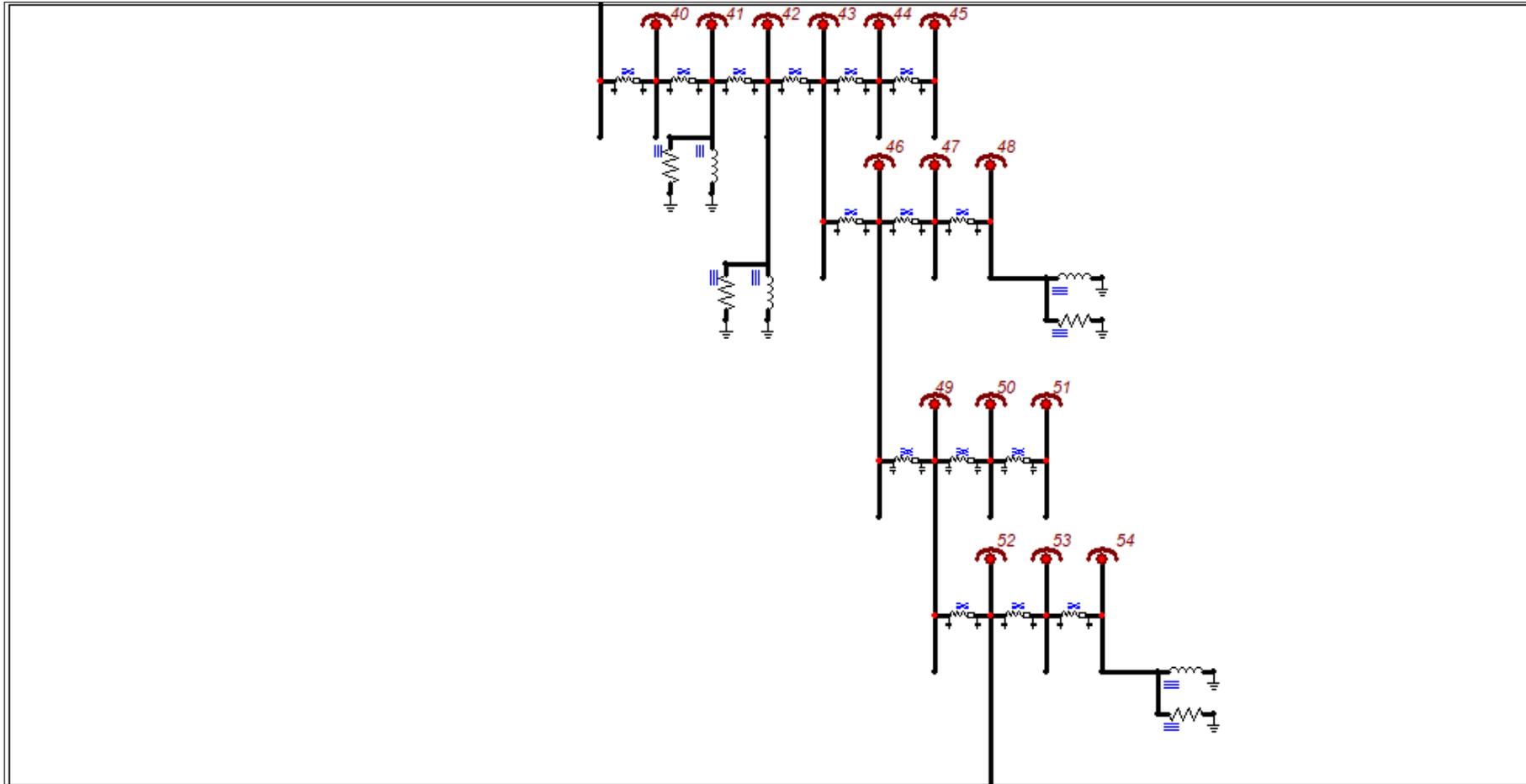
ENDWHILE
ENDEXEC
ENDMODEL

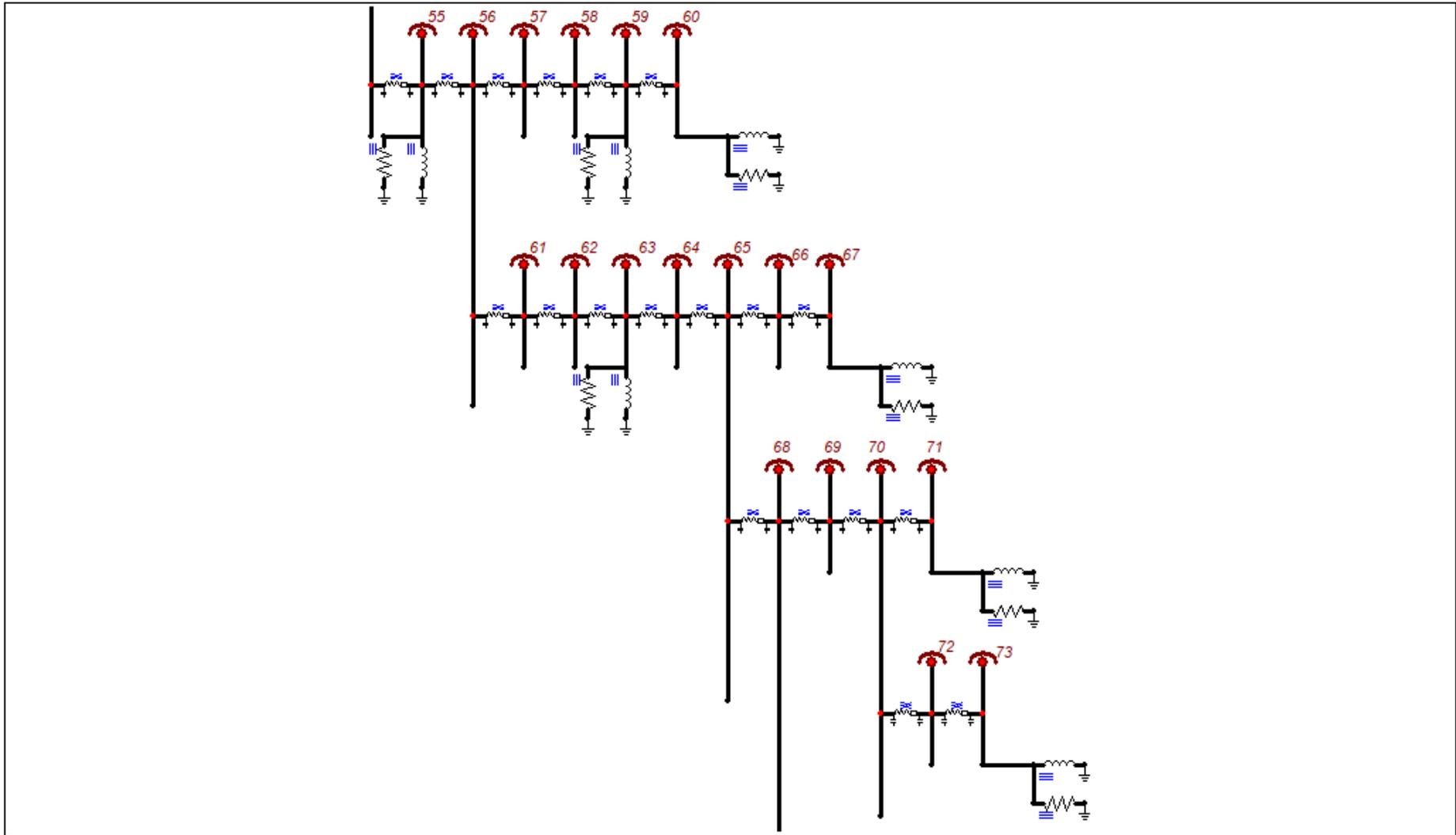
```

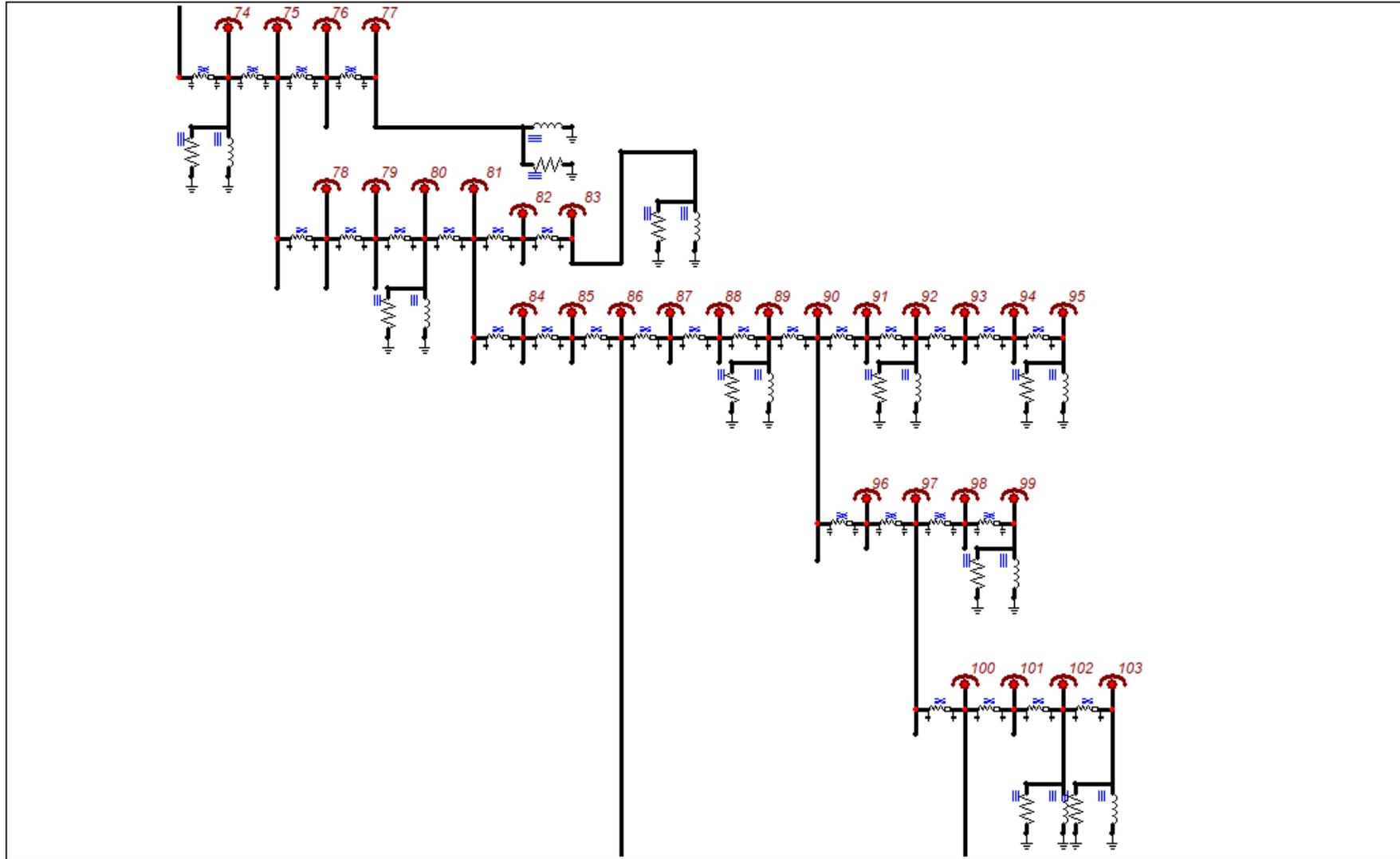
Quadro A2

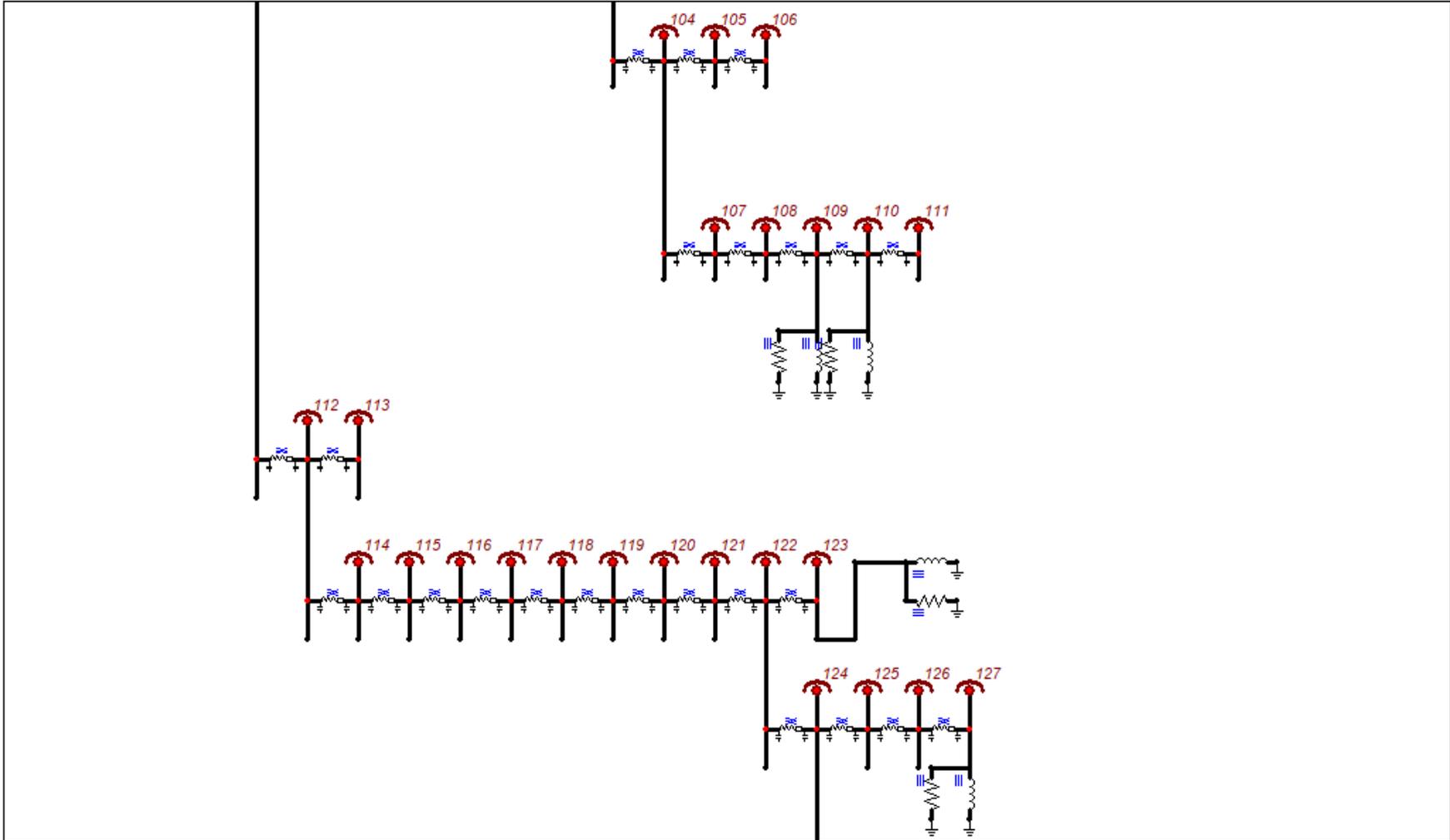
Por fim, apresentado a seguir no Quadro A3, a rede de Búzios modelada no ATPdraw

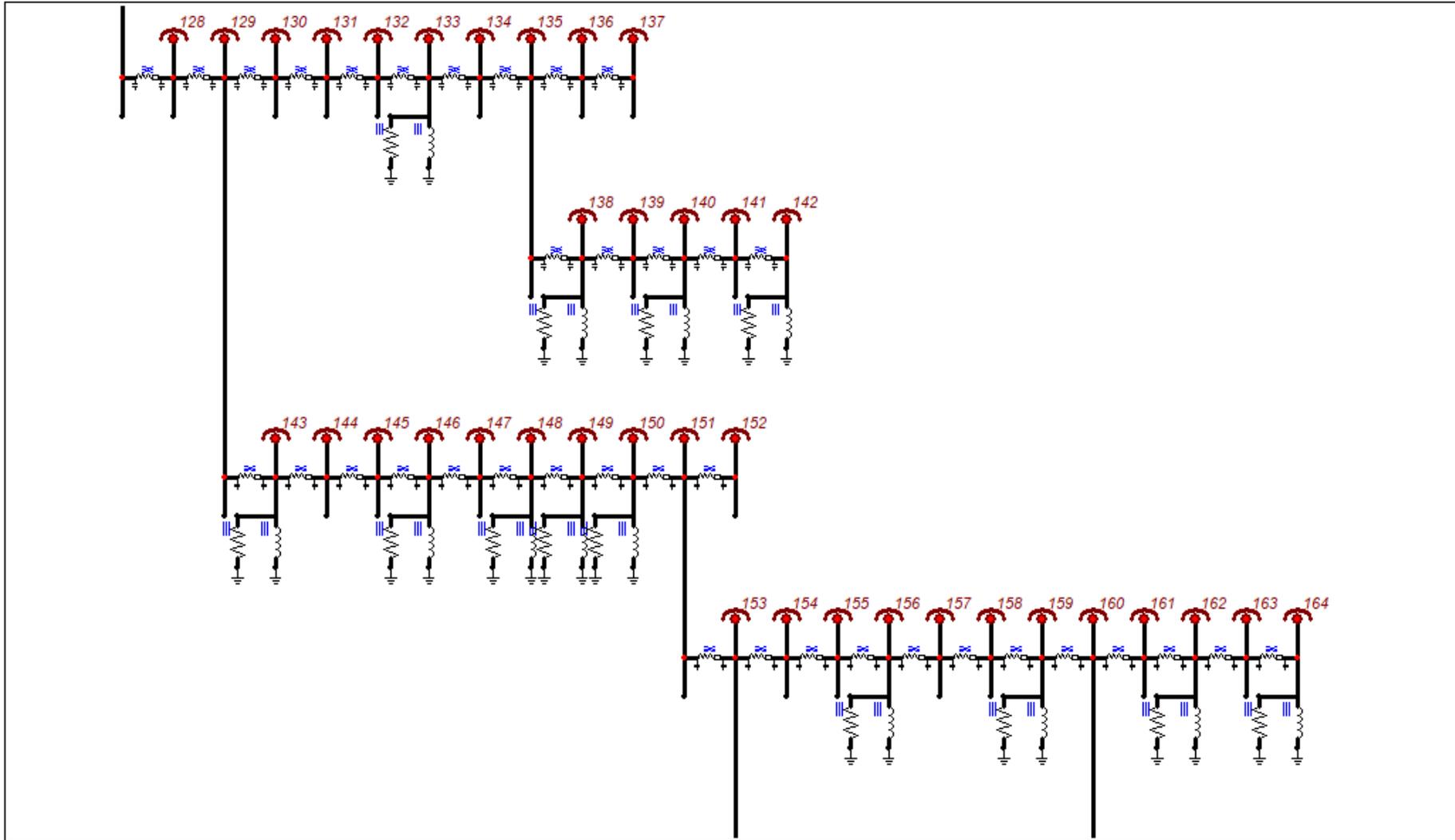


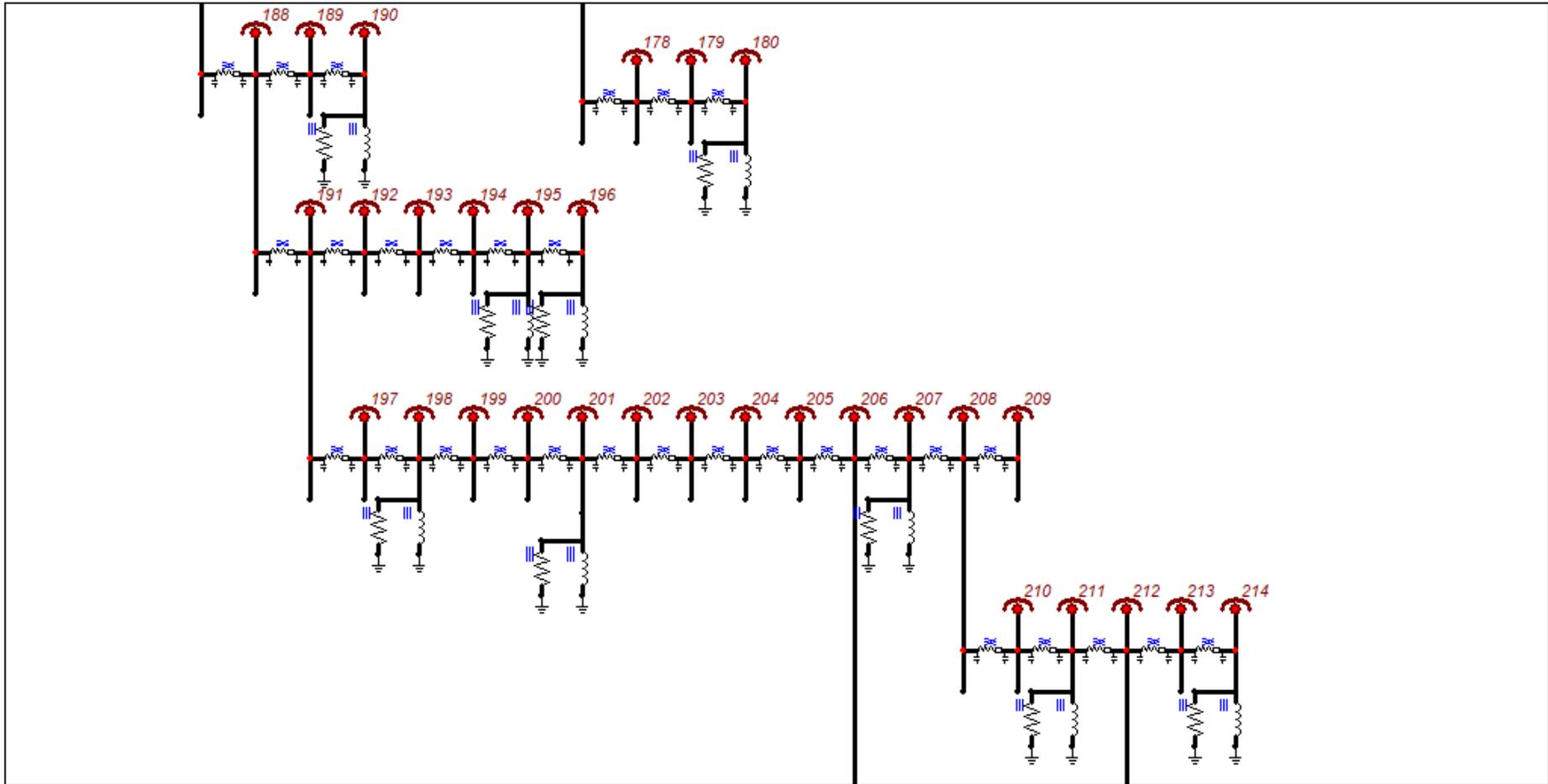


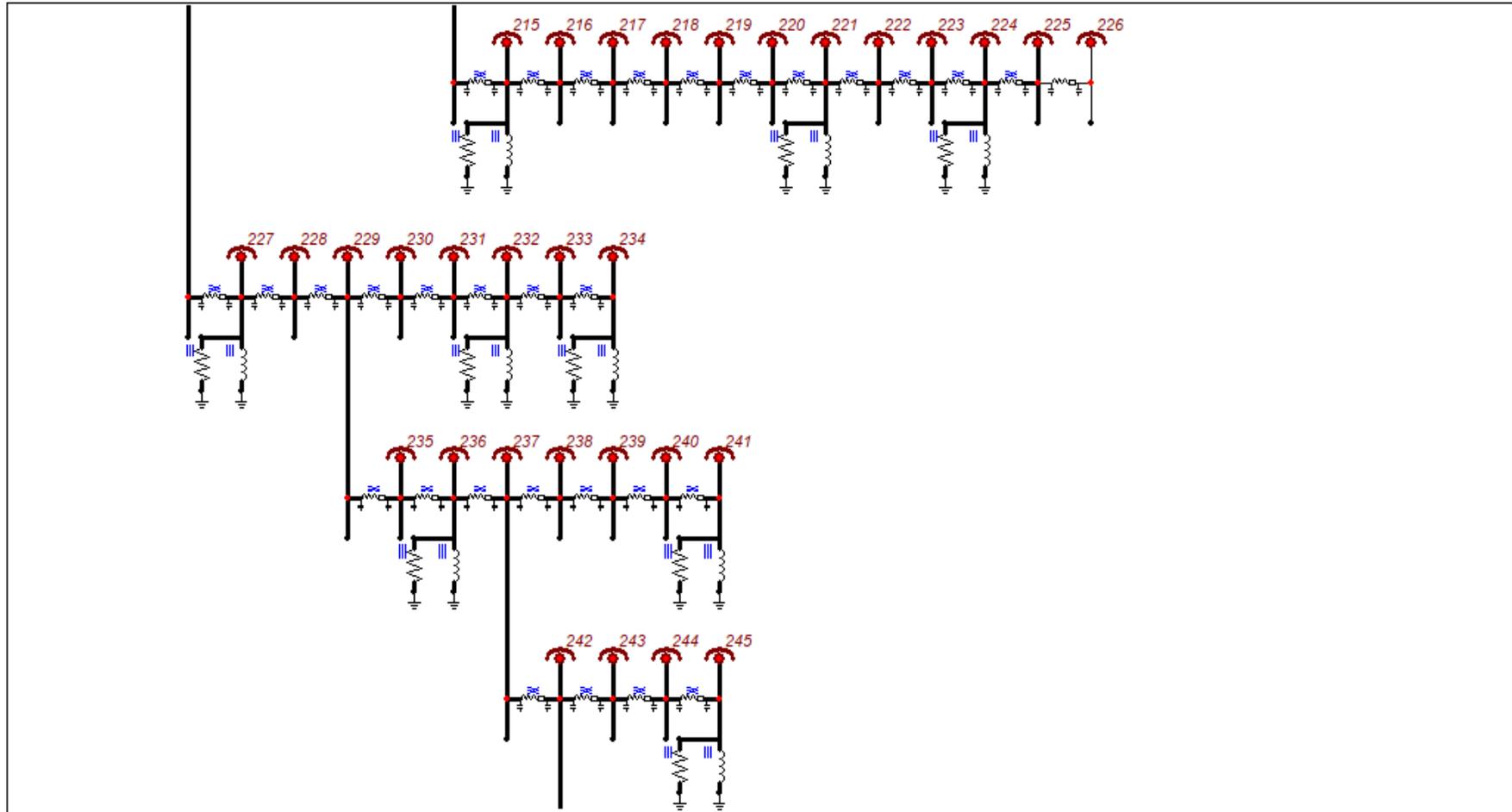


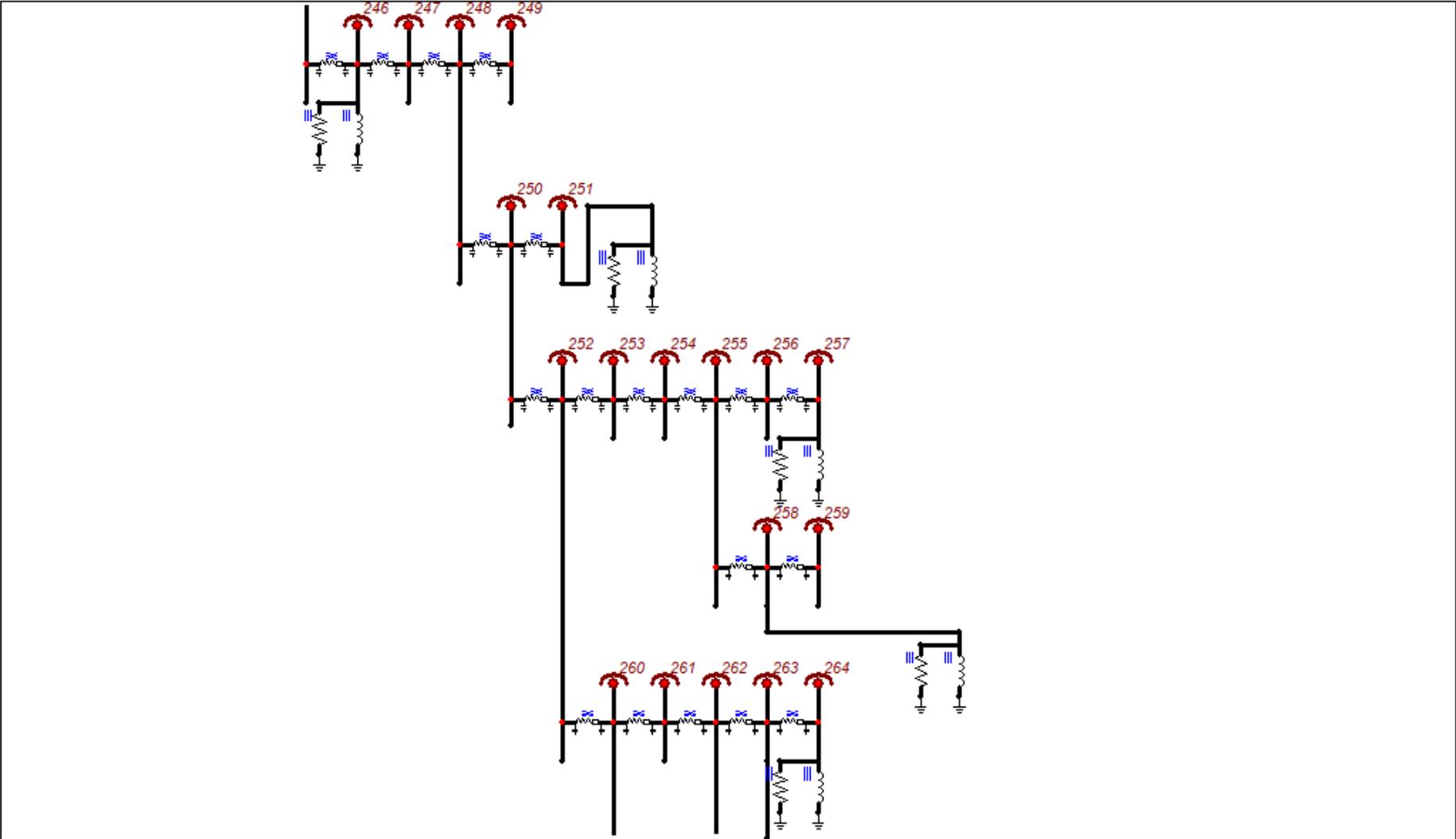


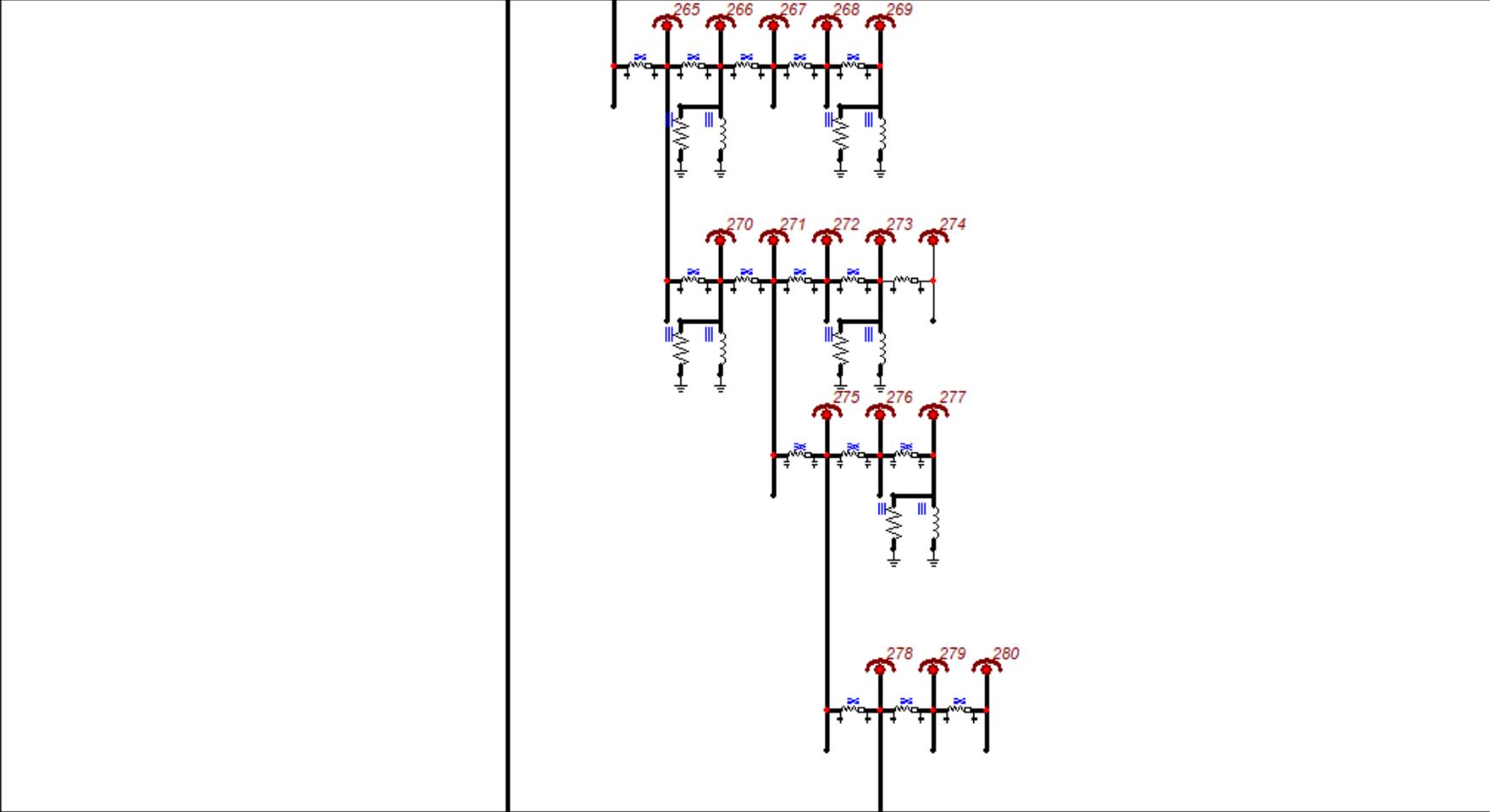


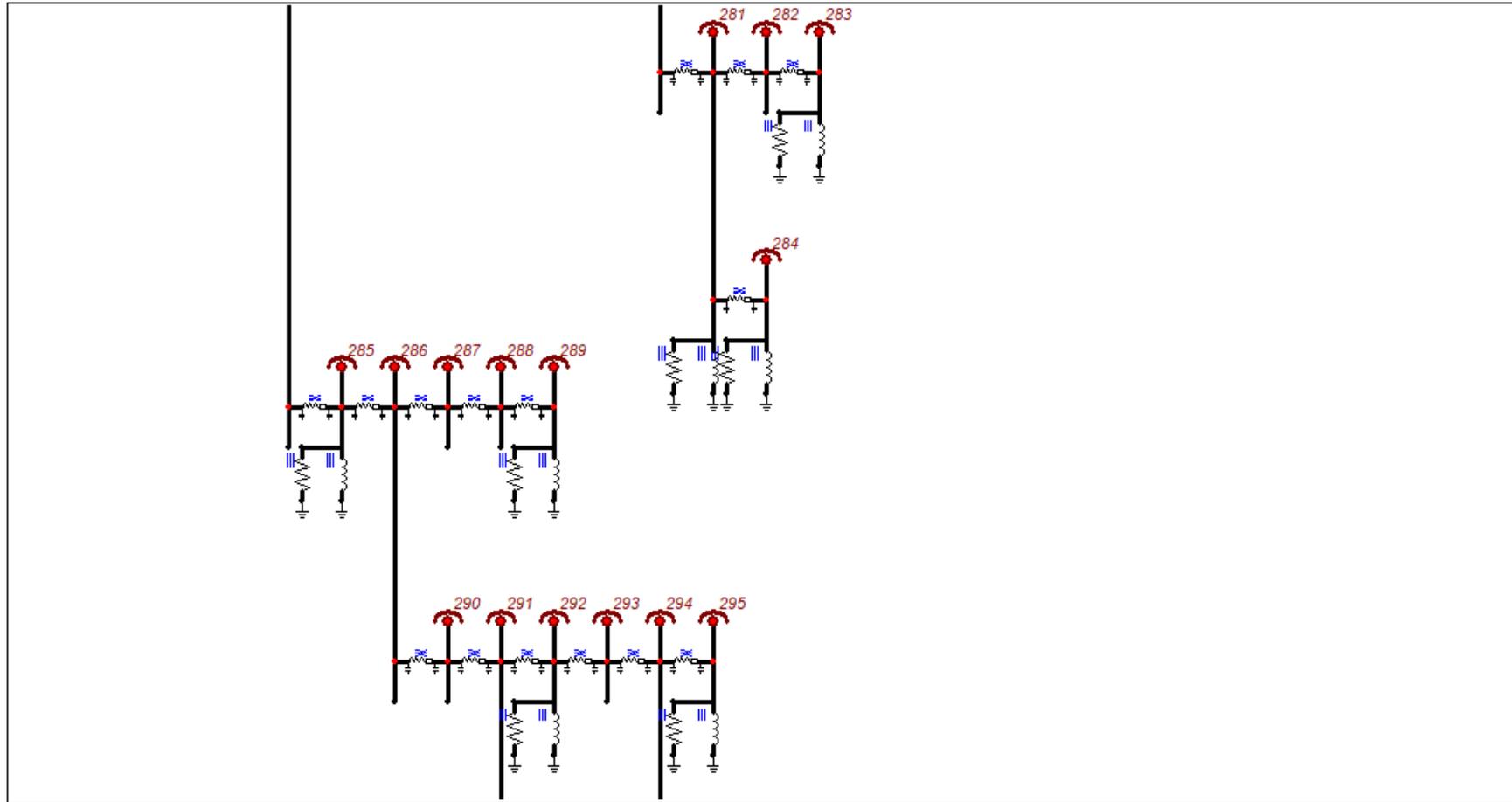


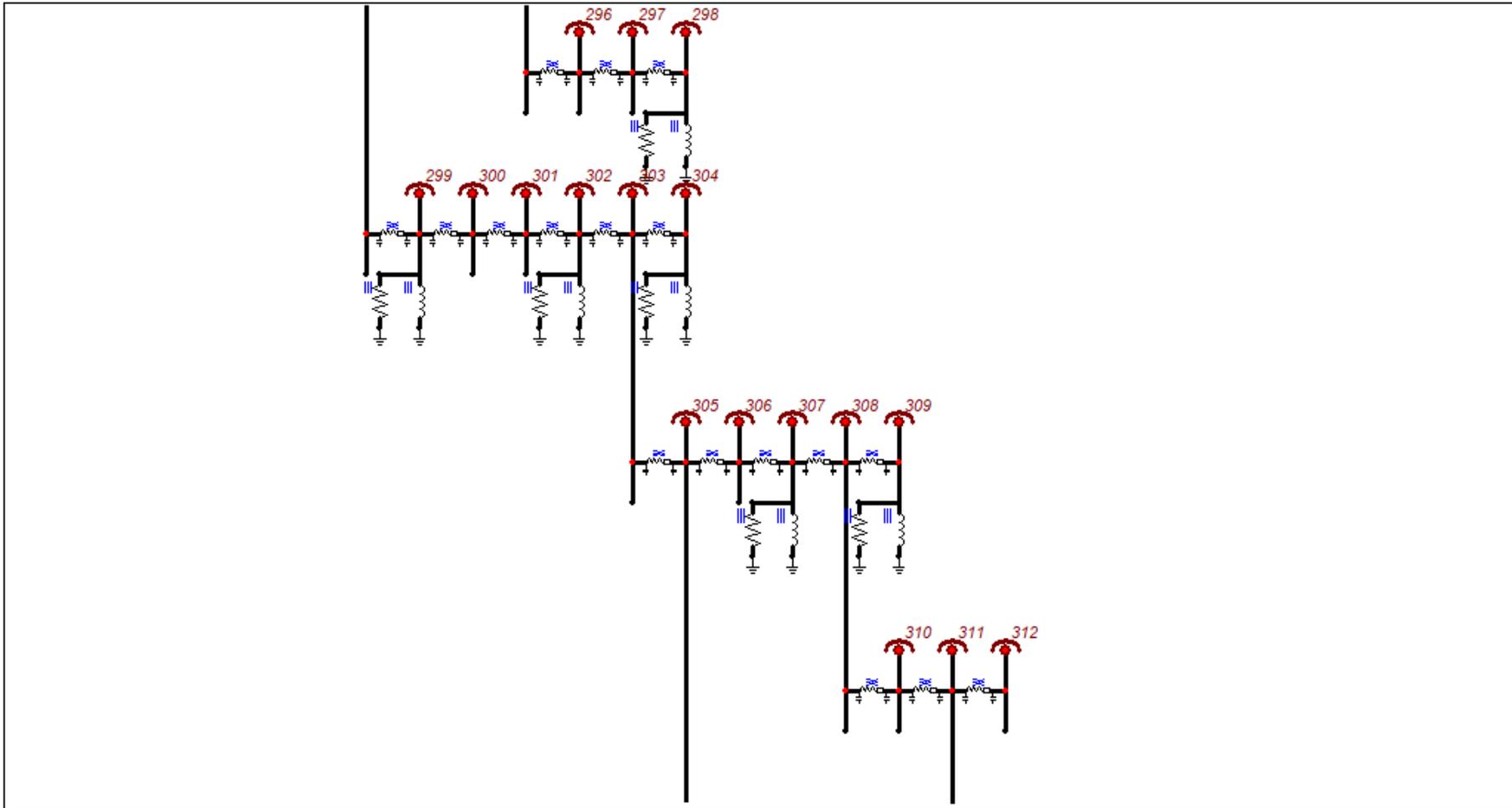


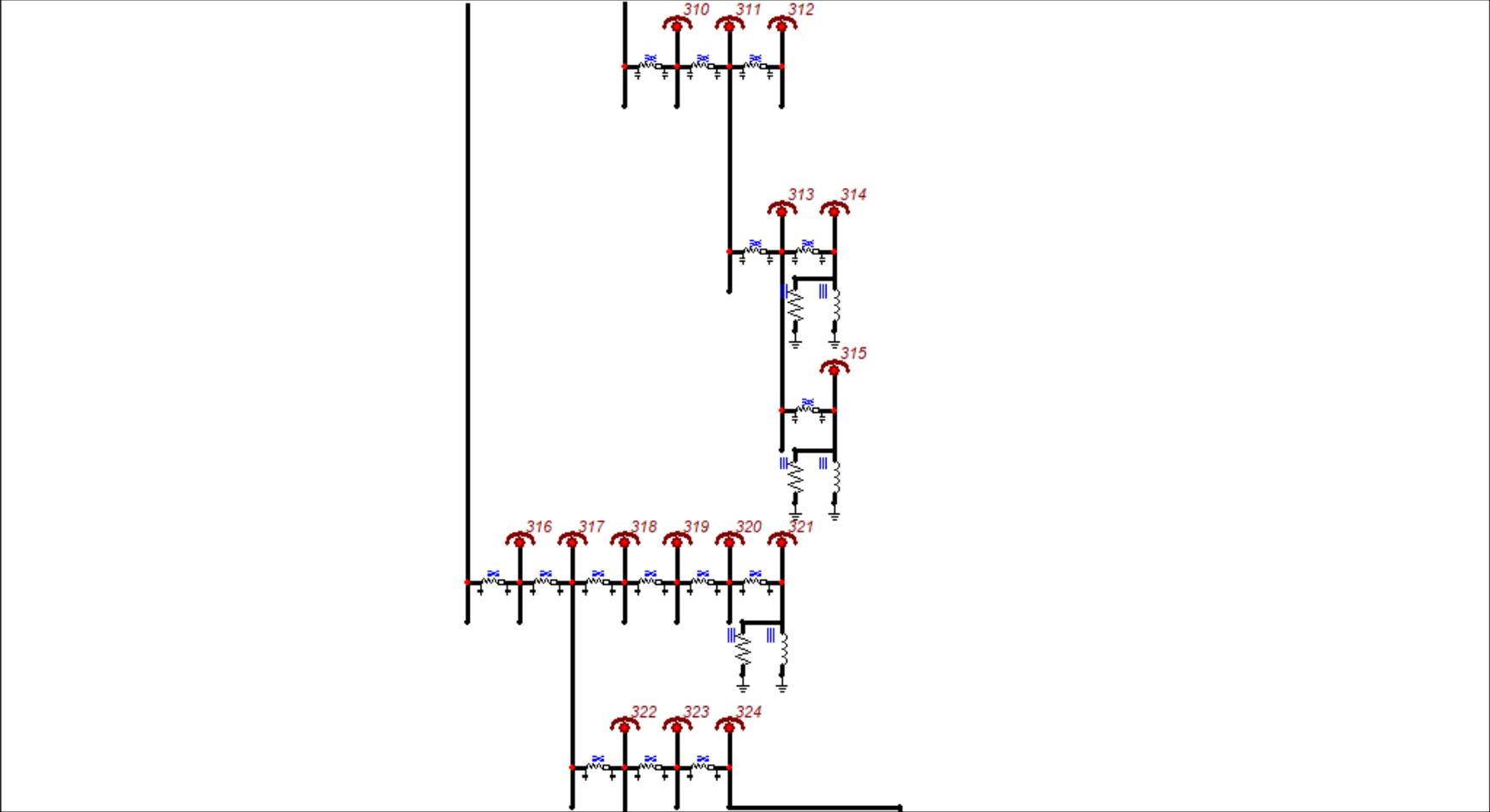


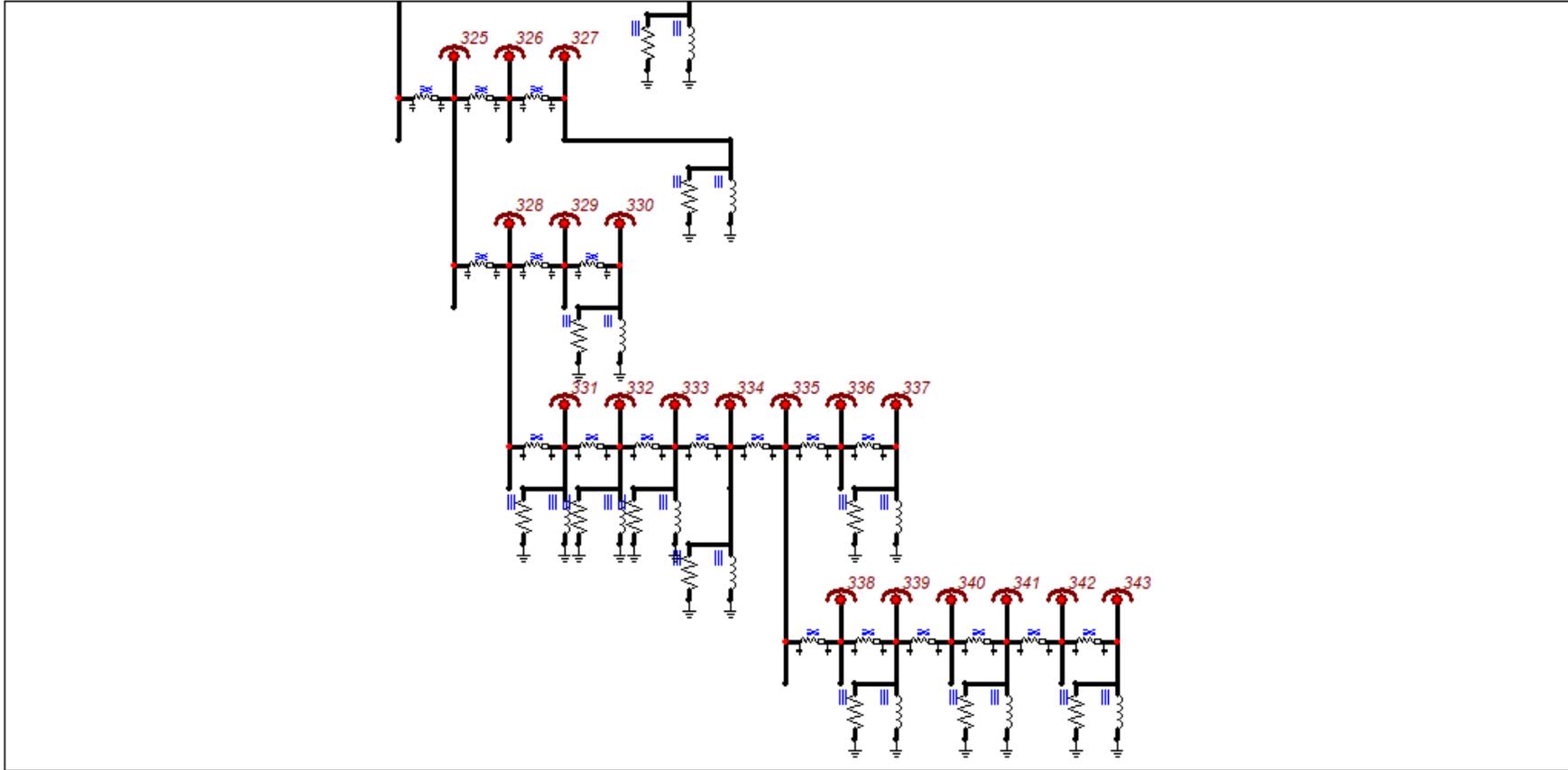












Quadro A3

