

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

RENATO FERREIRA SILVA

ESTUDO DA IMPLANTAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE
DE CURTO-CIRCUITO RESISTIVOS PARA ELIMINAÇÃO DE
ZEROS ATRASADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE UNIDADES
OFFSHORE

Niterói, RJ

2020

RENATO FERREIRA SILVA

ESTUDO DA IMPLANTAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-
CIRCUITO RESISTIVOS PARA ELIMINAÇÃO DE ZEROS ATRASADOS EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE UNIDADES OFFSHORE

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

Àrea de concentração: **Sistemas de Energia Elétrica.**

Orientador: Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, DSc.

Niterói/RJ

2020

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de
Computação da UF

RENATO FERREIRA SILVA

ESTUDO DA IMPLANTAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-
CIRCUITO RESISTIVOS PARA ELIMINAÇÃO DE ZEROS ATRASADOS EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE UNIDADES OFFSHORE

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

Área de concentração: **Sistemas de Energia Elétrica.**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo – Orientador

Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Dr. Márcio Zamboti Fortes

Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Dr. Rubens de Andrade Júnior

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Prof. Dr. Carlos Alberto Baldan

Escola de Engenharia de Lorena - USP

Dedico este trabalho aos meus pais, minha esposa e ao meu filho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais por sempre incentivarem os meus estudos, todo carinho e apoio.

A minha esposa, Natália Ferreira, por toda motivação, compreensão e paciência.

Ao Professor Guilherme Gonçalves Sotelo, orientador da presente dissertação, pela orientação, confiança, paciência e orientação que foi fundamental para o direcionamento desse trabalho.

Aos meus amigos da Petrobras, pelas discussões técnicas e todos os ensinamentos que são de grande valia para a vida profissional e acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense por me proporcionar a oportunidade de fazer parte do quadro de alunos desta Instituição.

Por último e especialmente ao meu filho, Paulo Ferreira, que mesmo no alto do seu um ano me ensinou e motivou a dar sempre o meu melhor, seja profissionalmente, academicamente ou na vida pessoal.

RESUMO

O sistema de distribuição elétrica de uma plataforma de petróleo apresenta para determinados tipos de defeitos, correntes de curto-circuito com elevada assimetria, devido à topologia do sistema elétrico em que dezenas de motores de média tensão estão conectados no mesmo nível de tensão dos geradores. Observa-se em aplicações práticas que durante a ocorrência de defeitos nos terminais de um gerador síncrono, as correntes de curto-circuito podem não passar por zero por um tempo considerável, denominado fenômeno de corrente com zero atrasado (*Delayed Current Zero* - DCZ), e este fenômeno pode resultar em sérios danos ao disjuntor do gerador durante a sua abertura na tentativa de interromper a corrente de defeito. Uma das formas de mitigar o problema de DCZ é atuar na redução da assimetria da corrente com aplicação de dispositivos limitadores. A aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores surge como uma das novas alternativas tecnológicas com grande potencial para limitar as correntes de curto-circuito e reduzir a assimetria das mesmas. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo do desempenho da aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores resistivos (*Resistive Superconducting Fault Current Limiters* – R-SFCL) no sistema elétrico de uma plataforma de petróleo durante condições de curto-circuito com surgimento do fenômeno de DCZ, através de modelos computacionais desenvolvidos no programa de simulação *Alternative Transients Program* (ATPdraw). Inicialmente, avaliaram-se as piores condições de curto-circuito que favorecem a ocorrência de DCZ nos terminais de uma máquina síncrona e o desempenho do limitador comparando os resultados de corrente de curto-circuito para o sistema elétrico com ou sem a inserção do R-SFCL. O sistema elétrico de uma plataforma de petróleo do tipo FPSO (*Floating Production Storage Offloading*) é implementado na simulação com a modelagem individual dos geradores, os motores de média tensão e os transformadores, juntamente com a modelagem do modelo eletrotérmico do R-SFCL. Os resultados demonstraram que a topologia da implementação do R-SFCL no sistema elétrico influencia na redução dos fenômenos de zeros atrasados e nos valores da corrente de curto-circuito para diferentes tipos de curto e localizações, possibilitando a proteção dos disjuntores dos geradores durante sua abertura.

Palavras-chave: Limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo, Fenômeno de Zeros Atrasados, Curto-circuito com alta assimetria, Sistema de Elétrico de um FPSO.

ABSTRACT

The electric power distribution system of an oil platform illustrates for certain types of failures, short circuit currents with high asymmetry, due to the topology of the electrical system in which dozens of medium voltage motors are connected at the same voltage level as the generators. It is observed in practical applications that during the occurrence of faults in the terminals of a synchronous generator, the short-circuit currents can take a considerable time to cross the zero current, called the Zero Delayed Current (DCZ) phenomenon, resulting in severe damages to the circuit-breaker of a generator during its opening, in an attempt to interrupt the short-circuit current. The application of superconducting fault current limiters is one of the new technological alternatives with high potential to reduce short-circuit currents and their asymmetry. In this context, this work presents an analysis of a resistive superconducting fault current limiters (R-SFCL) applied in the electrical system of an oil platform during short-circuit conditions with the occurrence of the DCZ phenomenon, using computational models developed in the Alternative Transients Program (ATPdraw). The simulated results show the worst short-circuit conditions at the terminals of a synchronous machine that favors the occurrence of DCZ and the performance of the R-SFCL by comparing the short-circuit current results for the electrical system with or without the insertion of the R-SFCL. The electrical system of an FPSO (Floating Production Storage Offloading) is implemented in the simulation with the individual modeling of the generators, the medium voltage motors, the transformers and the electrothermic model of the R-SFCL.. The simulated results showed that the location of the R-SFCL application on the electrical system topology influences the suppression of DCZ phenomena and reduce the peak short-circuit current values for different types of short-circuits and locations of the failure, making it possible to protect the circuit breakers of the generators during their opening.

Keywords: Resistive superconductive short-circuit current limiter, Delayed Zeros phenomenon, High asymmetrical short-circuit, FPSO electrical system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama unifilar para análise de corrente assimétrica.....	20
Figura 2- Correntes de curto trifásico no terminal do gerador.	23
Figura 3 - Componentes da corrente de curto.....	23
Figura 4- Modelagem de Park para as correntes na máquina síncrona.	26
Figura 5 - Comparativo das correntes de curto com e sem resistência de arco.	31
Figura 6 - Exemplo de aplicação de dispositivo pirotécnico durante o curto-circuito. ..	35
Figura 7 - Representação das correntes de curto e a atuação do dispositivo pirotécnico.	36
Figura 8 - a) Principais componentes do dispositivo pirotécnico. b) fotografia do dispositivo instalado no painel.	37
Figura 9 - Demonstração de atuação do dispositivo pirotécnico.	37
Figura 10 - Diagrama de fases para supercondutores tipo II.....	39
Figura 11 - Ilustração do supercondutor aplicado ao sistema elétrico. Adaptada de [16].	41
Figura 12 - Representação do desempenho do elemento shunt no supercondutor. ...	42
Figura 13 - Formas de onda de curto-circuito prospectiva e limitada. Adaptada de [3].	43
Figura 14 - a) Curva E-J mostrando os três estágios de transição. b) dependência do campo elétrico com a temperatura (Escala logarítmica). Adaptada de [5].	44
Figura 15 – Representação das camadas da fita 2G HTS YBCO.	47
Figura 16 - Representação e equivalente elétrico de cada fita individual.	51
Figura 17 - Ilustração do formato construtivo da fita 2G.. Erro! Indicador não definido.	
Figura 18 - Equivalente elétrico do módulo limitador.....	52
Figura 19 - Fluxograma do método iterativo para cálculo da resistividade do YBCO.	53
Figura 20 - Representação do volume infinitesimal para análise das equações de condução de calor.	54
Figura 21 - Representação unifilar da linha de transmissão com parâmetros distribuídos.	55
Figura 22 -a) Representação unifilar do circuito RC equivalente da linha de transmissão. b) Representação do fluxo de calor em cada camada para determinação da temperatura.	57
Figura 23 - Circuito Elétrico equivalente do modelo eletrotérmico do R-SFCL baseado na fita 2G HTS.	58
Figura 24 - Representação da simulação do curto-circuito nos terminais do gerador no ATP.	65
Figura 25 - Correntes de curto-circuito nos terminais do gerador.....	66
Figura 26 - Correntes de curto nos terminais do gerador com zero atrasado.	66
Figura 27 - Curto-circuito bifásico para trifásico com zero atrasado.	67
Figura 28 - Representação do modelo de simulação no ATPdraw da resistência de arco.	68
Figura 29 - Correntes de curto nos terminais do gerador no zero de tensão fase A (cenário 2).	69
Figura 30 - Correntes para curto no pico de tensão fase A (Cenário 2).	70
Figura 31 - Curto-circuito bifásico para trifásico (Cenário 2).....	71
Figura 32 - Modelo de simulação do curto-circuito no sistema com o R-SFCL.....	72

Figura 33 - Curto-circuito no zero de tensão nos terminais do gerador protegido pelo R-SFCL.	73
Figura 34 - a) Resistência equivalente do R-SFCL nas três fases. b) Temperatura em cada camada do R-SFCL durante o curto.	74
Figura 35 - Correntes de curto-circuito no pico de tensão para o cenário3.	75
Figura 36 -Curto bifásico para trifásico no cenário com o R-SFCL no sistema elétrico.	75
Figura 37 - a) Resistência equivalente do R-SFCL nas três fases. b) Temperatura em cada camada do R-SFCL durante o curto. (Cenário 3)	76
Figura 38 - Comparativo das correntes prospectivas e limitadas do curto bifásico para trifásico na fase A.	76
Figura 39 - Representação da simulação da contribuição motórica para um curto nos terminais do gerador.	77
Figura 40 - Correntes de curto no zero de tensão da fase com a contribuição motórica.	79
Figura 41 - Correntes de curto para uma falta no momento da passagem da fase A pelo pico de tensão.	80
Figura 42 - Detalhamento das correntes de curto, do motor e do gerador.	81
Figura 43 - Curto-circuito bifásico para trifásico (Cenário 4).	81
Figura 44 - Correntes de curto-circuito no zero de tensão da fase A para o cenário 5.	82
Figura 45 - Correntes de curto-circuito no pico de tensão da fase A para o cenário 5.	83
Figura 46 - Correntes de curto para uma falta evolutiva bifásica para trifásica, considerando a resistência de arco durante a abertura do disjuntor.	84
Figura 47 - Modelo para a simulação no ATP do cenário 6.	85
Figura 48 - Correntes de curto-circuito nos terminais do disjuntor "DJ-02" com o dispositivo R-SFCL no sistema.	86
Figura 49 - Correntes de curto para uma falta no pico de tensão da fase A (Cenário 6).	86
Figura 50 - Correntes de curto no terminal do disjuntor "DJ-02" para uma falta bifásica evoluindo para trifásica.	87
Figura 51 - a) Resistência equivalente do R-SFCL nas três fases. b) Temperatura em cada camada do R-SFCL durante o curto. (Cenário 6)	88
Figura 52 - Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico típico de um FPSO.	93
Figura 53 - Modelo unifilar do circuito elétrico do FPSO implementado na simulação.	96
Figura 54 - Correntes de curto-circuito no disjuntor do gerador condição A.1.	101
Figura 55 - Correntes de curto condição CO 1_A atuação Is-Limiter.	102
Figura 56 - Correntes de curto-circuito abertura do disjuntor do gerador GE-001C para falta trifásica.	103
Figura 57 - Curto-circuito evolutivo para falta localizada em B.	103
Figura 58 - a) Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico. b) Curto-circuito no momento que a fase A está no pico de tensão.	104
Figura 59 - a) Curto-circuito evolutivo para falta em D. b) Curto trifásico.	105
Figura 60 - a) Curto-circuito evolutivo no painel de 4,16 kV. b) Curto trifásico.	105
Figura 61 - a) Curto-circuito trifásico 1 para tempo de abertura t_1 . b) Curto trifásico para tempo abertura t_2	107
Figura 62 - a) Curto trifásico disjuntor gerador. b) Curto bifásico evolutivo para trifásico.	109
Figura 63 - Casos de curto-circuito para estudo da aplicação do R-SFCL.	111

Figura 64 - a) Corrente de curto trifásico durante a abertura do DJ-GE-A. b) Corrente de curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico durante a abertura do DJ-GE-A.	112
Figura 65 - a) Corrente prospectiva no TIE. b) Corrente de curto-circuito no TIE limitada pelo R-SFCL.....	112
Figura 66 - Comparativo das correntes prospectiva e limitada de curto.	113
Figura 67 - a) Resistência equivalente do módulo R-SFCL. b) Temperaturas de cada camada do limitador.....	114
Figura 68 - a) Corrente de curto trifásico durante a abertura do disjuntor DJ-GE-C. b) Corrente de curto evolutivo durante a abertura do disjuntor DJ-GE-C.	114
Figura 69 - Corrente prospectiva e limitada durante a interrupção do disjuntor do gerador para uma falta evolutiva em A.	115
Figura 70 - a) Resistência equivalente do R-SFCL. b) Temperatura em cada camada durante o curto evolutivo no ponto A.....	116
Figura 71 - a) Corrente de curto trifásico durante a abertura do disjuntor do motor. b) Corrente de curto evolutivo durante a abertura do disjuntor do motor.....	116
Figura 72 - a) Evolução da temperatura no YBCO. b) Comportamento da tensão na barra de 13,8 kV.	118
Figura 73 – a) Falta trifásica no terminal do gerador. b) Corrente para uma falta evolutiva.	121
Figura 74 - a) Corrente de curto trifásico terminal do disjuntor gerador. b) Curto evolutivo terminal do disjuntor gerador.	121
Figura 75 - Modelagem do motor de indução no ATPdraw.	140
Figura 76 - Regulador de tensão implementado na simulação.....	141
Figura 77 - Modelo do controle de velocidade.....	141

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Valores típicos para o parâmetro K da máquina síncrona.	16
Tabela 2 - Comparativo das propriedades análogas dos circuitos térmico e elétrico... 47	
Tabela 3 - Principais parâmetros da fita 2G.	51
Tabela 4 - Dados de placa de uma máquina síncrona de 31,25MVA; 13,8kV.	55
Tabela 5- Dados do motor de indução.	69
Tabela 6 - Comparativo das correntes de curto e zeros atrasados.	79
Tabela 7 - Dados dos cabos elétricos do sistema de 13,8 kV.	87
Tabela 8 - Resultados para o curto-circuito na condição operacional 1.	95
Tabela 9 - Resultados de curto-circuito para condição operacional 2.	97
Tabela 10 - Comparativo desempenho "Is-Limiter" e o R-SFCL.....	107
Tabela 11 - Comparativo entre o "Is-Limiter", o R-SFCL em série com a geração e no TIE.....	110
Tabela 12 - Dados Motores Elétricos 13,8 kV.	127
Tabela 13 - Dados dos parâmetros elétricos dos motores de 4,16 kV.	127

LISTA DE ABREVIATURAS

R-SFCL - Resistive Superconductor Fault Current Limiter.

R-LCCS - Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor Resistivo.

LCCs - Limitadores de Corrente de Curto-Circuito.

CA - Corrente Alternada.

CC - Corrente Contínua.

PMS - *Power Management System*.

ATP - Alternative Transient Program.

FRP - Fiberglass reinforced plastic.

FPSO - Floating Producing Storage Offloading.

X_d'' - Reatância Subtrânsitória de Eixo Direto.

X_d' - Reatância Trânsitória de Eixo Direto.

X_d - Reatância Síncrona de Eixo Direto.

X_q'' - Reatância Subtrânsitória de Eixo em Quadratura.

X_q' - Reatância Trânsitória de Eixo em Quadratura.

X_q - Reatância Síncrona de Eixo em Quadratura.

T_d'' - Constante de Tempo Subtrânsitória.

T_d' - Constante de Tempo Trânsitória.

T_a - Constante de Tempo Contínua.

IED - Intelligent Electronic Device.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da demanda por energia elétrica nos últimos anos exigiu a expansão da oferta de suprimento de energia e a adição de novas unidades de geração ao sistema elétrico. Além disso, o número de interconexões da rede elétrica aumentou significativamente, visando maior flexibilidade e confiabilidade na operação do sistema, o que acarretou na elevação do nível de corrente de curto-circuito nas subestações elétricas. Neste contexto, a capacidade nominal de suportabilidade ao curto-circuito dos motores, geradores, cabos, barramentos, transformadores e disjuntores atualmente instalados nas subestações poderia ser superada [1, 2, 3].

Os equipamentos supracitados devem ser dimensionados para suportar o nível de curto-circuito previsto para a instalação elétrica, o que causará impacto nos seus custos, tamanhos, pesos e disponibilidade comercial. Em [2, 3] mencionam-se alguns dispositivos tipicamente utilizados para limitar a corrente de curto, como os reatores limitadores de núcleo de ar ou núcleo magnético, transformadores de alta impedância e os dispositivos pirotécnicos. Porém, os dois primeiros citados apresentam a desvantagem da queda de tensão durante a partida de uma grande carga e em condições normais de operação. Nos dispositivos pirotécnicos podem ocorrer atuações espúrias e limitações na operação da planta até a completa substituição do inserto, introduzindo restrições operacionais ao sistema elétrico.

Cabe mencionar que em sistemas elétricos que as unidades geradoras são próximas aos centros de carga, como no caso dos sistemas isolados. Além do elevado valor da corrente de pico e de regime permanente de curto-circuito, as correntes apresentam elevada assimetria ocasionada pelo alto valor da relação X/R do sistema, que favorece o surgimento do fenômeno conhecido como zeros atrasados (DCZ, do inglês *Delayed Current Zero*). O DCZ é caracterizado por uma corrente de curto-circuito com alta assimetria, no qual a parcela de corrente contínua é tão elevada que não há passagem da corrente elétrica total (parcela CA+CC) pelo nível zero. Este fenômeno pode afetar o disjuntor durante a eliminação da falta, pois o arco elétrico nos polos do disjuntor é eliminado na passagem da corrente elétrica pela magnitude perto de zero Ampères.

Os DCZs estão associados às características do gerador e do sistema elétrico, à localização do ponto de falta e o instante de tempo em que a falha ocorreu. No entanto, o fator que exerce maior influência sobre esse fenômeno são os valores elevados da relação X/R do sistema caracterizados pelo decaimento lento da

componente CC de curto-circuito. Quando associado ao rápido decaimento da componente CA de curto-circuito, o efeito é agravado, resultando na maioria dos casos em um atraso na passagem da corrente pelo zero após a abertura do disjuntor, expondo o equipamento à tempos elevados de arcos em suas câmaras, podendo danificar o equipamento.

Uma das formas de mitigar o problema de DCZ é atuar na relação X/R do sistema com aplicação de dispositivos limitadores. A aplicação de limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores surge como uma das novas alternativas tecnológicas com grande potencial para limitar as correntes de curto-circuito e reduzir a assimetria das mesmas. Em [2, 3, 4, 5, 6, 7] é mencionado que existem limitadores de corrente de curto-circuito supercondutor disponíveis comercialmente e aplicados em sistemas elétricos.

Neste contexto, o limitador supercondutor resistivo (R-SFCL – *Resistive Fault Current Limiter*) apresenta-se como uma potencial solução para aplicação em sistemas elétricos com elevada relação X/R , devido às suas características peculiares de operação. Durante a condição de operação normal, o dispositivo mantém seu estado supercondutor apresentando impedância desprezível. No curto-circuito as elevadas correntes ocasionam uma rápida transição do dispositivo para o estado normal, sendo inserido um valor de resistência no caminho do curto, reduzindo o valor de X/R do sistema.

1.1. MOTIVAÇÃO

O problema de zero atrasado de corrente é relatado na literatura [1, 8, 9, 10, 11, 12] para curto-circuito nos terminais dos geradores em sistemas de energia elétrica. O problema é agravado em sistemas industriais isolados em que os motores elétricos são muito próximos à geração, contribuindo para o aumento da assimetria de corrente de curto-circuito. Nos sistemas elétricos de potência são utilizados disjuntores que utilizam o gás hexafluoreto de enxofre (SF₆) que são capazes de suportar correntes com grandes assimetrias e elevados tempos de exposição ao arco.

Em [1] foi discutido que os sistemas elétricos de plataformas de petróleo do tipo FPSO (*Floating Production Storage Offloading*) apresentam as condições mais favoráveis para o surgimento das correntes de zeros atrasados, pois se refere a um sistema elétrico isolado, cuja geração é composta por turbinas bicomustíveis (gás e diesel) conectados diretamente a grandes quantidades de motores, contribuindo para correntes de curto com elevada assimetria.

Devido a limitação de espaço nas plataformas, os disjuntores a vácuo têm sido utilizados em aplicações de proteção de circuitos de gerador, portanto, operam sob condições severas de interrupção de corrente de curto-circuito. Os disjuntores para aplicação do gerador devem atender aos requisitos da norma IEEE C.37.013, pois a relação X/R nos circuitos do gerador é mais alta que no circuito de distribuição típico, o que pode gerar correntes de curto-circuito com zeros atrasados. O disjuntor a vácuo não é capaz de suportar longos tempos de arco em suas câmaras internas enquanto o contato dos polos do disjuntor está sendo aberto, a fim de eliminar a corrente de curto-circuito, não sendo projetados para suportar correntes com zeros atrasados.

Em [2, 4] são apresentados os dispositivos limitadores de correntes baseados em materiais supercondutores. Muitos dispositivos conceituais foram testados em laboratórios e universidades e já existem aplicações em sistemas elétricos comerciais e industriais. Os testes realizados com o limitador de corrente de curto-circuito supercondutor (SFCL) forneceram melhores características operacionais do que os dispositivos de limitação de corrente de falta com base em reatores limitadores ou dispositivos pirotécnicos.

Em [2] foi aplicado o limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo (R-SFCL) no sistema elétrico da plataforma do tipo FPSO com intuito de avaliar o desempenho na limitação do valor de pico e regime permanente da corrente de curto-circuito apresentando resultados satisfatórios.

No presente trabalho será simulado um R-SFCL aplicado no sistema elétrico de uma plataforma de petróleo para as condições de curto-circuito em que ocorrem zeros atrasados durante a abertura do disjuntor. Serão consideradas duas localizações para o R-SFCL no sistema elétrico e analisado qual é a topologia que apresenta maiores ganhos na limitação da assimetria da corrente, e se o dispositivo é capaz de suprimir o zero atrasado da instalação.

1.2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do R-SFCL no sistema elétrico de uma plataforma de petróleo do tipo FPSO através de simulações para as condições de curto-circuito que apresentem maior probabilidade de ocorrência de zeros atrasados através de simulações computacionais. Para o estudo do comportamento das correntes para diferentes tipos de curto e a avaliação do desempenho do R-SFCL no sistema elétrico foi utilizado o software de simulação ATPdraw.

Serão avaliadas diferentes condições de curto nos terminais do gerador integrante de um sistema isolado com um motor de indução com objetivo de averiguar a pior condição para ocorrência de zeros atrasados, assim como a contribuição motórica para o agravamento do fenômeno. Em seguida, frente aos mesmos cenários é introduzido o R-SFCL em série com o gerador com objetivo de avaliar seu desempenho na mitigação das correntes assimétricas e eliminação dos zeros atrasados durante a abertura do disjuntor.

Por fim, será avaliado o desempenho do R-SFCL no sistema elétrico de uma plataforma considerando duas topologias para aplicação do dispositivo. Sendo comparada entre essas topologias a que apresentam resultados mais satisfatórios tanto quanto na limitação da corrente de curto quanto na eliminação do problema de zeros atrasados.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este manuscrito está organizado em sete capítulos, dispostos da seguinte forma: este primeiro capítulo introduz o problema a ser estudado, apresentando os objetivos e motivações desta dissertação. No capítulo 2 será apresentada uma breve revisão bibliográfica da teoria de curto-circuito e de zeros atrasados.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica do funcionamento dos dispositivos pirotécnicos limitadores de corrente de curto-circuito, um breve resumo sobre supercondutividade e princípio de funcionamento do R-SFCL.

No capítulo 4 é apresentada a modelagem do R-SFCL que será utilizada para neste manuscrito. É feita uma descrição matemática do comportamento do limitador com base na analogia eletrotérmica do dispositivo utilizado para implementação da simulação computacional.

O capítulo 5 ilustra os resultados para o curto-circuito e as possíveis condições para ocorrência de zeros atrasados em um sistema isolado com um único gerador e motor, além disso, avalia-se o desempenho do R-SFCL em série com o gerador.

O capítulo 6 avalia os resultados das condições operacionais no sistema elétrico de uma plataforma de petróleo que podem ocorrer zeros atrasados e aplicação do R-SFCL em diferentes localizações do sistema elétrico com objetivo de eliminar as correntes de zeros atrasados durante a abertura do disjuntor através da introdução de uma resistência no caminho do curto.

Por fim, o capítulo 7 trata da conclusão com as discussões dos resultados e sugestões para trabalhos futuros.

2. CURTO-CIRCUITO E ZEROS ATRASADOS

O fenômeno de zero atrasado é caracterizado por uma corrente de curto-circuito com elevada assimetria, estando presentes em sistemas elétricos isolados em que a geração está conectada diretamente as cargas, sendo o caso do sistema elétrico da FPSO.

Diversos fatores contribuem para o surgimento do fenômeno do zero atrasado no sistema elétrico como, por exemplo: características construtivas do gerador, a proximidade do curto-circuito dos terminais do gerador e o momento inicial da falta. Porém, o fator que exerce maior influência para o surgimento desse fenômeno é a elevada relação X/R do sistema. Quanto maior esta relação no sistema, mais lento é o decaimento da componente CC da corrente de curto-circuito. Quando somado ao rápido decaimento da componente CA de curto, o qual depende essencialmente das características do gerador, a contribuição dos motores para o curto e o instante de abertura do disjuntor, podendo implicar em um atraso na passagem da corrente por zero [1].

Nos sistemas industriais com geração própria, como o de uma plataforma de petróleo, a distribuição de energia é configurada em 13,8 kV com quatro geradores operando em paralelo. Neste sistema temos a geração elétrica próxima a cargas motóricas de grande potência, caracterizando altos valores de X/R (por exemplo $X/R > 17$) equivalente para o sistema de 13,8 kV. Para um cenário específico de curto-circuito trifásico ocorrendo próximo à geração, tem-se que o valor instantâneo da corrente de defeito que flui pelo disjuntor poderá em determinados cenários levar um tempo considerável para alcançar o valor zero após a abertura do disjuntor. Nesta condição, o equipamento estará exposto à energia de arco por um tempo considerável em seu terminal até a extinção da falta (abertura do disjuntor na passagem da corrente pelo zero).

Os disjuntores dos geradores e das cargas motóricas devem apresentar determinados requisitos de desempenho para lidar com correntes de curto com elevadas assimetrias. Devido à limitação de espaço físico em uma FPSO, o tipo de disjuntor utilizado é a vácuo, no qual apresenta restrições de tempo em que o arco elétrico pode permanecer entre os polos do disjuntor sem provocar danos. O fenômeno de DCZ implica em risco durante a abertura do disjuntor, pois estarão expostos a arcos por longos períodos, e dessa forma poderá ocorrer danos ao disjuntor e ao painel, devido a elevada energia interna do arco.

2.1. CURTO-CIRCUITO E CORRENTE ASSIMÉTRICA

Um sistema elétrico por mais bem projetado, operado e com boas práticas de manutenção poderá estar sujeito a diversos eventos de curto-circuito durante sua vida útil. O objetivo do estudo de curto-circuito é a determinação dos valores máximos e mínimos de corrente que fluem no sistema durante a ocorrência do mesmo. Os valores máximos são utilizados para dimensionar os dispositivos de interrupção (disjuntores e contadores) quanto sua capacidade de interrupção e suportabilidade térmica ao curto-circuito. Os valores mínimos da corrente de curto-circuito são utilizados para o ajuste da coordenação e seletividade da proteção elétrica.

Nesta seção será estudado o comportamento transitório da corrente de curto-circuito. Um dos dados mais importante para esta análise é a assimetria que ela pode apresentar no instante inicial de curto. O pico máximo da corrente assimétrica geralmente ocorre quando a tensão em uma das fases estiver passando por zero no instante de curto. A componente contínua de curto é a responsável pela assimetria e decai exponencialmente com o tempo, cuja constante de tempo depende da relação X/R do sistema no ponto de curto. Dessa forma, nos instantes iniciais do curto-circuito, o valor de pico da corrente é muitas vezes mais severo que o valor de pico na condição de regime permanente, podendo ser superior a vinte vezes maior que a corrente nominal. O conhecimento do comportamento da corrente de defeito nestes instantes iniciais é relevante para a especificação dos equipamentos [12].

O regime transitório é analisado matematicamente pela representação do circuito equivalente de Thevenin no ponto da falta conforme apresentado na Figura 1, considera-se que a impedância de Thevenin ($Z = R + j\omega L$) é invariante durante o evento. Uma falta trifásica é simulada pelo fechamento da chave S1 no circuito da Figura 1.

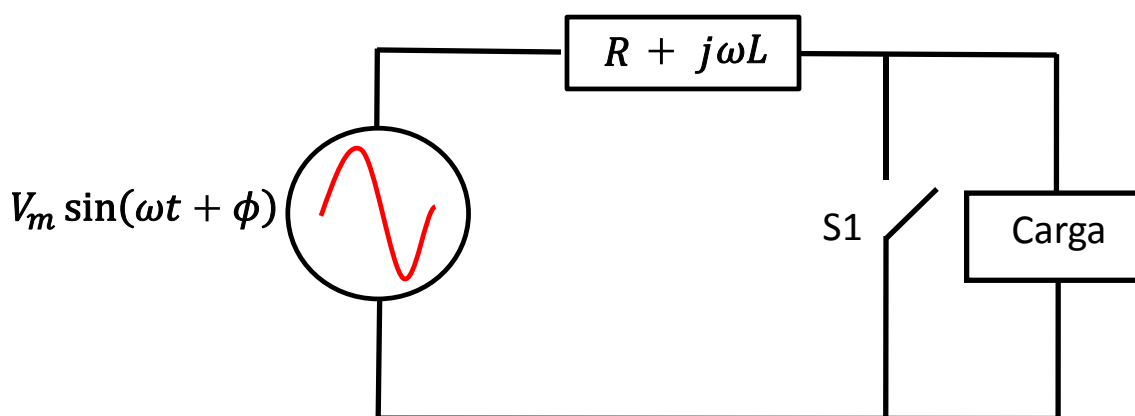


Figura 1 - Diagrama unifilar para análise de corrente assimétrica.

O equacionamento das grandezas elétricas para o circuito é dado por:

$$V_m \sin(\omega t + \phi) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (1)$$

Uma vez que a corrente de curto-circuito é muitas vezes maior que a corrente de carga, considera-se que a corrente inicial é nula. A resolução da equação diferencial para $i(t)$ em (1) é apresentada em (2):

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\omega t + \phi - \lambda) - \sin(\phi - \lambda) e^{-\frac{R}{L}t} \right], \quad (2)$$

onde, V_m é o valor de pico da tensão, ϕ é o ângulo da tensão no instante da ocorrência do curto, $Z = R + j\omega L$ é a impedância do circuito no caminho do curto e $\lambda = \text{atan}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$ é o ângulo do fator de potência do circuito.

A solução de $i(t)$ na equação (2) indica que nos primeiros ciclos do curto-circuito, a corrente resultante é a soma de duas parcelas, a primeira parcela, denominada componente CA, é periódica e defasada da tensão pelo ângulo do fator de potência. A segunda parcela é unidirecional e atenuada com o tempo denominada componente CC.

2.1.1.1. Pico Máximo da Corrente Assimétrica

Para o cálculo do pico máximo de corrente assimétrica consideramos $\phi = 0$, $\frac{t}{(L/R)} = \frac{\omega t}{(X/R)} e \frac{V_m}{Z} = 1$, dessa forma a equação (2) é reduzida a:

$$i(t) = \left[\sin(\omega t - \lambda) + \sin(\lambda) e^{-\frac{\omega}{X/R}t} \right]. \quad (3)$$

Em (3) observa-se que o máximo valor da componente alternada ocorrerá quando o ângulo atingir o valor de $(\pi/2) + \lambda$. A componente contínua atinge o seu valor máximo no instante $t = 0$ e o seu valor depende do fator $(\sin \lambda)$.

O valor máximo de pico de corrente assimétrica ocorre no primeiro pico da componente alternada. O instante de tempo em segundos é obtido dividindo o ângulo $((\pi/2) + \lambda)$ por ω . Onde a variável λ é escrita em função da relação X/R :

$$t = \frac{\pi/2 + \tan^{-1}(X/R)}{\omega}. \quad (4)$$

Substituindo (4) em (3) obtém-se o valor máximo de pico da corrente assimétrica em função da relação X/R no ponto de curto-circuito:

$$i_{max} = \left[1,0 + \sin(\tan^{-1} X/R) e^{-\frac{\pi/2 + \tan^{-1}(X/R)}{X/R}} \right]. \quad (5)$$

2.1.2. Condição de Máxima Assimetria

A condição de máxima assimetria é obtida quando a parcela CC apresenta no instante inicial valor igual ao máximo valor da componente CA [1]. Observa-se na equação (2) que a máxima assimetria ocorre quando:

$$\sin(\lambda - \phi) = 1 \quad (6)$$

Ou seja,

$$\lambda - \phi = \pi/2 \quad (7)$$

$$\phi = \lambda - \pi/2 \quad (8)$$

Substituindo (8) em (2):

$$i(t) = \left[\sin(\omega t - \pi/2) + e^{-\omega t/X/R} \right] \quad (9)$$

Observa-se que a máxima condição de assimetria difere da condição do máximo valor de pico assimétrico. Para a condição de máximo pico assimétrico tem-se que $\lambda = 0$ e para condição de máxima assimetria $\lambda - \phi = \pi/2$.

2.2. CURTO-CIRCUITO EM GERADORES SÍNCRONOS

Como dito acima, a corrente de curto-circuito em um gerador síncrono é composta por uma parcela contínua, que é somada a uma componente alternada, a qual é oscilatória e decai com o tempo. A Figura 2 ilustra as correntes trifásicas que podem ocorrer durante um curto trifásico aplicado nos terminais de um gerador síncrono.

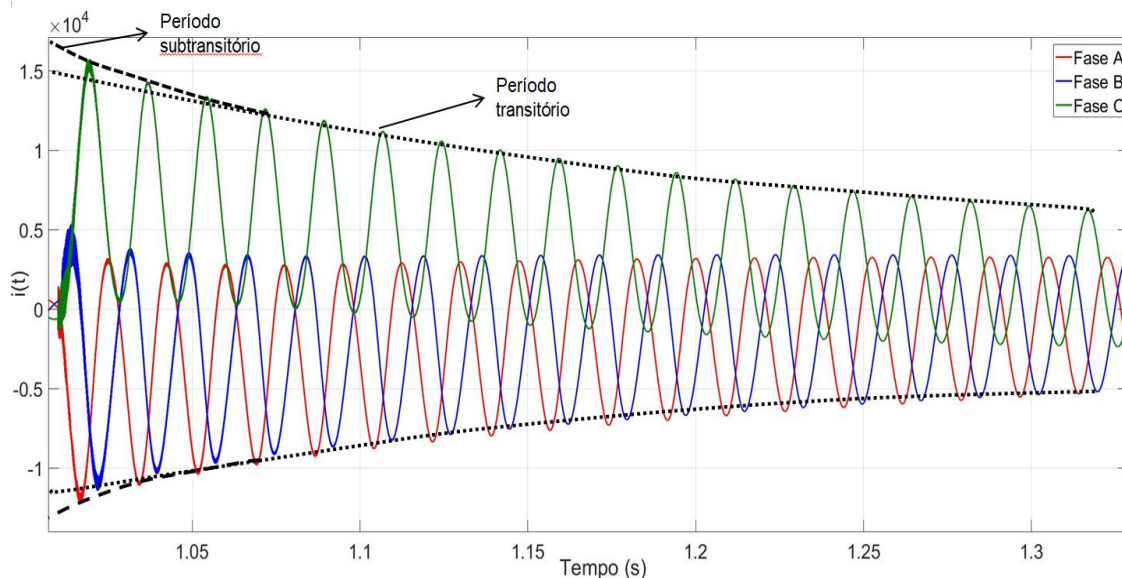


Figura 2- Correntes de curto trifásico no terminal do gerador.

A Figura 3 apresenta a decomposição da corrente na fase A em seus valores em RMS para a corrente alternada (verde), corrente contínua (vermelha) e corrente total para o curto trifásico nos terminais do gerador.

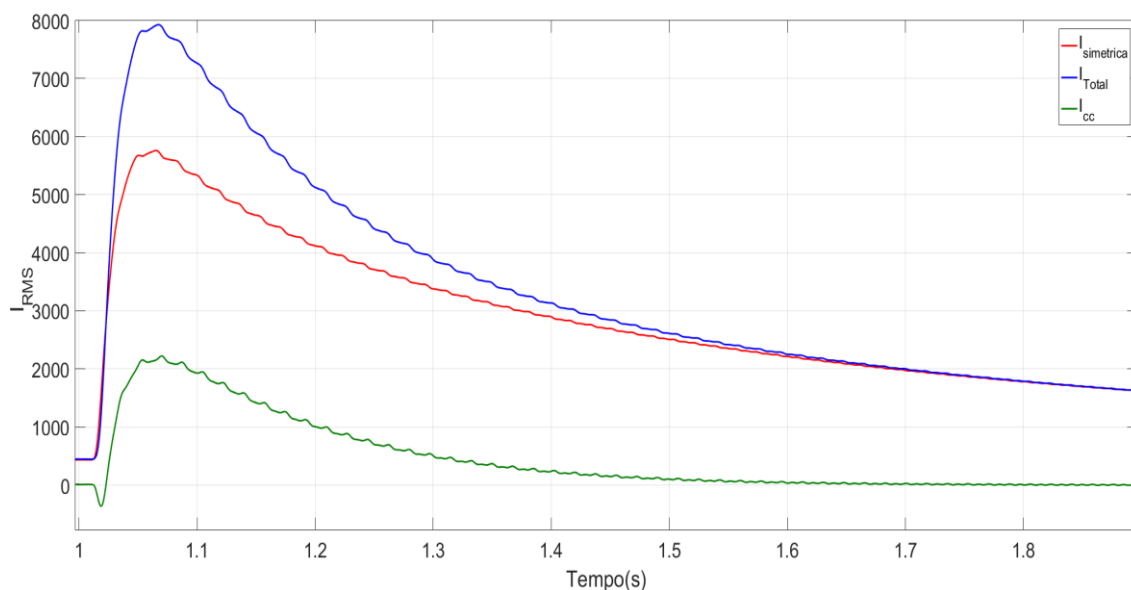


Figura 3 - Componentes da corrente de curto.

Ao aplicar um filtro para analisar as componentes de curto-circuito, podemos observar que a corrente simétrica não é fixa e seu valor decaiu com o tempo como mostrado na Figura 3. Nos primeiros ciclos, denominado subtransitório, apresenta o seu maior valor e vai decrescendo até atingir o regime permanente.

A corrente de curto-circuito de um gerador pode ser subdividida em três períodos distintos: Subtransitório, Transitório e Regime Permanente. Nas Figura 2 e Figura 3 são observados os decaimentos da corrente de curto, o qual é oriundo da variação do

valor da reatância interna do gerador, tornando difícil calcular analiticamente o valor desta corrente, dessa forma com intuito de agilizar o cálculo é definido uma reatância interna para cada período.

2.2.1. Reatância Subtransitória

O período subtransitório corresponde o período inicial do curto-circuito e é caracterizado nos geradores síncronos pela reatância subtransitória. O enrolamento amortecedor é o principal responsável por esse período, tendo o princípio de operação semelhante ao motor de indução [13]. Durante o regime permanente, o rotor do gerador está em sincronismo com o campo magnético do estator e nenhuma indução ocorre no enrolamento amortecedor. Durante o curto-circuito o rotor perde o sincronismo com o campo do estator, induzindo correntes no enrolamento amortecedor. Dessa forma, estas correntes são responsáveis por produzir um fluxo magnético adicional no estator atuando no sentido de minimizar as oscilações no rotor, conferindo maior estabilidade dinâmica ao gerador. Porém é responsável momentaneamente pela redução da indutância da máquina, consequentemente aumenta o valor da corrente de curto-circuito.

A reatância subtransitória pode ser obtida através de um ensaio de curto-circuito no qual é medido o valor máximo da corrente I''_{max} e os valores da tensão no terminal do gerador. Muitos fabricantes já fornecem os valores da reatância subtransitória, transitória e de regime permanente nas folhas de dados. Nas equações abaixo é apresentado à formulação analítica para obtenção aproximada do valor da reatância subtransitória:

$$E''_g = V_t + jX''_d I, \quad (10)$$

$$E''_g = k'' V_t, \quad (11)$$

$$I'' = \frac{E''_g}{X''_d + Z_N} \rightarrow X''_d = \frac{E''_g}{I''} - Z_N. \quad (12)$$

Sendo V_t é o valor eficaz da tensão pré-falta nos terminais do gerador, I'' é o valor eficaz da corrente no período subtransitório, E''_g é a força eletromotriz do gerador associada a reatância saturada de eixo direto, Z_N impedância equivalente de Thevenin no ponto de falta e X''_d reatância subtransitória saturada de eixo direto.

2.2.2. Reatância Transitória

O período transitório é caracterizado pelo decaimento mais suave da envoltória de curto. O responsável pelo surgimento desse período é a indução de correntes alternadas no enrolamento de campo do rotor durante o curto-circuito [13].

A reatância transitória pode ser obtida através de um ensaio de curto-circuito e o seu valor é fornecido na folha de dados dos fabricantes. A formulação analítica para obtenção do valor da reatância transitória e da corrente transitória é apresentada em (13), (14) e (15):

$$E'_g = V_t + jX'_d I, \quad (13)$$

$$E'_g = k' V_t, \quad (14)$$

$$I' = \frac{E'_g}{X'_d + Z_N} \rightarrow X'_d = \frac{E'_g}{I'} - Z_N. \quad (15)$$

Onde I' é o valor eficaz da corrente de curto no período transitório, E'_g é a força eletromotriz do gerador atrás da reatância transitória saturada de eixo direto, e X'_d reatância transitória saturada de eixo direto.

2.2.3. Reatância Síncrona

Presente no regime permanente, a reatância síncrona pode ser expressa por:

$$E_g = V_t + jX_d I, \quad (16)$$

$$E_g = k V_t, \quad (17)$$

$$I = \frac{E_g}{X_d + Z_N} \rightarrow X_d = \frac{E_g}{I} - Z_N. \quad (18)$$

Onde I é o valor eficaz da corrente de regime permanente de curto, E_g é a força eletromotriz do gerador atrás da reatância saturada de eixo direto, e X_d reatância saturada de eixo direto.

Conforme [14] existem alguns valores típicos para o parâmetro k das máquinas que está associado as características construtivas das ranhuras do estator e do rotor e

da distribuição do enrolamento nessas ranhuras. A Tabela 1 apresenta os valores típicos para o parâmetro k para as reatâncias subtransitória, transitória e síncrona.

Tabela 1 - Valores típicos para o parâmetro k da máquina síncrona.

	Reatância Subtransitória	Reatância Transitória	Reatância Síncrona
Polos Lisos	1,08	1,11	2,35
Polos Salientes	1,12	1,18	1,8

2.2.4. Formulação da Corrente de Curto em Geradores Síncronos

As curvas típicas de corrente assimétrica devido a um curto-circuito nas proximidades de um gerador síncrono foram apresentadas nas Figura 2 e Figura 3. A modelagem matemática das correntes torna-se bastante complexa, devido variação da reatância ao longo do tempo. Em [1] utilizou a transformada de Park para análise do efeito transitório, o qual considera enrolamentos amortecedores nos eixo direto (d) e em quadratura (q), conforme mostrado na Figura 4. Sendo a , b e c as fases dos enrolamentos de armadura, d o eixo direto, q o eixo em quadratura, f o enrolamento de campo e λ é o ângulo entre o eixo da fase A e o eixo direto.

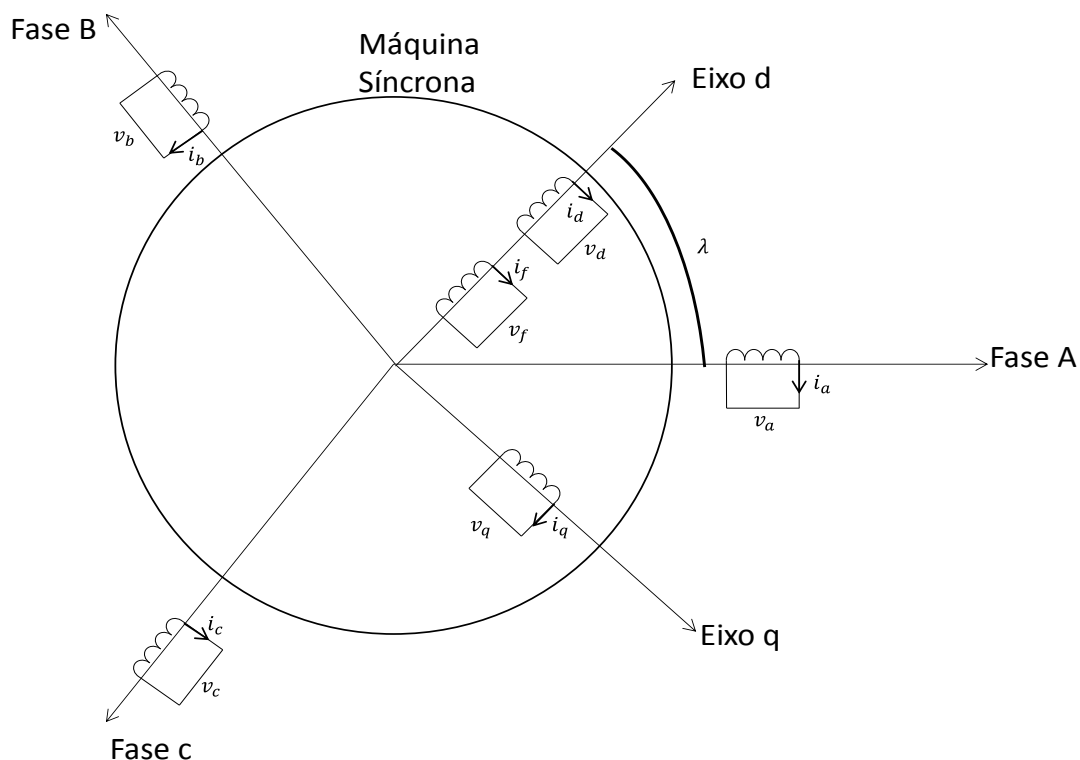


Figura 4- Modelagem de Park para as correntes na máquina síncrona.

$$\begin{aligned}
i_a = & -\sqrt{2}V_{q0} \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} \right] \cos(\omega t + \lambda) - \right. \\
& \left. \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x'_q} \right) e^{-t/T_a} \cos \lambda - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_q} \right) e^{-t/T_a} \cos(2\omega t + \lambda) \right\} + \\
& \sqrt{2}V_{d0} \left\{ - \left[\frac{1}{x_q} + \left(\frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-t/T'_q} \right] \sin(\omega t + \lambda) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x'_q} \right) e^{-t/T_a} \sin \lambda - \right. \\
& \left. \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_q} \right) e^{-t/T_a} \sin(2\omega t + \lambda) \right\} - \sqrt{2}I_{d0} \cos(\omega t + \lambda) - \sqrt{2}I_{q0} \sin(\omega t + \lambda).
\end{aligned} \tag{19}$$

Sendo λ o ângulo entre a fase A do enrolamento de armadura e o eixo direto no instante da falta, V_{d0} , V_{q0} , I_{d0} e I_{q0} são as componentes de tensão e corrente pré-falta dos eixos direto e em quadratura, T''_d , T'_d e T_a são respectivamente, as constantes de tempo subtransitória, transitória e a constante de tempo da componente da corrente contínua. Em [14] é apresentada uma expressão para obtenção do valor RMS aproximado da corrente de curto dos geradores em qualquer instante de tempo:

$$I_{ccg} = \sqrt{[(I'' - I')e^{-t/T''_d} + (I' - I)e^{-t/T'_d} + I]^2 + 2(I''e^{-t/T_a})^2} \tag{20}$$

Os valores de T''_d , T'_d e T_a podem ser obtidos pelas equações (21), (22) e (23) apresentadas em [7]:

$$T''_d = \frac{X''_d + X_N}{X'_d + X_N} T''_{do}, \tag{21}$$

$$T'_d = \frac{X'_d + X_N}{X_d + X_N} T'_{do}, \tag{22}$$

$$T_a = \frac{X''_d + X''_q + Z_N}{2\omega(R_a + R_N)}. \tag{23}$$

Sendo τ''_{do} a constante de tempo subtransitória a vazio e τ'_{do} é a constante de tempo transitória a vazio. Em [14] são apresentados valores típicos de constantes de tempo para máquinas síncronas:

- Turbogeneradores $\rightarrow T''_{do} \sim 3$ a 4 *semiciclos*; $T'_{do} \sim 3$ *segundos*.
- Máquinas de polos salientes $\rightarrow T''_{do} \sim 50$ *ms*; $T'_{do} \sim (5$ a 12) *segundos*.

2.2.5. Zero Atrasado Geradores Síncronos

Estudos de curto-circuito em geradores mostram que dependendo de certas combinações de parâmetros da máquina e condições pré-falta, podem surgir correntes de armadura com zero atrasado independente do instante da ocorrência do evento. A equação (19) mostra a formulação matemática para a corrente de falta na fase A do gerador, a qual contém componentes fundamental, de segundo harmônico e componente contínua de curto, o fenômeno de zero atrasado ocorre quando a parcela referente a corrente contínua excede a soma das outras duas. [1, 15]

Para obtenção do tempo que a corrente da fase A demora a cruzar o zero (t_z), igualamos (19) a zero, assim $i_a(t) = 0$, a solução analítica é obtida com algumas simplificações [17]:

- (a) $[(t_z) \gg T_d'' \text{ e } T_q'']$ os primeiros instantes do transitório da corrente são desprezíveis, desprezando esses termos na equação.
- (b) $x_d'' = x_q''$, assim as componentes de segundo harmônico na equação são desprezíveis.

Dessa forma a equação (19) contém apenas a componente fundamental de estado estacionário e uma componente que decai com constante de tempo T_d' , em conjunto com a componente contínua que decai com constante de tempo T_a . O primeiro zero ocorre quando a variável da componente contínua é igual a componente alternada, conforme mostrado em (24):

$$\left(\frac{V_{q0}}{x_d} + I_{d0}\right) + V_{q0} \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d}\right) e^{-t/T_d'} = \frac{V_0}{x_d''} [\cos(\lambda - \delta)] e^{-t/T_a}. \quad (24)$$

Onde V_0 é a tensão pré-falta nos terminais do gerador. Uma solução analítica simplificada para equação (24) é apresentada em (25):

$$t_z = \frac{T_d' T_a}{T_d' - T_a} \ln \left[\frac{x_d' V_0 \cos(\lambda - \delta)}{x_d'' (I_{d0} x_d' + V_{q0})} \right]. \quad (25)$$

Se a falta ocorre quando a tensão na fase A está passando por zero ou 180° , tem-se que $\lambda = \delta$ ou $\lambda = \delta + 180^\circ$, além disso, considera-se o gerador a vazio, assim $I_{d0} = 0, \delta = 0, V_0 = V_{q0}$, obtendo a equação (26):

$$t_z = \frac{T_d' T_a}{T_d' - T_a} \ln \left[\frac{x_d'}{x_d''} \right]. \quad (26)$$

A equação (26) demonstra que a pior condição para zero atrasado ocorre com o gerador a vazio.

2.3. DISJUNTORES – INTERRUPTÃO DAS CORRENTES

Os disjuntores são equipamentos destinados à interrupção e restabelecimento das correntes elétricas, muitas vezes operam associados com *Intelligent Electronic Device* (IEDs) ou relés de proteção que são dispositivos que monitoram e avaliam continuamente a condição do sistema elétrico e enviam comandos de abertura para o disjuntor em caso de alguma anomalia ou por comando manual do operador.

A função principal do disjuntor é interromper as correntes de defeito em um determinado ponto do circuito durante o menor tempo possível com o objetivo de eliminar o defeito rapidamente mantendo o restante do sistema em condição normal de operação. Os equipamentos que compõem o sistema elétrico (transformadores, cabos, barramentos, motores, disjuntores e etc) devem ser projetados para suportarem os efeitos térmicos e mecânicos da corrente de curto-circuito até a atuação da proteção e a eliminação do defeito pelo disjuntor.

A interrupção da corrente pelo disjuntor se faz pela separação dos seus contatos, cessando a continuidade elétrica do circuito. Durante a separação ocorre o surgimento do arco elétrico, devido à energia armazenada no circuito, que precisa ser eliminado rapidamente com objetivo de minimizar a exposição do disjuntor a energia do arco. Disjuntores à vácuo são capazes de interromper correntes de curto sem sofrerem nenhum tipo de dano se o tempo de duração do arco voltaico estiver entre 5 a 20 ms [1, 16].

A extinção do arco depende do alongamento do arco através da separação dos contatos, redução da temperatura e desionização do meio entre os contatos tornando um meio isolante. O material utilizado para o isolamento elétrico dos contatos e extinção do arco define umas das características construtivas do disjuntor que pode ser: o ar, gás, vácuo ou óleo.

As plataformas de petróleo offshore possuem limitações de espaço, assim em sua instalação são utilizados disjuntores à vácuo, devido à sua propriedade de dimensões reduzidas quando comparadas a outros tipos de disjuntor como a óleo e a SF6. Além disso, outra vantagem é o número máximo de operações em função da corrente a ser interrompida em disjuntores à vácuo ser maior que em disjuntores à óleo e SF6 sendo portanto indicado em instalações com uma frequência elevada de manobras.

Durante a separação dos contatos móvel e fixo do disjuntor, surge no interior da câmara de vácuo uma descarga de arco voltaico, o qual ocorre por meio dos vapores metálicos liberado das superfícies dos contatos, permitindo a continuidade do fluxo de corrente. A corrente flui neste plasma metálico até sua primeira passagem pelo ponto zero natural da senóide, onde o arco extingue-se na proximidade deste ponto. O vapor metálico condensa em poucos segundos depositando-se sobre as superfícies metálicas dos contatos de onde foi liberado, o dielétrico entre os contatos fixo e móvel é reconstituído, inibindo a reignição do arco [17].

O plasma metálico no interior da câmara a vácuo tem elevada condutibilidade, resultando em uma tensão de arco pequena com valores compreendidos entre 50V a 200V [17], associado a duração curta do arco, 10ms, a energia liberada é pequena, explicando a elevada vida útil dos contatos.

O disjuntor à vácuo apresenta como principais vantagens para utilização nos sistemas elétricos do FPSO; a suas dimensões reduzidas, curto tempo de arco para qualquer capacidade de interrupção, não apresentarem risco de incêndio, são capazes de executar religamentos rápidos e sofrem o mínimo de desgaste, ou seja, apresentam capacidade de realizar elevada quantidades de operações com um número mínimo de inspeções e manutenções a longo da sua vida útil [17, 18].

2.3.1. Efeito do Zero Atrasado em Disjuntores a Vácuo

Durante o processo de abertura dos contatos do disjuntor ocorre a formação de arcos elétricos entre os contatos do mesmo, sendo eliminados no instante da passagem por zero. O fenômeno do zero atrasado caracteriza-se pelo atraso da passagem da corrente pelo zero durante seu ciclo senoidal, se ocorrer durante a separação dos contatos, o arco será mantido por um instante de tempo maior no interior da câmara liberando uma maior quantidade de energia, a qual poderá comprometer a integridade física do disjuntor e do painel.

Os disjuntores a vácuo não são construídos para operarem sobre corrente de arco durante um tempo elevado. O tempo máximo que o disjuntor suporta o arco dependerá de cada fabricante e da tecnologia empregada [1]. Em [10] são apresentados testes de laboratório em que disjuntores são submetidos a arco, devido a zeros atrasados, entre os seus contatos por um intervalo de tempo de 47ms sem a ocorrência de danos ao equipamento.

Conforme mencionado em [1, 10, 17] durante a separação dos contatos do disjuntor e na formação do arco surge uma tensão nos terminais dos contatos, cujo valor médio está entre 100 V a 150 V. O surgimento da tensão resulta numa resistência inserida entre os contatos, denominada resistência de arco, que altera a relação X/R do sistema.

Para o estudo do efeito da resistência de arco, será considerada a inclusão de uma resistência de arco durante um curto-circuito nos terminais do gerador. Para o cálculo da resistência de arco a ser introduzida na simulação, consideraremos uma tensão de arco de 100 V e uma corrente de curto-circuito de 9 kA:

$$R_a = \frac{100V}{9000A} = 11,1 \text{ m}\Omega \quad (27)$$

Em [1] é mencionado que a resistência de arco apresenta um comportamento não linear. Para os disjuntores à vácuo de média tensão utilizados nas unidades offshore, o valor da resistência de arco esperado varia em torno de 2 a 3 mΩ [1]. Para a simulação do efeito do arco foi considerado o tempo de processamento do relé digital mais o tempo de abertura do disjuntor sendo igual a 63 ms. Na Figura 5 são apresentadas três curvas da corrente de curto-circuito simuladas em uma das fases no terminal do gerador, a curva em azul representa o curto-circuito sem considerar a resistência de arco, a curva em vermelho representa o curto-circuito com uma resistência de arco de 3 mΩ e a curva em verde representa o curto-circuito com uma resistência de arco de 11,1 mΩ.

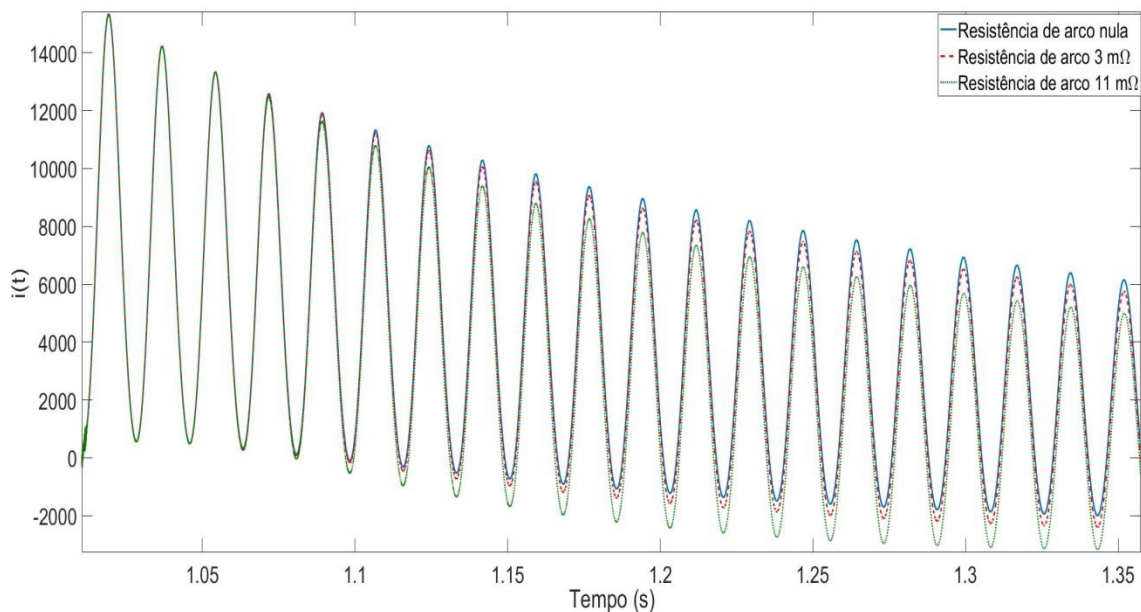


Figura 5 - Comparativo das correntes de curto com e sem resistência de arco.

Observa-se na Figura 5 que a introdução da resistência de arco no circuito atua diminuindo o valor da relação X/R do sistema, consequentemente a constante de tempo da componente contínua T_a é amortecida e a corrente cruza o ponto zero da senóide rapidamente.

A diminuição da relação X/R do sistema no instante do curto-circuito é uma das alternativas para lidar com o problema de zero atrasado em disjuntores, conforme visto na Figura 5. Disjuntores a SF6 possuem resistência de arco elevada, devido ao processo de resfriamento e alongamento do arco durante a extinção, porém não são compactos o suficiente para aplicações em subestações com restrições de peso e volume [17, 18].

2.4. ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico é uma descarga de corrente entre dois pontos de potenciais diferentes pelo rompimento do dielétrico que o separam, também ocorre pela interrupção de corrente pela separação dos polos do disjuntor. Podemos citar as principais características de uma falta por arco [14]:

- As faltas por arco são descontínuas e intermitentes com características resistivas;
- O valor da corrente de arco é menor que o valor de um curto-circuito trifásico;
- Atinge temperaturas médias de 4.500°C, podendo atingir 20.000°C (4 vezes a temperatura da superfície do sol);
- A luminosidade emitida pelo arco pode chegar a 60.000 Lux (200 vezes a luminosidade de um escritório);
- Gera elevada pressão interna, podendo explodir o painel, danificando toda coluna em que ocorreu arco, derretendo os componentes e cabos internos da coluna;

Nota-se que os principais efeitos do arco são a temperatura e a pressão. A elevação de pressão é gerada pela rápida elevação de temperatura que promove a expansão instantânea do ar, deslocando o rapidamente, tendo atuação semelhante a um explosivo. Podemos calcular a pressão do arco pela equação (2.4.1) [14]:

$$P_a = \frac{2.N.V.I.t.10^5}{Vol}. \quad (28)$$

Onde P_a é a pressão do arco em Pascal, N é o número de arcos, I corrente do arco em kA, V é a tensão do arco, t é o tempo do arco em segundos e Vol é o volume do compartimento em m³.

O cálculo do valor da corrente de arco é efetuado através de equações fornecidas em [19], uma vez que a teoria fasorial não é aplicável, devido a natureza descontínua da corrente de arco:

- Condições de contorno $V_n < 1000V$ e $700A < I_b < 106kA$

$$I_a = 10^{[k+0,662.\log(I_b)+0,0966.V+0,000526.G+0,5588.V.\log(I_b)-0,00304.G.\log(I_b)]}. \quad (29)$$

- Condições de contorno $V_n > 1000V$ e $700A < I_b < 106kA$

$$I_a = 10^{[0,00402+0,983.\log(I_b)]}. \quad (30)$$

Onde I_a é o valor da corrente de arco, I_b é o valor da corrente de falta trifásica, k é um fator da configuração da gaveta ($k = -0,153$ na configuração fechada; $k = -0,097$ na configuração aberta), V é a tensão entre fases da barra e G é o espaçamento da barra em mm.

A metodologia para o cálculo da energia incidente é definida em [19], baseada em ensaios com diversos equipamentos, sendo definidos dois valores padrões para o ensaio: tempo de atuação da proteção 200ms e distância do operador ao arco elétrico 610mm. A energia incidente normalizada é obtida da equação:

$$E_N = 10^{[K_1+K_2+1,081.\log(I_a)+0,0011.G]}. \quad (31)$$

Onde $K_1 = -0,792$ na configuração aberta, $K_1 = -0,555$ na configuração fechada, $K_2 = 0$ em sistemas isolados ou aterrados por alta impedância, $K_2 = -0,113$ em sistemas solidamente aterrados ou aterrados por baixa impedância. A energia incidente real é obtida da normalizada e apresentada na equação (32):

$$E = 4,184. C_f. E_N. \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (32)$$

Onde C_f é uma constante definida em [19], sendo igual a 1 para tensões maiores que 1 kV e 1,5 para tensões menores que 1 kV e D é a distância do arco elétrico em mm.

3. LIMITADORES DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Os limitadores de corrente de curto-circuito (LCC) têm a finalidade de interromper e/ou limitar a corrente de curto-circuito, evitando a superação da capacidade nominal dos equipamentos presentes na instalação, como por exemplo, disjuntores e painéis. Em alguns projetos de FPSO são especificados painéis com níveis de curto simétrico em 50kA e de pico assimétrico de 130kA, onde são utilizados limitadores para reduzir o nível da corrente e atender a essas especificações.

As principais características de um LCC são elencadas abaixo [20]:

- Baixa impedância para operação normal;
- Alta impedância durante curto-circuito.
- Transição rápida do regime normal para condição de curto;
- Rápida recuperação após a interrupção do defeito;
- Alta confiabilidade por longos períodos, atuar somente durante curtos-circuitos ou quando solicitado;

Conforme mencionado em [2, 3, 15] existem diversas tecnologias e configurações aplicadas em LCCs, as principais utilizadas comercialmente são: Reatores Limitadores de Núcleo de Ar, Dispositivo Pirotécnico, FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), Dispositivos Controladores de Potência Interfases (*IPC – Interphase Power Controllers*), Disjuntores de Estado Sólido e Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores (*SFCL – Superconductor Fault Current Limiter*).

Nesta seção a revisão bibliográfica estará limitada ao dispositivo pirotécnico e o limitador supercondutor de corrente de curto-circuito (*SFCL – Superconductor Fault Current Limiter*). A escolha de limitar a esses dois equipamentos é que o primeiro é aplicado atualmente nos sistemas elétricos dos FPSOs. O SFCL é utilizado neste trabalho como uma alternativa mais eficiente e com melhor desempenho na limitação das correntes de curto-circuito quando comparados aos dispositivos pirotécnicos.

3.1. DISPOSITIVOS PIROTÉCNICOS LIMITADORES DE CURTO

A utilização de dispositivos pirotécnicos surgiu com uma alternativa aos reatores de núcleo de ar na limitação das correntes de curto-circuito. O uso de reatores em sistemas elétricos introduz uma impedância que limita a corrente de curto, porém adiciona desvantagens como perdas por efeito Joule e queda de tensão no sistema durante a partida de motores. A utilização de dispositivo pirotécnico elimina as desvantagens supracitadas, pois atua como um condutor de baixa impedância em

condições normais, e em caso de curto-circuito limita a corrente em seu primeiro ciclo. Podemos listar algumas de suas vantagens:

- Baixa perda de energia;
- Baixa queda de tensão;
- Redução da impedância da rede (transformadores ou geração em paralelo com o dispositivo pirotécnico conectando as duas barras);
- Limitação da corrente de curto no primeiro ciclo.

O princípio de funcionamento pode ser exemplificado pela Figura 6, na qual está representado um sistema elétrico com dois transformadores em paralelo em que suas semibarras são conectadas pelo dispositivo pirotécnico limitador. No exemplo da Figura 6 tem-se que o painel é certificado para 50kA e cada transformador contribui com uma corrente de curto de 40kA.

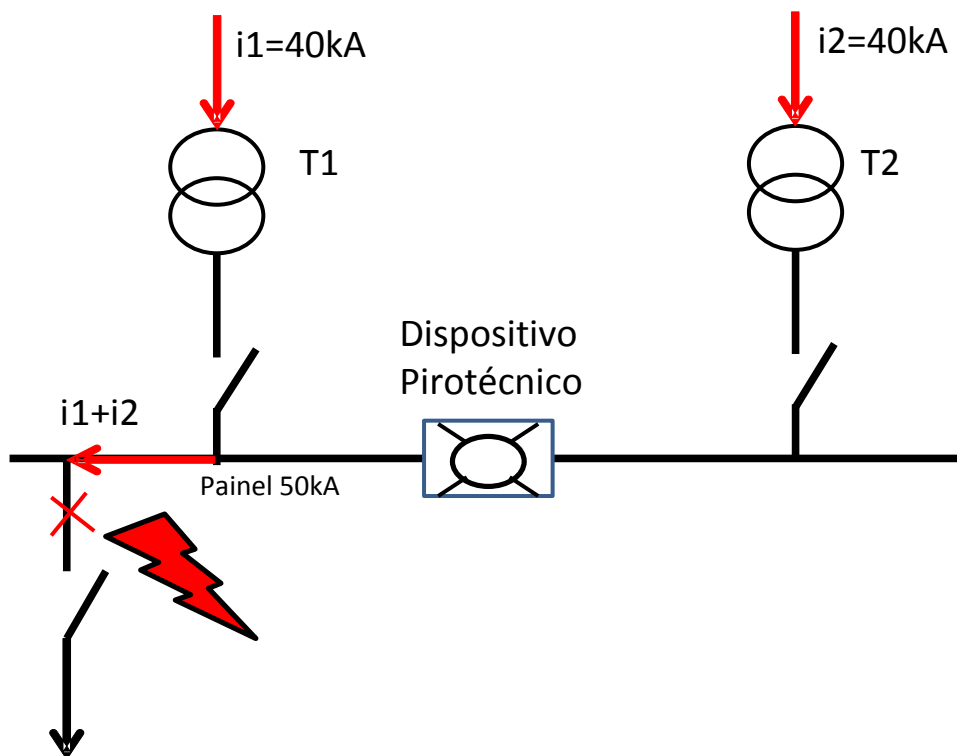


Figura 6 - Exemplo de aplicação de dispositivo pirotécnico durante o curto-circuito.

A corrente de falta é a soma das contribuições dos dois transformadores podendo atingir o valor de 80kA, o qual supera a capacidade do painel, porém o limitador atua no primeiro ciclo de corrente, isolando a contribuição de i_2 para o curto e limitando-a em 40kA. Na Figura 7 observa-se o comportamento da corrente no ponto de defeito no instante de atuação do dispositivo pirotécnico.

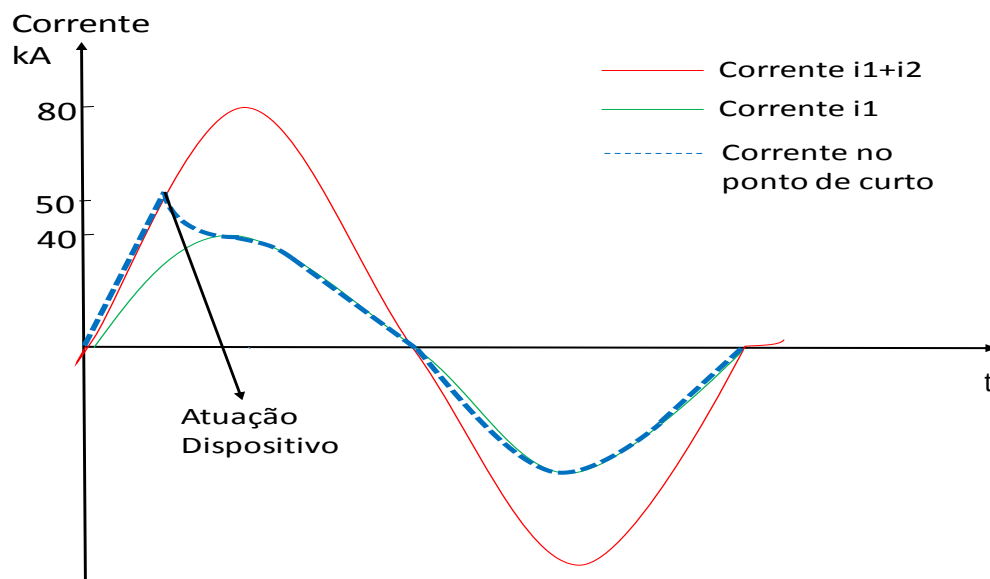


Figura 7 - Representação das correntes de curto e a atuação do dispositivo pirotécnico.

A corrente de curto no instante de atuação do dispositivo pirotécnico atinge o valor de 50 kA, sem a presença do dispositivo a corrente poderia atingir até 80 kA, superando a capacidade e certificação do painel. Após a atuação do dispositivo as semibarras operam isoladamente adicionando uma restrição operacional, o sistema retornará a sua normalidade após a substituição do limitador.

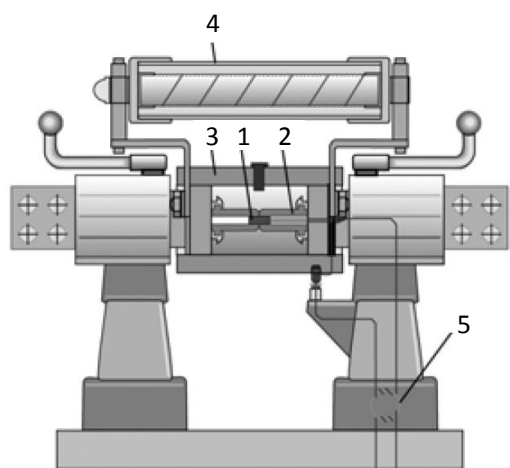
3.1.1. Princípio de Funcionamento

O dispositivo pirotécnico consiste basicamente dos seguintes componentes: duas câmaras em paralelo (condutor principal e a câmara fusível), transformador de corrente, transformador de pulso e sistema de medição e proteção, denominado circuito de disparo, conforme pode ser observado na Figura 8. A câmara principal consiste de um material condutor, responsável pela condução da corrente de operação do circuito, em que é estrangulado em ou mais pontos onde são instaladas cargas explosivas, cujo objetivo após o seu acionamento é a ruptura do condutor principal [21].

Em operação normal, a corrente circulará apenas pelo condutor principal, em caso de defeito, o circuito de disparo envia um pulso para carga explosiva através do transformador de pulso ocasionando a ignição e rompimento do condutor principal, assim a corrente é direcionada para segunda câmara que é composta por um elemento fusível, onde é finalmente interrompida. Na Figura 9 é representada a sequência de ações durante a atuação do dispositivo durante um curto-circuito.

O dispositivo pirotécnico opera associado a disjuntores ou chaves seccionadoras, quando percorrido por correntes inferiores ao valor ajustado no circuito de disparo, o

limitador não atua e a eliminação do defeito é realizada pelos disjuntores ou chaves seccionadoras. Quando o sistema é submetido a correntes superiores aos valores configurados no circuito de disparo, o limitador pirotécnico atua no primeiro ciclo do pico de corrente. O valor de ajuste é definido pela capacidade máxima de suportabilidade dos equipamentos da instalação [21].



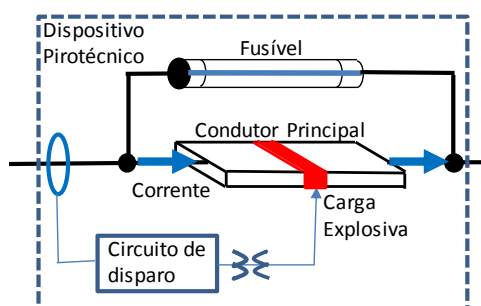
1- Carga Explosiva; 2- Condutor Principal;
3- Tubo isolante; 4- Fusível; 5- Transformador de Pulso

a)

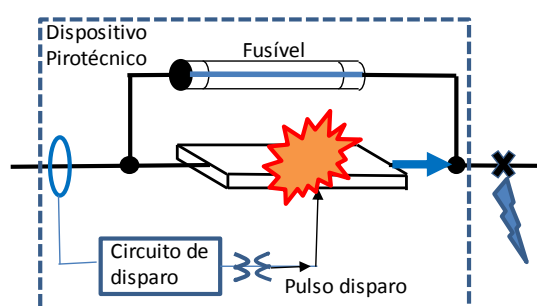


b)

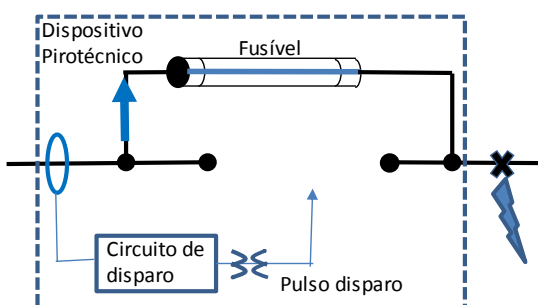
Figura 8 - a) Principais componentes do dispositivo pirotécnico. b) fotografia do dispositivo instalado no painel.



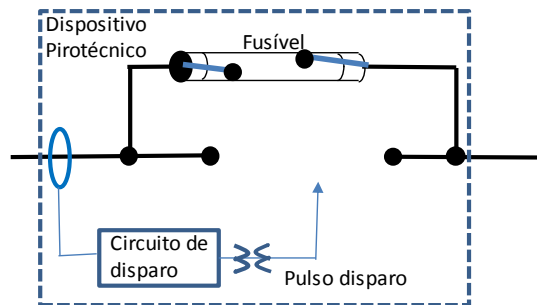
a) Operação normal, condução de corrente pelo condutor principal.



b) Curto-circuito, sensibilização da proteção – pulso disparado e acionamento da carga explosiva.



c) Corrente desviada para o fusível e sensibilização do elo fusível.



d) Rompimento do elo fusível e interrupção da corrente.

Figura 9 - Demonstração de atuação do dispositivo pirotécnico.

A principal desvantagem deste dispositivo é observada após a sua atuação, pois ocorre o seccionamento do circuito, sendo necessária a substituição das câmaras, conhecidas como “inserto”, composto pela câmara do condutor principal e a câmara do fusível, para o retorno da operação normal do sistema. Esta desvantagem é uma limitação técnica desse equipamento, pois representa uma restrição operacional ou até mesmo pode ocasionar perda de produção até a substituição do inserto.

3.2. LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SUPERCONDUTOR

Os materiais supercondutores são basicamente materiais que possuem resistividade nula abaixo de uma determinada temperatura, denominada temperatura crítica, e acima apresentam um comportamento resistivo. O desenvolvimento de supercondutores de alta temperatura crítica (YBCO e BSSCO) possibilitou a aplicação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito em sistemas de energia comerciais e industriais. O limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo (LCCSR) apresenta características que o torna como uma solução potencial para aplicações em subestações de geração de energia e em sistemas de distribuição comercial e industrial. As principais características são listadas a seguir:

- Em condição normal de operação apresentam resistência desprezível, não contribui para a queda de tensão durante a partida de motores e energização de transformador;
- Em condições de curto-circuito, o valor da resistência aumenta rapidamente em menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo, contribuindo na limitação do curto;
- Sistema de atuação independente, pois sua operação independe de comandos externos, estando associado à característica intrínseca do comportamento do material de transitar do estado supercondutor para o normal, limitando atuações espúrias;
- Tempo de recuperação em torno de alguns segundos [44] e sem necessidade de substituição de componentes, como ocorre para o dispositivo “*Is-limiter*”, o que reduz o tempo de indisponibilidade do sistema de energia;

3.2.1. Apresentação fenomenológica da Supercondutividade

Georg Bednorz e Alex Muller descobriram a supercondutividade para o composto cerâmico (LaBaCuO) com T_c entre 30 e 40 K, dando início a pesquisas e desenvolvimentos dos cupratos. Novos materiais supercondutores foram encontrados,

com evolução da temperatura crítica, denominados supercondutores de alta temperatura (HTS – *High Temperature Superconductor*) [4].

Atualmente existem supercondutores com temperatura crítica superior a 130 K [15]. Os supercondutores podem ser classificados como do Tipo I e do Tipo II. Os supercondutores do Tipo I apresentam corrente crítica J_C baixa e são formados por metais e algumas ligas. Possuindo temperatura crítica T_C extremamente baixa, que, segundo a teoria BCS, seria necessário para diminuir as vibrações dos átomos do cristal e permitir o fluxo sem dificuldades dos elétrons pelo material. Os materiais supercondutores do tipo II são formados por ligas metálicas e materiais cerâmicos, geralmente possuindo temperaturas críticas maiores que os do tipo I. Referências para os estudos de supercondutividade e supercondutores do tipo I e tipo II podem ser encontrados em [22]. A Figura 10 apresenta o diagrama de fases dos materiais supercondutores tipo II.

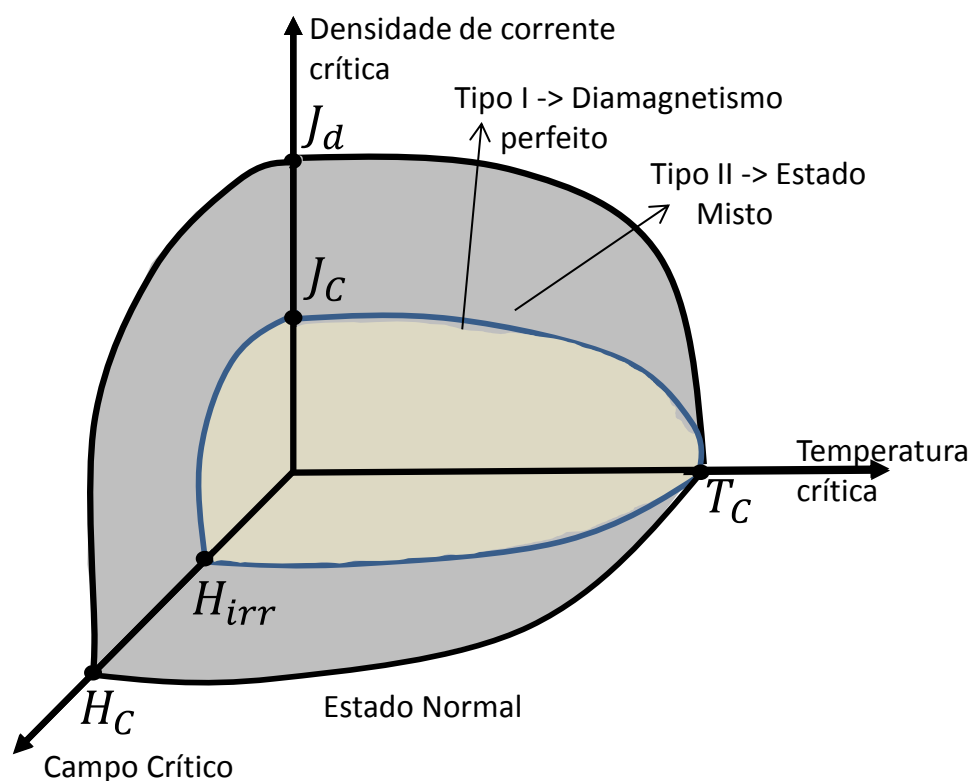


Figura 10 - Diagrama de fases para supercondutores tipo II.

Os materiais tipo II apresentam duas regiões distintas de operação; na região delimitada pelo volume dos contornos de H_{irr} , J_c e T_c , o material apresenta comportamento similar aos supercondutores do tipo I, excluindo totalmente o fluxo magnético do seu interior. Caso o supercondutor esteja operando na região dentro do volume delimitado pelos pontos H_{irr} , H_c , J_c , J_d e T_c , o material encontra-se no estado

misto. Neste estado é possível coexistir regiões diamagnéticas com outras onde há penetração quântica do fluxo magnético no interior do material, estas que são denominadas vórtices ou fluxóides.

A evolução tecnológica dos materiais supercondutores do tipo II permitiu sua aplicação em áreas da engenharia elétrica em função dos maiores valores de densidade de campo crítico (B_C), temperatura crítica (T_C) e densidade de corrente crítica (J_C). Atualmente destacam-se dois tipos de supercondutores de alta temperatura, sendo estes compostos por óxido de cobre do tipo cerâmico; O BSCCO ($Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ -> Bi2212 com temperatura crítica de 90 K ou $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ -> Bi2213 com temperatura crítica de 110 K), e o YBCO ($YBa_2Cu_3O_7$ com temperatura crítica de 91 K) [2, 3]. Os compostos óxidos de cobre do tipo cerâmico, como BSCCO e YBCO, são supercondutores com T_C acima de 77 K, o que permite a utilização do nitrogênio líquido na refrigeração do supercondutor, reduzindo os custos operacionais quando comparados com o Hélio.

Quanto aos materiais comerciais, as fitas supercondutoras fabricadas com BSCCO são conhecidas como fitas de primeira geração (1G), possuindo o elemento prata em 70% da sua composição [3]. A resistividade da prata em estado normal é baixa, não sendo as mais indicadas para aplicações de limitação de curto-circuito. Além disso, devido a grande quantidade de matriz de prata utilizada na fabricação de fitas 1G, que não permitem a futura redução de custos quando produzidos em larga escala, se comparadas com as fitas de segunda geração (2G – HTS).

As fitas de 2G fabricadas com YBCO utilizam elementos de terras raras em sua composição que permitem sua aplicação para altos campos magnéticos ($> 2T$). Além disso, possui maior corrente crítica e sua estrutura permite fabricação de fitas com maiores comprimentos contínuos [23, 24]. Devido, a seu melhor desempenho para correntes maiores, as fitas 2G em YBCO foram escolhidas para a modelagem do Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo neste trabalho.

3.2.2. Limitadores de Corrente de Curto Supercondutores Resistivos (R-SFCL)

Os limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores resistivos (R-SFCL) apresentam como característica principal, impedância desprezível em condição normal de operação, e quando submetidos a corrente de curto-circuito introduzem uma impedância adicional no sistema elétrico. Durante o curto-circuito, a corrente e a temperatura no elemento supercondutor aumentam rapidamente superando seus valores críticos, tornando-o um condutor normal apresentando um valor considerável

de resistividade. Na Figura 11 é ilustrada um elemento supercondutor conectado em série com o sistema elétrico e refrigerado por um sistema criogênico.

As vantagens da aplicação de limitadores de curto-circuito supercondutores baseados em fitas 2G HTS são: a disponibilidade de dispositivos testados comercialmente em níveis de tensão e corrente típicos aos utilizados em sistemas elétricos de distribuição de uma FPSO; configuração mais compacta, resultando em redução de tamanho e peso, em relação a outras tecnologias de limitadores; impedância praticamente nula em condição normal de operação, porém durante o curto-circuito adiciona uma resistência em série no circuito [2, 3, 4].

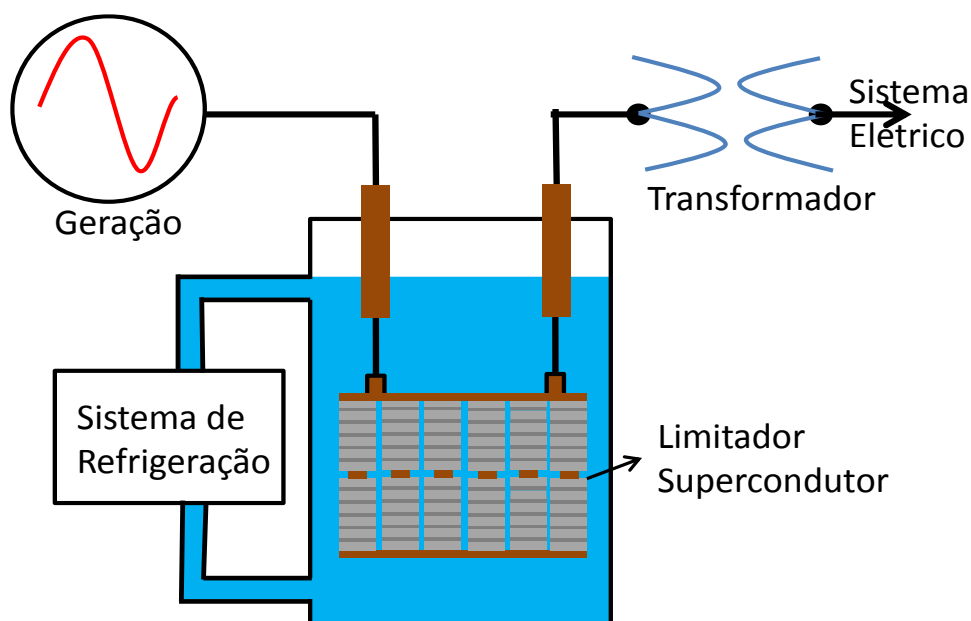


Figura 11 - Ilustração do supercondutor aplicado ao sistema elétrico. Adaptada de [16].

A principal característica deste dispositivo para aplicações de curto-circuito em sistemas industriais baseia-se no seu princípio de funcionamento. O R-SFCL insere um valor considerável de resistência em série com o circuito durante um curto, diminuindo a relação X/R do sistema, consequentemente reduz a assimetria da corrente, reduzindo o valor de pico e a possibilidade de surgimento do fenômeno de DCZ. Consequentemente, os sistemas industriais e comerciais apresentarão valores menores de corrente de pico de curto-circuito, acarretando na especificação de disjuntores, cabos, barramentos, transformadores e painéis com menor capacidade de suportabilidade ao curto, resultando em menor tamanho, peso e custo.

A desvantagem deste dispositivo é intrínseca ao seu princípio de funcionamento, o R-SFCL é um equipamento conectado em série com o circuito, a corrente oriunda do ambiente externo (temperatura ambiente) percorre o limitador (temperatura nitrogênio), resultando em perdas térmicas [4].

Os pontos quentes no material supercondutor podem ocorrer devido a grande extensão da fita utilizada na concepção do módulo R-SFCL. Dessa forma, existe a possibilidade do material apresentar não homogeneidades, acarretando em uma transição não uniforme no supercondutor. Nos segmentos em que ocorreu a transição para o estado normal antes dos demais ocorre o superaquecimento do material (*hot spots*), pois a corrente irá circular pelo material no estado normal, o qual apresenta um valor de resistência e surgirá o aquecimento do condutor por efeito Joule [3].

Para minimizar a possibilidade de ocorrência do evento de *hot spots*, os projetistas de R-SFCL incluem uma fina camada de material (resistência shunt) conectada eletricamente em paralelo a fita supercondutora. A resistência shunt é responsável por desviar parte da corrente de curto do supercondutor, atuando também na limitação do seu valor. A utilização do shunt permite um caminho alternativo para a corrente, com objetivo de evitar danos no material supercondutor e no próprio R-SFCL por aquecimento durante o evento de curto-circuito [2]. A Figura 12 apresenta o funcionamento do elemento shunt durante o aparecimento de pontos quentes no supercondutor.

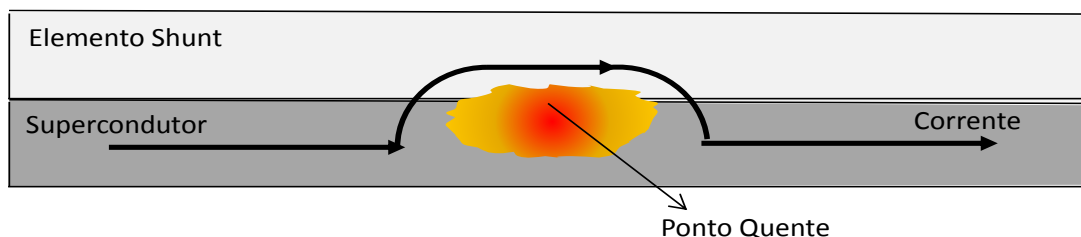


Figura 12 - Representação do desempenho do elemento shunt no supercondutor.

3.2.3. Princípio de Funcionamento

Uma característica de grande relevância do R-SFCL é o fato do mecanismo de atuação do dispositivo estar associado à própria natureza de funcionamento do material supercondutor. Quando o R-SFCL é percorrido por uma corrente maior que a corrente crítica I_c , e a temperatura maior que a T_c , o material passa do estado supercondutor para estado normal. Nesta condição, o material se torna um condutor resistivo e passa a apresentar resistência elétrica. Como o R-SFCL tem um aumento abrupto de sua resistividade elétrica, é como se uma impedância série surgisse no sistema. O material, agora resistivo, passa a apresentar perdas por efeito Joule que o fazem aquecer, levando a um aumento em cascata da temperatura e resistividade. Após a transição, a corrente do material supercondutor deve ser desviada assim que ocorrer a transição de fase, para que ele não queime. Por este motivo deve ser

inserido um elemento *shunt*. Após alguns ciclos, a corrente deve ser extinta, para que não haja queima do supercondutor.

Como o R-SFCL tem atuação independente, associado apenas à característica intrínseca do dispositivo, possibilitando assim, uma operação a prova de falha e sem necessidade de interface com acionamentos eletrônicos [25]. O dispositivo limitador supercondutor atua limitando o valor de corrente de pico de curto-circuito, porém é o sistema de proteção, composto por disjuntores e IEDs, os responsáveis por extinguir a corrente. O tempo necessário de resfriamento do material para o retorno ao estado supercondutor é denominado como tempo de recuperação. Para o YBCO, o material retorna ao estado supercondutor para temperaturas menores que 92 K [26, 27].

Na Figura 13 é ilustrado as formas de onda de curto-circuito considerando a aplicação do R-SFCL (corrente limitada) e aquele que haveria se o limitador de corrente não estivesse presente (corrente prospectiva). Observa-se o efeito da redução na corrente de pico de curto com a aplicação do R-SFCL, devido à inserção de uma resistência em série com o circuito elétrico. O limitador supercondutor atua em menos de $\frac{1}{4}$ de ciclo na ocorrência de um curto-circuito.

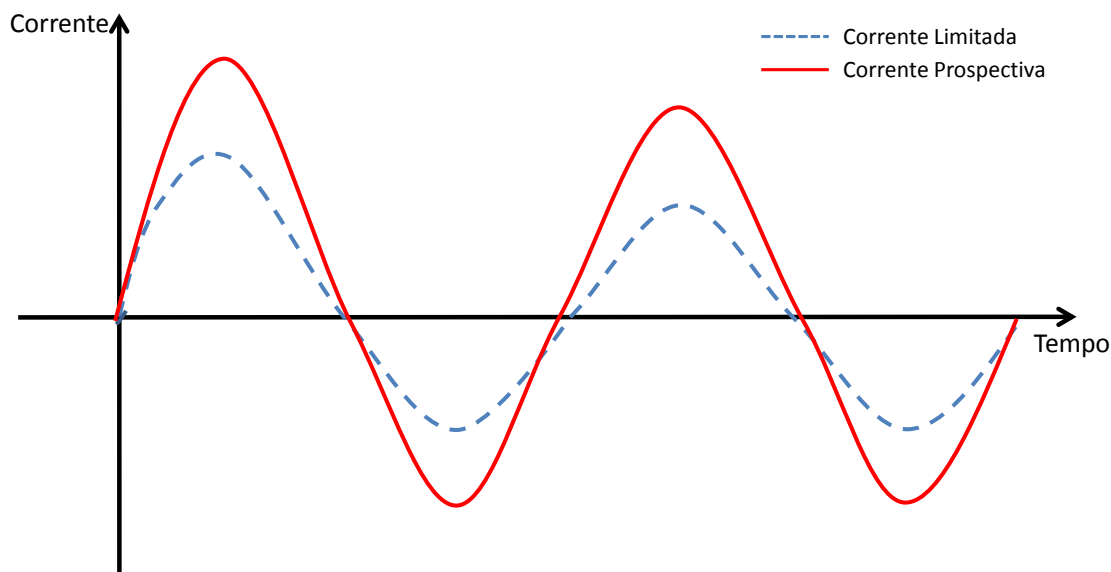


Figura 13 - Formas de onda de curto-circuito prospectiva e limitada. Adaptada de [3].

3.2.3.1. Curva E-J Supercondutores Tipo II

Conforme mencionado na literatura [5, 25, 28, 29] o comportamento dinâmico do R-SFCL está diretamente relacionado à curva E-J do material supercondutor, considerando que não exista campo magnético externo aplicado, o campo elétrico no

material é definido em função da densidade de corrente e temperatura, conforme equação (33):

$$E(J_{sp}, T_{sp}) = E_c \left[\frac{J_{sp}}{J_c(T_{sp})} \right]^n. \quad (33)$$

Na qual E é o campo elétrico no material, E_c é o campo elétrico crítico, J_{sp} é a densidade de corrente instantânea em A/m^2 , $J_c(T_{sp})$ é a densidade de corrente crítica em função da temperatura no supercondutor (T_{sp}). Se a temperatura T_{sp} aumenta, o valor de J_c diminui e consequentemente o campo elétrico aumenta. O valor da variável $J_c(T_{sp})$ é calculado pela equação (34), sendo valida apenas para a seguinte faixa de operação: $77\text{ K} < T_{sp} < T_c$:

$$J_c(T_{sp}) = J_c(T_N) \left[\frac{T_c - T_{sp}}{T_c - T_N} \right]. \quad (34)$$

Onde as variáveis $J_c(T_N)$ é a densidade crítica em A/m^2 na temperatura de equilíbrio do nitrogênio líquido (77 K), representado na equação (34) por T_N , por fim T_c é a temperatura crítica no supercondutor.

Na equação (33) o expoente n é denominado parâmetro de transição, cujo valor varia amplamente para o tipo de material, como também para o estágio de transição, existe três estágios no material supercondutor, denominados *flux creep*, *flux flow* e estado normal, em que para cada um desses n assume um valor definido [4]. A Figura 14 ilustra a curva que representa o comportamento $E - J$ do material supercondutor para diferentes valores de temperatura de operação.

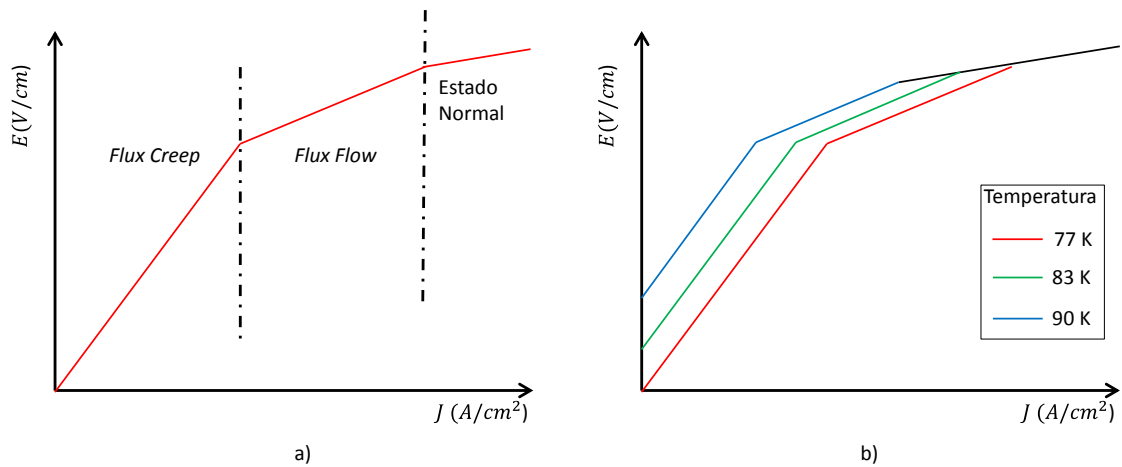


Figura 14 - a) Curva E - J mostrando os três estágios de transição. b) dependência do campo elétrico com a temperatura (Escala logarítmica). Adaptada de [5].

Conforme mencionado em [3, 4], o expoente n para as fitas 2G de YBCO pode assumir valores entre 20 e 30 no regime *Flux Creep*, para o estágio *Flux Flow* pode apresentar valores entre 2 e 5, e no estado normal apresentam um comportamento linear entre campo elétrico e densidade de corrente, assim n é igual a 1. Conforme [2, 4], a relação entre resistividade e campo elétrico é apresentada na equação (35):

$$\rho(J_{sp}, T_{sp}) = \left| \frac{E(J_{sp}, T_{sp})}{J_c(T_{sp})} \right|. \quad (35)$$

Onde $\rho(J_{sp}, T_{sp})$ é a resistividade do material ($\Omega.m$) em função da temperatura e densidade de corrente no condutor. A temperatura dependerá do aquecimento por efeito Joule devido a passagem de corrente pelo material e a troca de calor com as outras camadas do dispositivo e o fluido criogênico. Tais trocas de calor, assim como o cálculo da resistividade e a modelagem do limitador supercondutor resistivo será tratado na seção 4, onde será apresentada a modelagem do equipamento pela teoria da analogia eletrotérmica.

4. MODELAGEM DO LIMITADOR SUPERCONDUTOR R-SFCL

Os limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores resistivos (R-SFCL) construídos com fitas 2G representam uma das tecnologias com maior potencial para aplicação em larga escala no sistema elétrico [2, 4, 24, 30, 31]. Apresentam vantagens operacionais comparativamente a outras tecnologias de limitadores de curto, destacando-se por maior redução do primeiro pico, menor peso e menor tempo de recuperação. Porém, antes da instalação e aplicação em campo são necessários diversos estudos com objetivo de avaliar seu impacto no sistema elétrico, também como sua efetividade na limitação da corrente de curto-circuito [4, 24, 30].

Neste capítulo serão descritos as características e aspectos construtivos do R-SFCL, será apresentado a analogia eletrotérmica e a modelagem do dispositivo para utilização em programas de simulação do sistema elétrico.

4.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO R-SFCL

Os limitadores de corrente de curto-circuito resistivo (R-SFCL) baseado em supercondutores apresentam diferentes formatos construtivos e arranjos para aplicação em sistemas elétricos, destacam-se como suas principais características; a topologia simples, baixo peso e volume do equipamento quando comparados a outros limitadores [26, 31]. Adicionalmente, o R-SFCL possui impedância desprezível em operação normal, esta que aumenta rapidamente durante o curto-circuito.

Os R-SFCL podem vir a apresentar diferentes topologias e formatos construtivos, como por exemplo; barra, espiral, tubo maciço e bobina panqueca. Os primeiros materiais supercondutores utilizados nos limitadores de corrente de curto-circuito são Bi-2212 no formato de tubo maciço. Atualmente, são utilizados fitas de segunda geração (2G) baseadas no material supercondutor YBCO [4].

O modelo de limitador utilizado nas simulações deste trabalho é similar ao aplicado no projeto ENSYTROB [3, 5, 32]. Este limitador foi projetado, construído e instalado em uma subestação na Alemanha para aplicação em média tensão. [32]

A fita 2G modelada neste trabalho apresenta como características principais: corrente crítica de 275 A na temperatura de 77 K, temperatura crítica de 92 K, comprimento de 4,3 m, 12 mm de largura e tempo máximo de condução de corrente de curto de 120 a 150 ms [5, 32]. Cada fita possui seção transversal composta por 5 camadas: revestimento externo de prata (topo e fundo), substrato de Hasteloy, camadas *buffer* e o material supercondutor YBCO, conforme ilustrado na Figura 15.

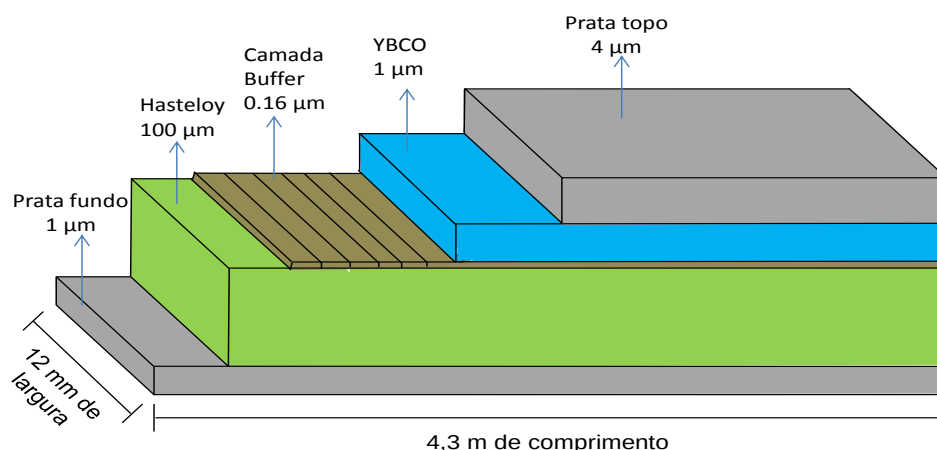


Figura 15 – Representação das camadas da fita 2G HTS YBCO.

A prata é responsável pela estabilização térmica e proteção mecânica da camada supercondutora, o substrato de Hasteloy é responsável por minimizar os esforços mecânicos originários da dilatação térmica. A camada Buffer melhora a aderência do material supercondutor YBCO ao substrato, e por fim, o supercondutor é responsável pela condução de corrente sem resistência em operação normal do sistema elétrico. A Tabela 2 resume os principais parâmetros e dimensões da fita.

Tabela 2 - Principais parâmetros da fita 2G.

Variável	Descrição	Valor
I_c	Corrente crítica do material supercondutor a 77 K	275 A
T_c	Temperatura crítica do YBCO	92 K
L_{fita}	Comprimento do supercondutor por fita	4,30 m
p_{fita}	Largura da fita 2G	12 mm
e_{pt}	Espessura da camada de prata superior	4 µm
e_{YBCO}	Espessura da camada de YBCO	1 µm
e_h	Espessura da camada de Hasteloy	100 µm
e_f	Espessura da camada prata inferior	1 µm
p_{shunt}	Largura do shunt	120 mm
e_{shunt}	Espessura do shunt	2,4 mm
L_{shunt}	Comprimento do shunt	12 m
n_s	número de fitas shunt	1
n_p	Número de fitas 2G em paralelo	4

Cada módulo do componente supercondutor do R-SFCL é composto por oito fitas 2G de 4,3 metros de comprimento. Cada módulo é formado por oito fitas supercondutoras dispostas em pares e enroladas em espiral com o formato similar a uma bobina plana, conforme apresentado na Figura 16. Sendo dois pares de fitas em paralelo na entrada conectados em série por meio de terminais de cobre por contato sob pressão (geralmente usando filme de índio) a dois pares de fitas em paralelo na saída [4, 5, 32]. Esse arranjo favorece a redução da indutância do dispositivo.

O módulo supercondutor é montado sobre as faces de uma placa de plástico reforçado com fibra de vidro (FRP do inglês, *Fiberglass reinforced plastic*) podendo ser projetados e conectados em diversos arranjos série e/ou paralelo para atender os requisitos de tensão e corrente do sistema elétrico em que será aplicado.

O módulo do elemento supercondutor do R-SFCL possui 8,6 metros de comprimento, corrente crítica e tensão nominal de 1100 A e 430 V (50 V/m máximo durante a passagem da corrente de curto), respectivamente [32]. A especificação da quantidade de módulos limitadores R-SFCL em série e/ou paralelo para a composição do limitador supercondutor dependerá das características de corrente e tensão requisitadas pela instalação [5, 32]. A Tabela 3 resume as principais características do módulo limitador supercondutor.

Tabela 3 - Especificação do módulo supercondutor da fita 2G.

Variável	Descrição	Valor
n_p	Número de fitas 2G em paralelo	4
n	Número total de fitas	8
$I_c(\text{módulo})$	Corrente crítica do material supercondutor a 77 K	1100 A
T_c	Temperatura crítica do YBCO	92 K
$L_{\text{Módulo}}$	Comprimento do módulo limitador	8,60 m
V_{RMS}/cm	Tensão suportável/m	50 V/m
$V_{RMS}(\text{Módulo})$	Tensão nominal do módulo	430 V

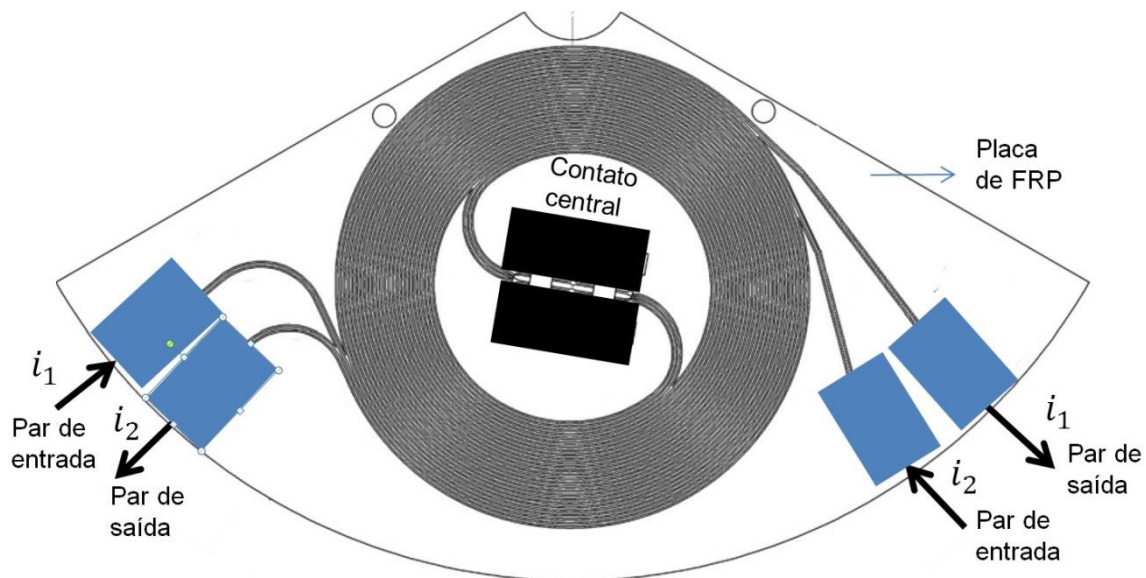


Figura 16 - Módulo do componente supercondutor(Projeto ENSYTROB). Adaptada de [5].

Elemento Shunt

Um arranjo de fitas de aço inoxidável em espiral é conectado eletricamente em paralelo com os elementos modulares de fitas supercondutoras, para derivar a corrente após a transição da fita 2G. Este arranjo é denominado de elemento *shunt*. Cada conjunto é montado sobre as faces de uma placa de FRP e conectados em paralelo formando o módulo do limitador. O elemento shunt é responsável pela condução e limitação da corrente durante o curto-circuito, desviando a do supercondutor quando em estado normal, evitando a queima da fita 2G por aquecimento excessivo [4].

4.2. ANALOGIA ELETROTÉRMICA

A modelagem do limitador com objetivo de representar o comportamento preciso de um dispositivo real deve levar em consideração as características da curva $E \times J$ do material supercondutor. Para aplicação prática dessa curva, e consequente determinação do comportamento dinâmico de um limitador supercondutor, deverá ser realizado o cálculo das trocas térmicas para a obtenção do valor instantâneo de temperatura de cada camada. O equacionamento das trocas térmicas que ocorrem entre as camadas é complexo, devido ao acoplamento das equações térmicas e elétricas que regem o comportamento dinâmico do dispositivo.

A analogia eletrotérmica é uma das alternativas para a modelagem das trocas térmicas entre as camadas do limitador, permitindo solucionar as equações de condução de calor de cada camada do R-SFCL, cuja solução baseia-se na analogia entre circuitos elétricos e térmicos. O método é simples e consegue reproduzir o

comportamento do limitador, sendo dividido na solução das variáveis elétricas e um circuito para resolução das variáveis térmicas [4]. Este método será aplicado na simulação dos R-SFCL modelado neste trabalho.

Na análise do circuito elétrico, o limitador é modelado como um grupo de resistências em paralelo. Os valores de resistência individual representam a resistência de cada camada da fita, esta que é uma função da temperatura. A variação da temperatura no tempo é obtida pela solução das equações do circuito eletrotérmico.

A solução é considerada acoplada, pois as saídas do circuito equivalente elétrico são utilizadas como dados de entrada no circuito elétrico térmico, e as saídas desse circuito utilizado como dados de entrada no equivalente elétrico [4].

4.2.1. Modelagem do Circuito Equivalente Elétrico

Conforme supracitado, o limitador é modelado como um grupo de resistências variáveis em paralelo, cada uma delas representa uma das camadas da fita 2G. O valor da resistência de cada camada da fita é diretamente proporcional à resistividade elétrica e ao comprimento total, e inversamente proporcional ao valor da área da seção transversal. A resistividade elétrica varia linearmente com a temperatura, com exceção do YBCO para temperaturas inferiores a temperatura crítica T_c , conforme destacado em [4]. A formulação das equações da resistividade de cada uma das camadas foram apresentadas em [3, 4] e são apresentadas nas equações (36), (37) e (38):

$$\rho_{prata} = -2,08 * 10^{-7} + 6,17 * 10^{-9} * T_{Prata} (\Omega.cm). \quad (36)$$

$$\rho_{Hasteloy} = -1,10 * 10^{-4} + 8,96 * 10^{-9} * T_{Hasteloy} (\Omega.cm) \quad (37)$$

$$\rho_{aço} = 1,19 * 10^{-4} - 7,53 * 10^{-5} * e^{-T_{aço}/647,11} (\Omega.cm). \quad (38)$$

Onde ρ_{Prata} , $\rho_{Hasteloy}$ e $\rho_{aço}$ representam respectivamente a resistividade da prata, do substrato de Hasteloy e do aço inox que compõe o shunt. O supercondutor YBCO para temperaturas maiores que T_c , comporta-se como um condutor normal e sua resistividade apresenta uma relação linear com a temperatura. No estado supercondutor, a temperatura do material é menor que T_c , a resistividade é dada através da curva $E \times J$ do material pela relação entre o campo elétrico e a densidade de corrente, conforme explicado na seção 3.

$$\rho_{YBCO(normal)} = -0,10 + 10^{-2}T_{YBCO} (\Omega.cm) \quad (39)$$

$$\rho_{YBCO(supercondutor)} = E/J_{sp} (\Omega.cm). \quad (40)$$

A resistência de cada camada pode ser obtida individualmente pela equação (41):

$$R_n = \rho_n * l_n / S_n (\Omega). \quad (41)$$

Onde $\rho_n(\Omega.m)$, $l_n(m)$, $S_n(m^2)$ são respectivamente, a resistividade, o comprimento e a seção transversal de cada camada. O cálculo da resistência elétrica da fita 2G é obtido pelo equivalente de quatro resistências em paralelos, e cada resistência individual corresponde a cada camada da fita, conforme ilustrado em Figura 17.

O módulo limitador supercondutor é configurado com 4 fitas em paralelo na entrada conectadas através de uma conexão central com mais 4 fitas em paralelo na saída. O elemento shunt é responsável por conduzir a corrente de curto-circuito após o supercondutor transitar para o estado normal evitando a degradação da fita por aquecimento [2]. O diagrama esquemático do equivalente elétrico do módulo limitador é apresentado na Figura 18.

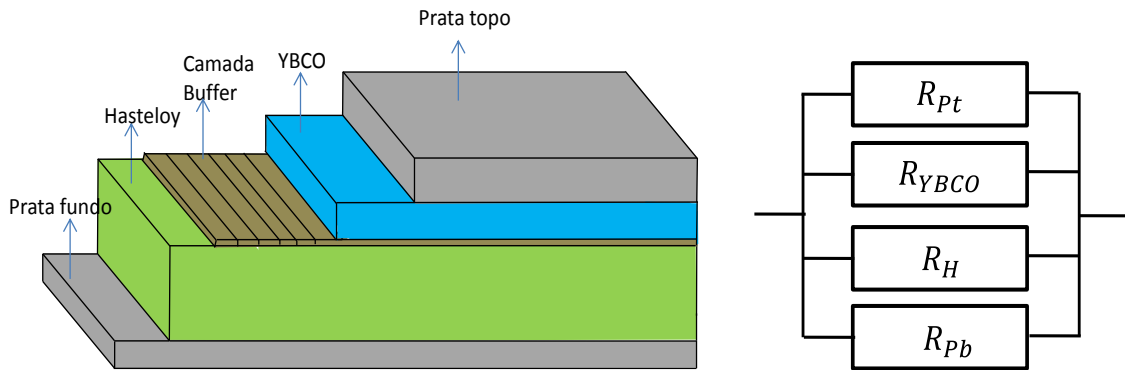


Figura 17 - Representação e equivalente elétrico de cada fita individual.

O cálculo da resistência equivalente da fita 2G, representada na Figura 17, é determinado pelo paralelismo das resistências de cada camada apresentado na equação:

$$\frac{1}{R_{fita}} = \frac{1}{R_{pt}} + \frac{1}{R_H} + \frac{1}{R_{YBCO}} + \frac{1}{R_{pb}}. \quad (42)$$

A resistência do módulo limitador é obtida pelo cálculo da resistência equivalente do circuito apresentado na Figura 18, o cálculo é ilustrado na equação:

$$\frac{1}{R_{\text{módulo}}} = \frac{1}{(R_{fita}/4) + (R_{fita}/4)} + \frac{1}{R_{shunt}} = \frac{2}{R_{fita}} + \frac{1}{R_{shunt}} . \quad (43)$$

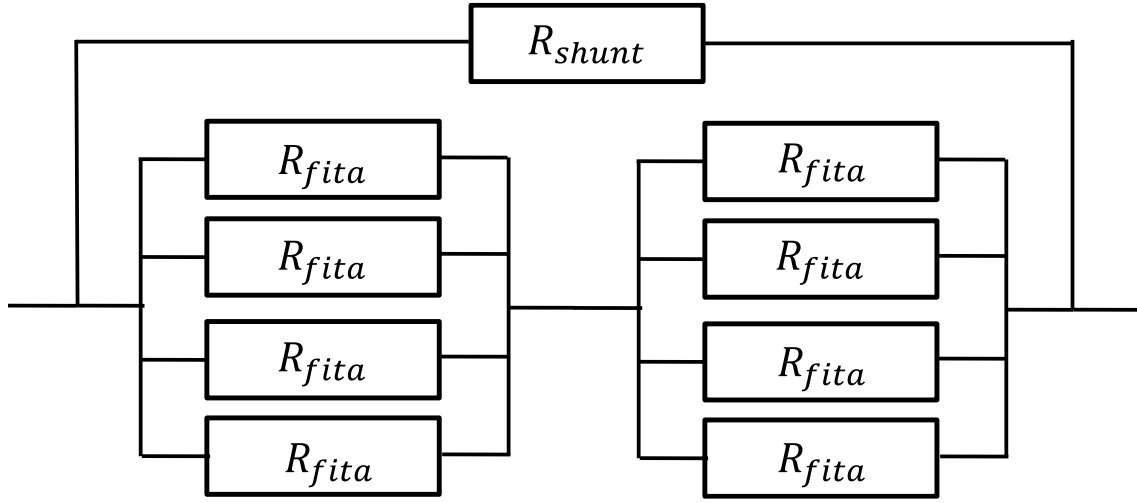


Figura 18 - Equivalente elétrico do módulo limitador.

Conforme mostrado na curva $E \times J$ (Figura 14), a resistividade do material supercondutor é dependente da corrente, cujo valor deve ser calculado a cada iteração, e da temperatura, que depende das trocas térmicas e da potência dissipada pela corrente que circula no material. O cálculo da corrente que atravessa cada camada do material supercondutor é realizado pela regra do divisor de corrente mostrado na equação (44):

$$i_n = \frac{R_{\text{módulo}}}{R_n} i_{\text{tot}} . \quad (44)$$

Para o cálculo da corrente no supercondutor é necessário à obtenção numérica da resistividade através da curva $E \times J$, a qual depende da densidade de corrente instantânea que circula no supercondutor. Faz-se necessária a utilização de um método iterativo para o cálculo da corrente em função da resistividade do supercondutor [3, 4]. Este processo iterativo é detalhado no fluxograma apresentado na Figura 19.

O processo iterativo inicia na interação $u = 1$ com o cálculo da corrente e da resistência em cada camada da fita 2G. Obtém-se a corrente na camada supercondutora, passo 1, conseguinte verifica-se a temperatura do material supercondutor é maior que a temperatura crítica, caso sim, a resistividade pode ser calculada como um condutor normal e o método iterativo é encerrado. Caso contrário, a resistividade é calculada pela equação (40), obtendo um novo valor de

resistência para a camada supercondutora. Um novo valor de corrente é calculado com os valores atualizados de resistência, conforme demonstrado no passo 6.

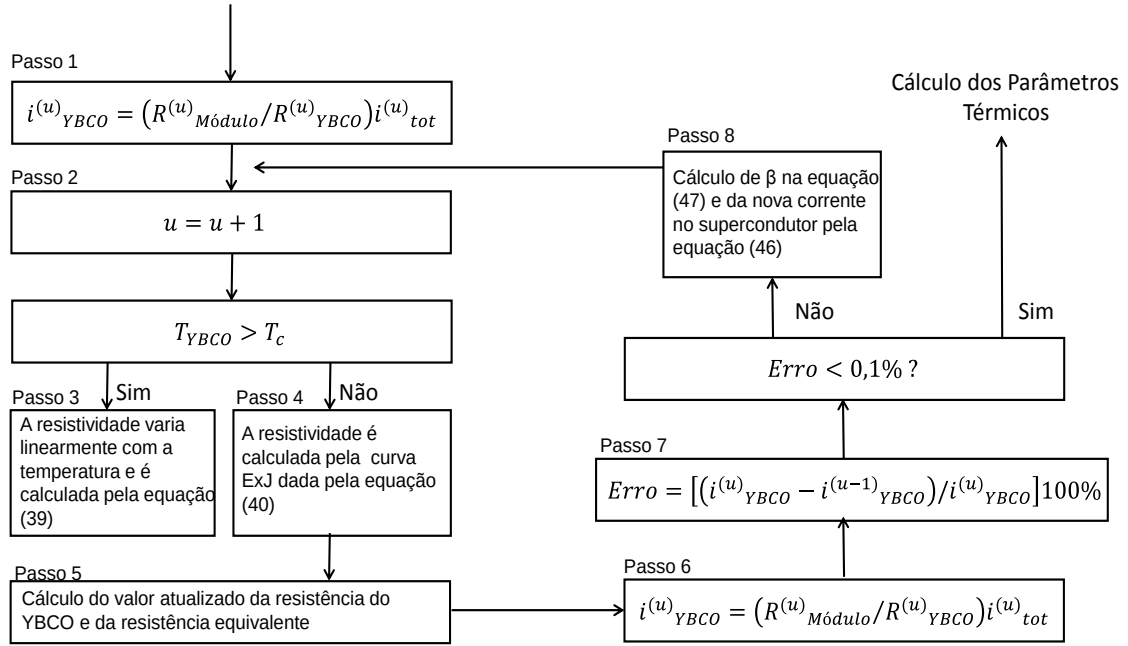


Figura 19 - Fluxograma do método iterativo para cálculo da resistividade do YBCO.

No passo seguinte é calculado o erro entre as correntes $(i^{(u-1)}_{YBCO})$ e $(i^{(u)}_{YBCO})$ conforme apresentado na equação (45), se o erro for menor que 0,1%, o processo é finalizado.

$$ERRO^u = \left[\frac{i^u_{YBCO(novo)} - i^u_{YBCO(antigo)}}{i^u_{YBCO(novo)}} \right] 100\% . \quad (45)$$

No caso do erro maior que 0,1%, o valor de $i_{YBCO(antigo)}$ deve ser ajustado na próxima interação, conforme demonstrado na equação (46):

$$i^{u+1}_{YBCO(antigo)} = i^u_{YBCO(antigo)} + \beta^{u+1} (i^u_{YBCO(novo)} - i^u_{YBCO(antigo)}) . \quad (46)$$

Onde β é denominado fator de ajuste, cujo valor depende dos valores passados da função erro. A equação (47) mostra as condições para o ajuste do valor da função β , conforme apresentado em [4]:

$$\beta = \begin{cases} \beta^u + \lambda, & \text{se } |ERRO^{u-1}| > 0 \text{ e } |ERRO^u| > 0 \\ \beta^u, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (47)$$

O valor inicial definido para β está na faixa entre 0,01 e 0,5, adicionalmente o valor de λ varia entre 0,01 e 0,1. Os valores podem ser ajustados com objetivo de obter o menor tempo de simulação e uma convergência mais rápida, o processo é finalizado

quando é encontrado $|ERRO| < 0,1\%$. Com o valor da corrente na camada supercondutora calcula-se a sua resistividade e a resistência do módulo R-SFCL, além disso, com o valor da corrente em cada camada da fita supercondutora, o próximo passo do modelo é a determinação das temperaturas em cada uma delas, a qual é obtida pela analogia eletrotérmica que será apresentada a seguir.

4.2.2. Modelagem Térmica

A utilização da analogia eletrotérmica permite solucionar as equações de transferência de calor e a temperatura das camadas da fita supercondutora através da analogia com circuitos elétricos. O equacionamento para determinação da temperatura de cada camada considera a premissa de transferência de calor unidimensional na direção transversal das camadas da fita supercondutora. Esta premissa é aceitável, pois a espessura de cada camada é muito menor que o comprimento e a largura das mesmas.

A dedução matemática detalhada do método é encontrada em [3, 4]. A formulação está associada a 1ª Lei da Termodinâmica e a Lei de Fourier para condução de calor em materiais.

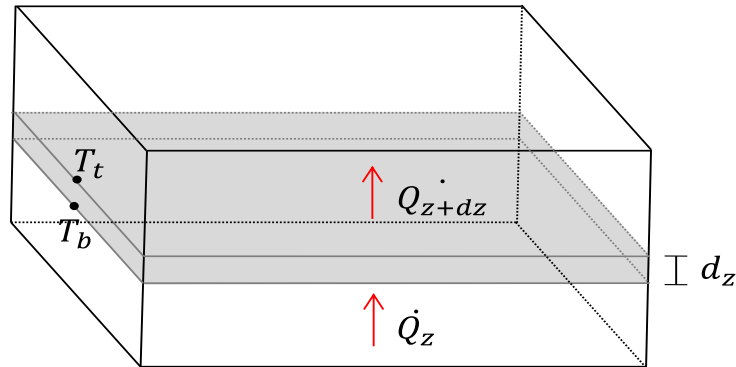


Figura 20 - Representação do volume infinitesimal para análise das equações de condução de calor.

O princípio de balanço de energia (1ª Lei da Termodinâmica) estabelece que a taxa líquida de fluxo de calor fluindo em um material somada da taxa de geração da variação da energia interna em forma de calor é igual a taxa de aumento da energia térmica armazenada no material, representado na equação (48):

$$\gamma c dV \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{Q}_z}{\partial z} dz + \dot{g} dV . \quad (48)$$

Onde $\dot{g}$ é a taxa interna de geração de calor por volume, γ é a massa específica do material, c é o calor específico e dV é o volume infinitesimal ($dV = dx \cdot dy \cdot dz$). Assumindo que o material obedece à lei de Fourier para condução de calor, a taxa de fluxo de calor ($\dot{Q}_z$) está relacionada ao gradiente de temperatura ao longo do eixo z , conforme equação (49):

$$\dot{Q}_z = -kdA \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (49)$$

Onde k é a condutividade térmica, dA é área da superfície de troca e $\partial T / \partial z$ é o gradiente de temperatura ao longo do eixo z . Ao substituir $\dot{Q}_z$ apresentado na equação (49) em (48), considerando constante o valor da variável condutividade térmica, tem-se a equação de calor unidimensional mostrado em (50):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\gamma c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{g}}{\gamma c}. \quad (50)$$

Para definirmos a analogia com circuitos elétricos, considere o equacionamento de uma linha de transmissão de parâmetros distribuídos compostos por uma resistência série e capacitância shunt, denotados por R' e C' , ilustrado na Figura 21.

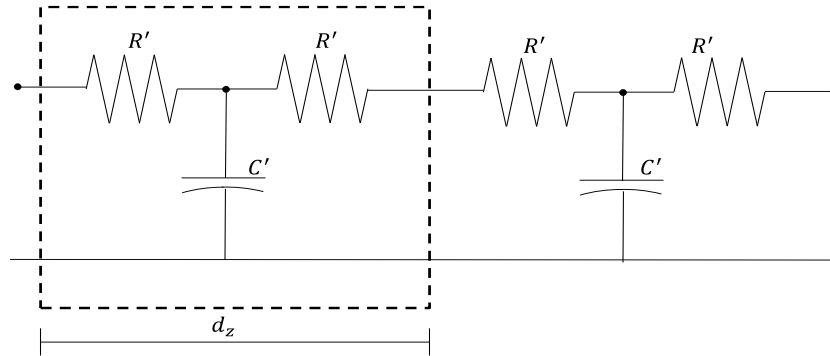


Figura 21 - Representação unifilar da linha de transmissão com parâmetros distribuídos.

A lei de Ohm cita que a variação de tensão em segmento de condutor é proporcional a corrente que fluí através dele, sendo a constante de proporcionalidade a resistência:

$$-\frac{\partial v}{\partial z} dz = R' i dz \rightarrow i = -\frac{1}{R'} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (51)$$

Pela lei de Kirchhoff estabelece a relação entre a variação de corrente em um capacitor:

$$-\frac{\partial i}{\partial z} dz = C' \frac{\partial v}{\partial t} dz \rightarrow \frac{\partial i}{\partial z} = -C' \frac{\partial v}{\partial t} \quad (52)$$

Conforme apresentado em [3, 4] ao combinar as equações (51) e (52) obtém-se a equação da linha de transmissão com parâmetros distribuídos que é apresentado em (53):

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{R'C'} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (53)$$

Sendo matematicamente similar a equação de calor, exceto pela parcela $\dot{g}/\gamma c$ no lado direito da equação (50). Ao adicionarmos uma fonte de corrente em paralelo ao capacitor shunt da linha de transmissão, representada pela variável (P), obtém-se uma equação elétrica equivalente à equação de condução de calor [4].

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{R'C'} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{P}{R'C'} \quad (54)$$

A determinação de temperatura em cada camada pode ser resolvida pela solução da equação diferencial não linear de condução de calor, apresentado em (50), através do método das diferenças finitas. A forma simples de resolução é a discretização de cada camada em um circuito RC equivalente de uma linha de transmissão, em forma de T como apresentado na Figura 22 [4].

O circuito em forma de T da Figura 22 a) possui três nós de tensão (V_b, V_c, V_t), cujos valores são equivalentes à temperatura de cada camada, representado na Figura 22 b) pelos nós de temperatura (T_b, T_c, T_t). O nó central V_c do circuito T refere-se à temperatura no centro, representado por T_c , da camada μ da fita. Os nós de tensão V_b e V_c referem-se à temperatura nas extremidades da fita (T_b e T_t) em contatos com as outras camadas que compõe a fita. Dessa forma, podemos determinar a temperatura no interior de cada camada da fita limitadora supercondutora de forma simples pelo valor das tensões dos nós, representado pelo circuito T, consequentemente utiliza-se esse valor de temperatura para a determinação da resistividade do módulo supercondutor.

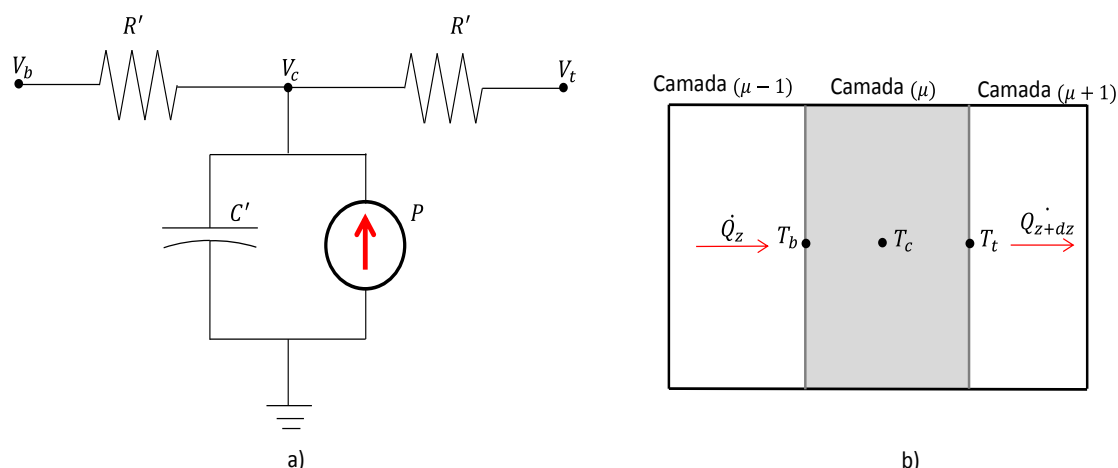


Figura 22 -a) Representação unifilar do circuito RC equivalente da linha de transmissão. b) Representação do fluxo de calor em cada camada para determinação da temperatura.

A Tabela 4 ilustra as propriedades análogas existentes entre sistemas elétricos e térmicos, utilizadas para a elaboração e modelagem do circuito equivalente para simulação das temperaturas de cada camada da fita 2G.

Tabela 4 - Comparativo das propriedades análogas dos circuitos térmico e elétrico.

Propriedades Térmicas			Propriedades Elétricas		
Grandeza	Símbolo	Unidade	Grandeza	Símbolo	Unidade
Temperatura	T	Kelvin [K]	Tensão	V	Volt
Fluxo de calor	$\dot{Q}$	J/s	Corrente	i	Ampere
Capacidade de Calor	$\gamma \cdot c \cdot A \cdot e$	J/(m ² .K)	Capacitância	C	Farad
Condutividade Térmica	λ	W/(m.K)	Resistência	R	Ω

4.2.3. Circuito Térmico Equivalente do R-SFCL

Na seção 4.2.1 observa-se que o cálculo da resistividade de cada camada possui uma relação direta com a temperatura, cujo comportamento dinâmico pode ser obtido pela analogia eletrotérmica entre as equações térmicas e as equações elétricas de uma linha de transmissão de parâmetros distribuídos. Dessa forma, foi realizada uma aproximação do R-SFCL em camadas finas, através de um modelo de parâmetros concentrados.

A Figura 23 ilustra o circuito elétrico equivalente do modelo eletrotérmico para o R-SFCL baseado em fitas 2G HTS, a fonte de tensão contínua de valor 77 V representa a temperatura do nitrogênio líquido. O meio refrigerante criogênico e a superfície da fita em contato direto trocam calor por convecção. A temperatura em

cada camada é obtida medindo-se a tensão no nó central de cada camada pelos voltímetros representados no circuito elétrico equivalente da Figura 23.

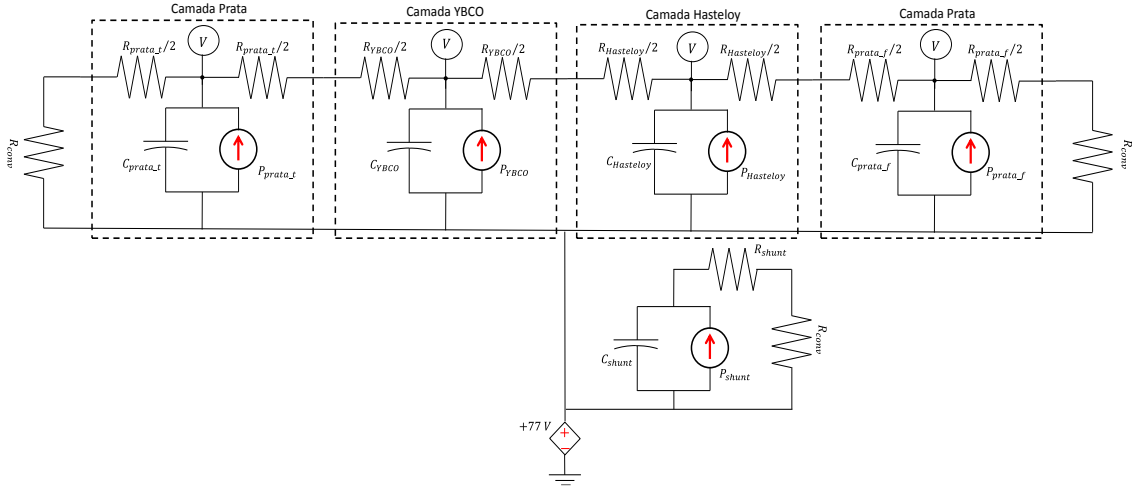


Figura 23 - Circuito Elétrico equivalente do modelo eletrotérmico do R-SFCL baseado na fita 2G HTS.

Em [2, 4] é apresentado a modelagem das resistências, capacitâncias e potências do circuito elétrico ilustrados na Figura 23, os valores são obtidos de grandezas térmicas, conforme apresentado nas equações (55), (56), (57), (58). A resistência de cada camada (R_i) representa a resistência térmica de contato ou inverso da condutividade térmica, a capacitância (C_i) equivale à capacidade de armazenamento de calor e a potência (P_i) simula o fluxo de calor ao longo de cada camada da fita e a fonte de tensão contínua de valor de 77 V representa a temperatura do nitrogênio líquido.

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i A} \quad (55)$$

$$C_i = \gamma_i c_i e_i A \quad (56)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_c A} \quad (57)$$

$$P_i = R_i i_i^2, \quad (58)$$

onde e_i é a espessura de cada camada; λ_i é a condutividade térmica do material da camada i ; A é a área de superfície de troca de calor ortogonal ao eixo z ; γ_i é a massa específica do material da camada i ; c_i é o calor específico do material da camada i ; h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre as camadas de prata e o nitrogênio líquido e i_i é a corrente instantânea que percorre cada camada.

Conforme mencionado em [3] algumas das grandezas térmicas dos materiais que compõem a fita YBCO e o shunt variam com a temperatura, assim seus valores são funções da temperatura, como por exemplo: a condutividade térmica (λ_i); o calor específico (c_i); e o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c).

$$\lambda_{prata} = [420,9 + (501,8 + 0,956T_{prata})] \quad (W/m.K) \quad (59)$$

$$c_{prata} = 220,5 + 0,046.T_{prata} \quad (J/kg.K) \quad (60)$$

$$\lambda_{hasteloy} = 3,87 + 0,017.T_{hasteloy} \quad (W/m.K) \quad (61)$$

$$c_{hasteloy} = \{0,19 + 2. [0,194(1 - e^{-T_{hasteloy}/310})]\}. 10^3 \quad (J/kg.K) \quad (62)$$

$$\lambda_{YBCO} = 5,0 \quad (W/m.K) \quad (63)$$

$$c_{YBCO} = \left\{ 0,39 \left(\frac{250}{T_{YBCO}} \right)^2 \cdot \frac{e^{(250/T_{YBCO})}}{[e^{(250/T_{YBCO})} - 1]^2} \right\} \cdot 10^3 \quad (J/kg.K) \quad (64)$$

$$\lambda_{aço} = 15 \quad (W/m.K) \quad (65)$$

$$c_{aço} = 200 \quad (J/kg.K) \quad (66)$$

O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção varia conforme a diferença de temperatura (ΔT) entre a camada em contato com o meio criogênico e a temperatura do nitrogênio líquido [3, 4].

A massa específica dos materiais de cada camada utilizado na modelagem do R-SFCL baseados em fitas 2G não dependem da variação da temperatura, os valores implementados no modelo eletrotérmico são apresentados a seguir:

- $\gamma_{prata_t} = 10.470 \text{ kg/m}^3$; $\gamma_{YBCO} = 6.300 \text{ kg/m}^3$; $\gamma_{shunt} = 7.900 \text{ kg/m}^3$
- $\gamma_{hasteloy} = 8.900 \text{ kg/m}^3$; $\gamma_{prata_f} = 10.470 \text{ kg/m}^3$.

Os valores das grandezas térmicas supracitadas são inseridos no modelo eletrotérmico apresentado na Figura 23, o qual é implementado através de um código computacional na linguagem MODELS do ATPdraw. A análise nodal do circuito elétrico equivalente para obtenção das tensões (V_n) é obtido de um conjunto de equações diferenciais parciais no tempo que são resolvidas pelo programa fornecendo os valores de tensão. A resistência equivalente depende do cálculo da resistência de cada camada e da fita shunt, que são calculadas de acordo com a relação da

resistividade por temperatura, conforme apresentado nas equações (36), (37), (38), (39), (40), (41) e (43).

O anexo A apresenta o código computacional na linguagem MODELS que modela o comportamento térmico e elétrico do arranjo dos elementos limitadores R-SFCL, sendo baseado no modelo implementado em [3].

4.3. MODELAGEM DO R-SFCL

Em [2] utilizou-se o R-SFCL baseados em fitas 2G para avaliação da aplicação de limitadores supercondutores resistivos em sistemas elétricos típicos de plataformas de produção de petróleo FPSO. Conforme mencionado em [2], os limitadores de curto-circuito baseados em fitas 2G são aplicados em sistemas elétricos comerciais, possuindo vantagens operacionais e construtivas em relação aos limitadores baseados em MCP-BSCCO-2212, como por exemplo: menor peso e tamanho, maior limitação de corrente e menor tempo de recuperação. Os MCP-BSCCO-2212 foram descontinuados, devido aos R-SFCL construídos com fitas 2G serem economicamente mais viáveis.

Para a modelagem do R-SFCL que simule o comportamento de um dispositivo real utilizou como base o modelo SF12100 da *Superpower* [33], o formato construtivo é ilustrado na Figura 15, as características dimensionais e os principais parâmetros da fita 2G utilizado na modelagem do limitador são apresentados na Tabela 2.

O módulo supercondutor resultante do R-SFCL baseado em fitas 2G, ilustrado na Figura 16, possui as seguintes características elétricas: corrente crítica de $1100 A_{RMS}$, corrente nominal de $600 A_{RMS}$ e tensão nominal de $430 V_{RMS}$. Os elementos limitadores podem ser dispostos em arranjos em série e paralelo com objetivo de adequarem as características de tensão e corrente da instalação em que serão aplicados.

O número de elementos limitadores em série depende da queda de tensão máxima na fita durante a limitação do curto-circuito (queda de tensão máxima $50 V_{RMS}/m$), o comprimento total da fita 2G é de $8,6 m$, logo a tensão nominal de operação de cada módulo é de $430 V_{RMS}$. Para um sistema elétrico de $13,8 kV$ de tensão de linha ($7,96 kV$ tensão de fase), o número mínimo de elementos em série é dado pela relação apresentada na equação (67):

$$n_{série}^o = \frac{V_{RMSSE}}{430 V_{RMS}} \rightarrow = \frac{7960}{430} = 18,51 \rightarrow n_{série}^o = 19. \quad (67)$$

Onde V_{RMSSE} é a tensão de RMS de fase do sistema elétrico em que a fita será utilizada.

O cálculo para a definição do número de módulos limitadores em paralelos para que não ocorra atuação espúria do limitador em condições normais de operação deve levar em consideração a máxima corrente esperada no sistema elétrico. A equação (68) ilustra o critério apresentado em [5] para o dimensionamento do número mínimo de elementos limitadores em paralelo:

$$n_{\text{paralelo}}^{\circ} = \frac{I_{n_{\text{max}}}}{I_{c_{\text{modulo}}}} \sqrt{2} . \quad (68)$$

Onde $I_{n_{\text{max}}}$ é a máxima corrente em regime permanente mais a maior corrente de inrush esperada fluindo pelo limitador e $I_{c_{\text{modulo}}}$ é a corrente crítica do módulo limitador que é obtida multiplicando a corrente crítica da fita pelo número de fitas em paralelo. Com as equações (67) e (68) é possível definir a topologia do R-SFCL baseado nas condições nominais do sistema elétrico.

Considere como exemplo, um sistema elétrico cujo valor máximo da corrente em condição nominal que flui pelo R-SFCL seja de 5400 A. A corrente crítica do módulo limitador é de 1100 A. Utilizando a equação (68), obtém-se um valor aproximado de 6,94, dessa forma utiliza-se 7 elementos limitadores em paralelos para este sistema elétrico.

Para a modelagem do R-SFCL que simule o comportamento térmico, elétrico e a dinâmica de atuação do dispositivo em condições normais de operação e sobre curto-circuito utilizou a ferramenta *MODELS* do *ATPDraw*. Esta ferramenta é baseada em linguagem de programação que permite emular o comportamento do R-SFCL através de código computacional baseado nas equações elétricas e térmicas que descrevem o comportamento do dispositivo. Assim, torna-se possível o cálculo das resistividades e a temperatura das fitas 2G que compõem o módulo limitador R-SFCL [3] em operação no sistema elétrico. O anexo A apresenta o código computacional na linguagem *MODELS* que modela o comportamento térmico e elétrico do arranjo dos elementos limitadores R-SFCL, sendo baseado no modelo implementado em [3].

5. ESTUDOS DOS CENÁRIOS COM ZEROS ATRASADOS E AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO R-SFCL

Em [1] foram realizadas diversas simulações computacionais para identificar os cenários e os tipos de curto-circuito que causam maior influência na ocorrência de zeros atrasados. A ocorrência de DCZ depende de diversas condições na operação do sistema elétrico, como por exemplo: topologia e carregamento do sistema; momento de ocorrência do curto-circuito; e momento de abertura do disjuntor.

Em [1] é mencionado que um dos piores cenários com a maior probabilidade de ocorrência de DCZ é um curto-circuito nos terminais do gerador a vazio. Além disso, foi descrito em [1] que sistemas industriais em que motores estão próximos eletricamente às unidades geradoras agravam o fenômeno de zeros atrasados. Os motores apresentam elevada contribuição para o curto-circuito no período subtransitário, atuando como um gerador. Porém, esta contribuição decai significativamente durante o período transitório, exercendo grande influência para a ocorrência de zeros atrasados.

Conforme mencionado em [1, 12], o momento da ocorrência do curto-circuito tem elevada influência na possibilidade de ocorrência de zeros atrasados, algumas referências [1, 8, 9, 12] mencionam que uma das piores condições ocorre quando a falta ocorre no momento que a tensão em uma das fases está passando pelo zero, devido a maior assimetria. Nas simulações realizadas em [1] evidenciou-se que para o fenômeno de zeros atrasados, a pior condição ocorre quando o defeito acontece no momento que uma das fases está no pico de tensão.

Em [1, 12] apresentam que a abertura do disjuntor influencia na dinâmica das correntes durante o curto, após a abertura dos polos do disjuntor e ao extinguir a primeira fase que passa pelo zero, o sistema passa de um curto-circuito trifásico para bifásico, a componente CC de curto decai e as fases remanescentes apresentam a mesma amplitude, porém em oposição de fase, podendo favorecer ou piorar o atraso da passagem por zero.

Nas simulações considerou-se o tempo de 68 ms para a abertura total dos polos do disjuntor, somando os tempos de processamento do relé que é de 20 ms e da separação dos polos do disjuntor foi considerado o tempo de três ciclos que corresponde aproximadamente a 48,8 ms.

Em [1, 12, 15] é mencionado que o curto evolutivo apresenta a pior condição para ocorrência de zeros atrasados, no curto bifásico evolutivo para trifásico a componente

CC de curto aumenta, aumentando também o tempo necessário para que as correntes de curto cruzem o zero. Será considerada nos cenários deste capítulo a simulação de um curto bifásico para trifásico para avaliar o comportamento dinâmico das correntes e a probabilidade de ocorrência de zeros atrasados.

Para a avaliação do desempenho do R-SFCL, o mesmo será aplicado em série com o circuito de geração com objetivo de avaliar a capacidade do dispositivo de reduzir as correntes de pico e eliminar o fenômeno de zeros atrasados.

Neste capítulo serão simulados no ATPdraw os cenários listados a seguir, considerando a ocorrência do curto na passagem do zero de tensão, no pico de tensão em uma das fases e curto evolutivo bifásico para trifásico, para verificar a probabilidade de zeros atrasados no sistema elétrico e o desempenho do R-SFCL para mitigação do problema.

- Cenário 1 → Gerador a vazio considerando a abertura de um disjuntor ideal;
- Cenário 2 → Gerador a vazio considerando uma resistência de arco em disjuntores a vácuo durante a abertura;
- Cenário 3 → Gerador a vazio com dispositivo R-SFCL;
- Cenário 4 → Contribuição motórica com curto nos terminais do gerador;
- Cenário 5 → Contribuição motórica simulando uma resistência de arco durante a abertura dos disjuntores a vácuo;
- Cenário 6 → Contribuição motórica com dispositivo R-SFCL.

5.1. CURTO-CIRCUITO NOS TERMINAIS DO GERADOR A VAZIO

As referências bibliográficas [1, 8, 9, 12, 15] mencionam que o curto nos terminais do gerador apresenta correntes de valor elevado e com alto grau de assimetria, devido à relação X/R elevada. A consequência deste alto valor de assimetria é o surgimento de correntes de pico de primeiro ciclo que podem vir superar a capacidade dos equipamentos instalados, além de apresentarem contribuição significativa no fenômeno de DCZ.

Em [8, 12] é investigada a ocorrência do fenômeno de zeros atrasados para curtos-circuitos no terminal do gerador e em sincronismos fora de fase. Para avaliar a possibilidade de ocorrência do fenômeno de DCZ para um curto-circuito nos terminais do gerador será simulado nos cenários 1, 2 e 3 a aplicação de uma falta trifásica nos terminais do gerador operando a vazio.

Para a simulação do curto nos terminais do gerador foi utilizado o modelo do gerador “SM 58” da ferramenta de computacional de transitórios elétricos “ATPdraw” para representar o gerador no sistema. A Tabela 5 apresenta os principais valores das variáveis elétricas do gerador utilizado na simulação, correspondente aos dados de placa de um gerador síncrono típico de 31,25MVA; 13,8kV.

Tabela 5 - Dados de placa de uma máquina síncrona de 31,25MVA; 13,8kV.

Dados gerador			
Potência (MVA)	31,25	T_{d0} (s)	3,86
Tensão (kV)	13,8	T_{q0} (s)	1,98
X_d (p.u.)	1,59	X_a (p.u.)	0,12
X_q (p.u.)	1,51	X_d'' (p.u.)	0,19
X_d' (p.u.)	0,26	X_q'' (p.u.)	0,25
X_q' (p.u.)	0,29	T_d'' (s)	0,026
R_a (p.u.)	0,001	T_q'' (s)	0,036
I_n (A)	1307	H(s)	2,59

A implementação do modelo elétrico na simulação computacional no “ATPdraw” de um curto-circuito nos terminais de um gerador operando a vazio é apresentada na Figura 24. Para a simulação do curto foi utilizado a chave ideal “DJ-02” para a energização de uma carga puramente resistiva em Y de valor desprezível, controlando o instante de fechamento da chave para emular a falta no zero e no pico de tensão em uma das fases.

Para avaliar o efeito da abertura do disjuntor na dinâmica das correntes de curto no sistema e na influência nos fenômenos de zeros atrasados foi inserida no modelo da simulação a chave ideal “DJ-01”, no terminal de saída do gerador, sendo inicialmente mantida fechada. Após decorrer 68 ms da ocorrência do curto-circuito a chave é configurada para abrir e o curto é extinto quando as correntes passam pelo zero de corrente. Para caracterizar se o sistema possuirá problemas de zeros atrasados e avaliar possíveis riscos com relação à integridade do disjuntor foi considerado o tempo máximo de arco de 15 ms.

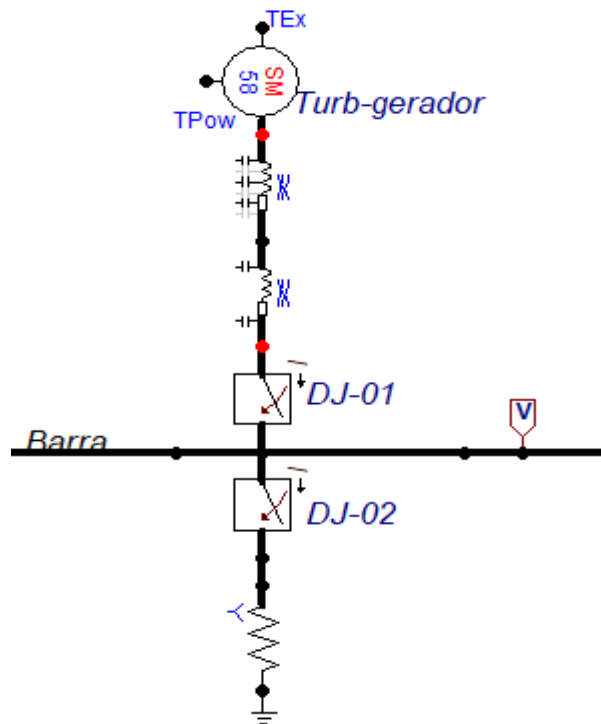


Figura 24 - Representação da simulação do curto-circuito nos terminais do gerador no ATP.

5.1.1. Cenário 1: Gerador a Vazio

- **Chaveamento do curto no zero de tensão:**

O curto-circuito foi aplicado no momento que a tensão na fase A passava pelo zero de tensão, o modelo utilizado para simulação foi apresentado na Figura 24. A fase C foi a primeira a passar por zero, sendo logo extinta, o curto passa de trifásico para bifásico e as correntes das fases A e B apresentam o mesmo módulo, porém sentidos contrários, sendo extinta na passagem por zero, 12 ms após a abertura do disjuntor.

Observa-se na Figura 25 que a fase A apresentou o maior valor de pico de corrente, alcançando valores na ordem de 17 kA, além disso, apresentou a maior assimetria não cruzando por zero nos primeiros ciclos. No instante de tempo de 0,564s ocorre a abertura do disjuntor do gerador “DJ-01”, a fase C é a primeira a cruzar o zero e é logo extinta, mudando a dinâmica do sistema, observa-se que nas fases remanescentes (fases A e B) a componente CC cai abruptamente reduzindo o pico de corrente e assimetria. Nota-se na Figura 25 que as fases A e B também cruzam o zero e são extintas, 13 ms após a abertura do disjuntor, neste cenário conclui-se que não há risco de integridade do disjuntor, pois o mesmo é capaz de suportar 15 ms exposto ao arco, conforme informações contidas no catalogo do fabricante [16].

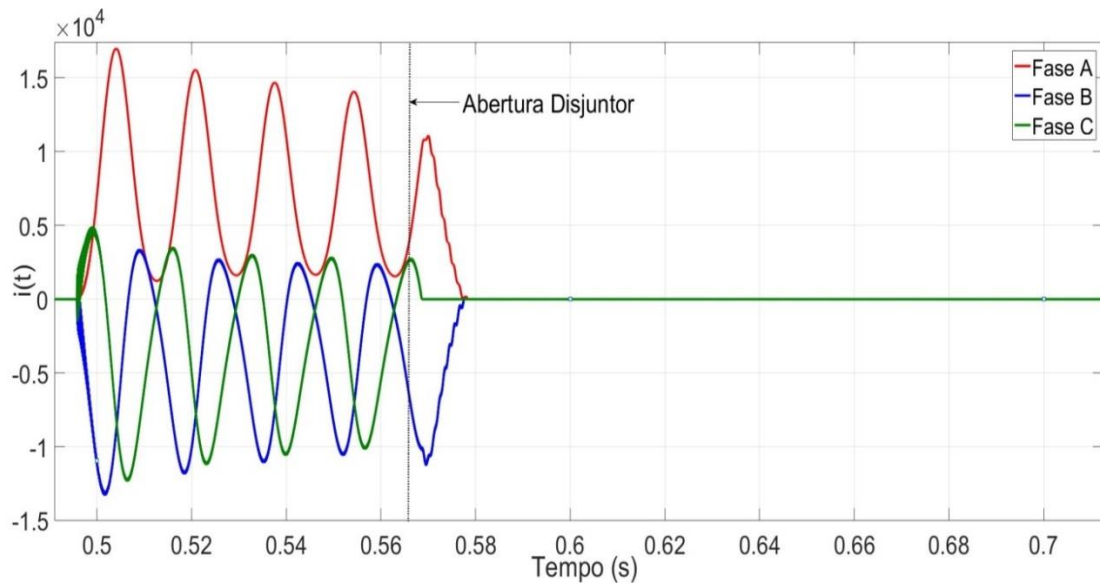


Figura 25 - Correntes de curto-circuito nos terminais do gerador.

- **Chaveamento no pico da tensão para simulação do curto:**

O curto-circuito foi aplicado no momento que a tensão na fase A passava pelo pico de tensão, o modelo utilizado para a simulação é o apresentado na Figura 24, sendo configurado na chave “DJ-02” o tempo para que o instante de fechamento provoque um curto-circuito no momento de pico de tensão da fase A.

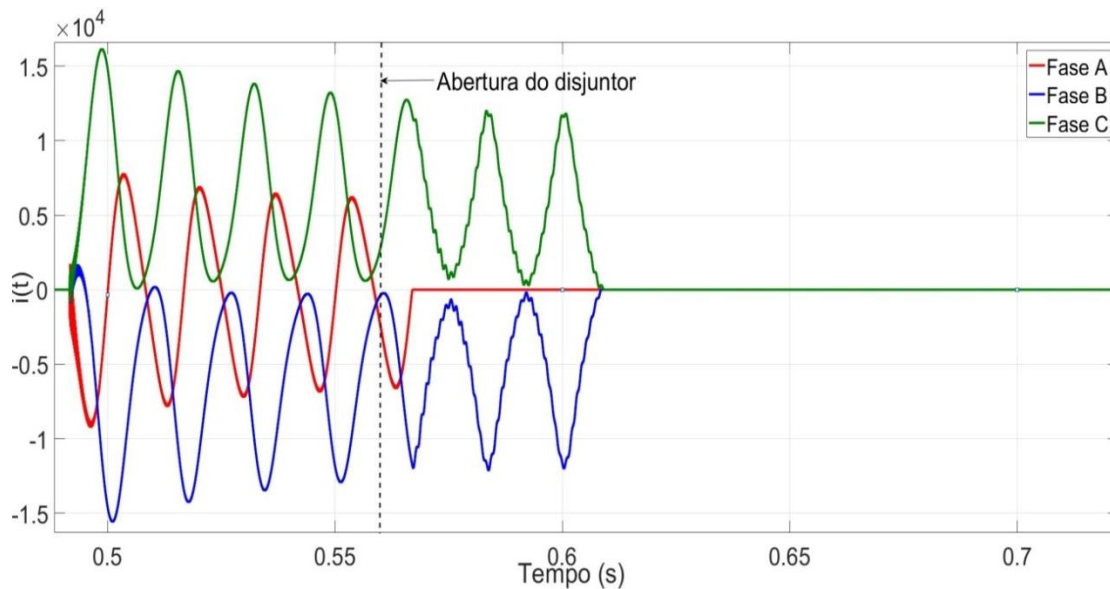


Figura 26 - Correntes de curto nos terminais do gerador com zero atrasado.

Nota-se na Figura 26 que a corrente da fase A não apresenta assimetria e é a primeira a ser interrompida logo após a abertura do disjuntor no instante de tempo 0,567s, o curto passa de trifásico para bifásico. As fases B e C apresentaram maior assimetria quando comparadas ao curto no zero de tensão, atingindo no primeiro ciclo

valores de pico de corrente de 16,2 kA. Após a abertura do disjuntor observa-se que não houve redução significativa da componente CC de curto nas fases B e C.

Cabe mencionar que após a abertura do disjuntor as fases B e C demoraram em torno de 47 ms para cruzarem o zero e serem extinta, dessa forma os polos do disjuntor estão sujeitos a correntes de arco durante esse período, colocando em risco a integridade do equipamento, conforme manual do equipamento [16].

- **Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico no zero de tensão:**

O curto-circuito bifásico (fases B e C) foi aplicado no momento que a tensão na fase B passava pelo zero de tensão evoluindo para um curto trifásico no momento que fase A passava pelo zero de tensão. A Figura 27 apresenta o comportamento das correntes para esse cenário de curto.

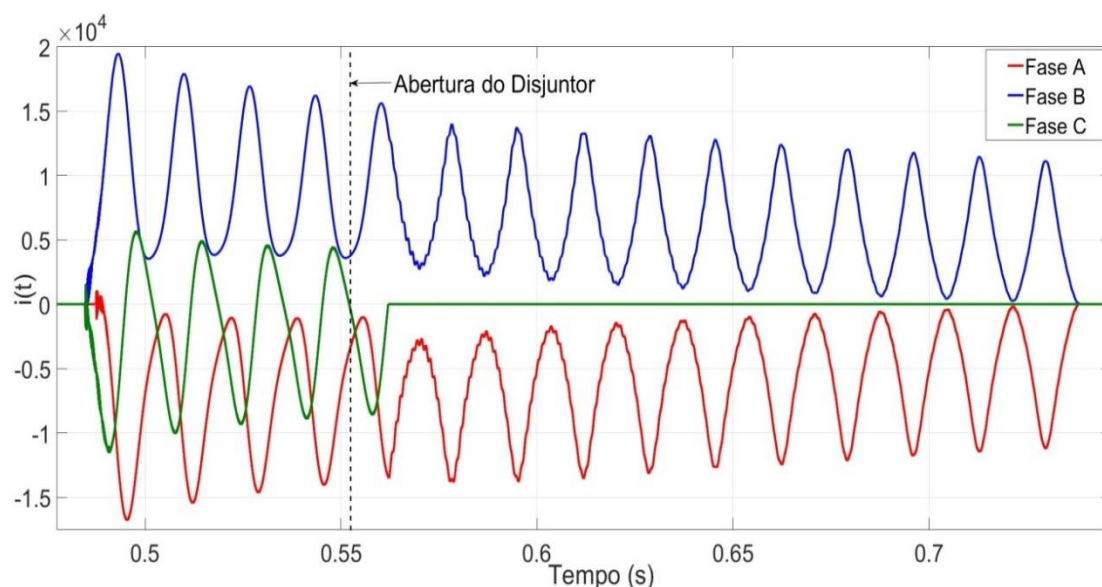


Figura 27 - Curto-circuito bifásico para trifásico com zero atrasado.

Nota-se na Figura 27 que este cenário representa a condição mais severa de curto com valores de pico de 19,4 kA na fase B e a pior condição para a ocorrência de zeros atrasados, conforme apresentado em [1, 8, 9, 10, 12]. Durante a evolução do curto bifásico para trifásico, a componente CC do curto aumenta quando o defeito evolui para trifásico, tornando os curtos evolutivos os piores cenários de zero atrasado. As fases B e C não passam por zero após a abertura do disjuntor. As correntes das fases B e C demoram em torno de 190 ms para passarem por zero, para finalmente serem interrompidas. Os polos do disjuntor são submetidos à energia do arco durante este intervalo de tempo, colocando em risco a integridade do equipamento.

5.1.2. Cenário 2: Gerador a Vazio Simulando uma Resistência de Arco em Disjuntores a Vácuo

O cenário 2 é implementado na simulação computacional do “ATPdraw” em que é aplicado um curto-circuito nos terminais de um gerador operando a vazio, porém é simulado a resistência do arco durante a abertura do disjuntor, conforme apresentado na Figura 28.

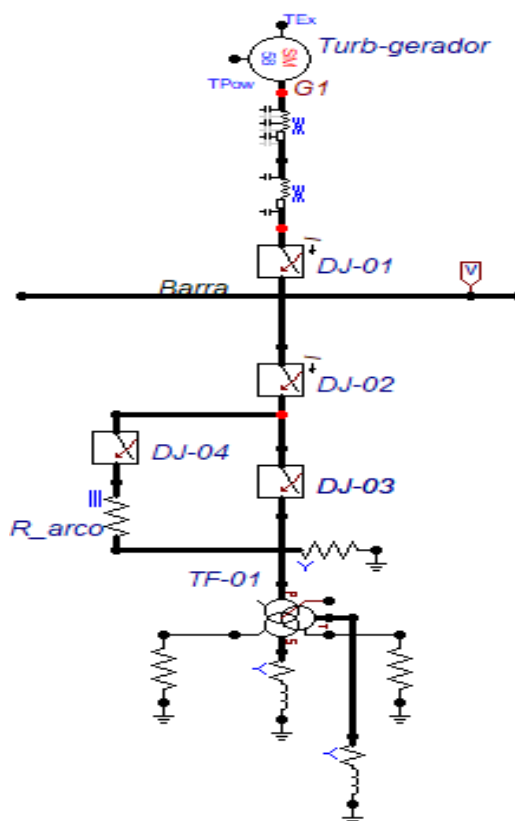


Figura 28 - Representação do modelo de simulação no ATPdraw da resistência de arco.

Para a simulação da resistência do arco durante a abertura do disjuntor na extinção do curto foram utilizados as chaves ideais “DJ-02, DJ-03 e DJ-04” para a energização de uma carga puramente resistiva em Y de valor desprezível, controlando o instante de fechamento da chave para emular o defeito no zero, no pico de tensão e o curto bifásico evolutivo para trifásico. Para a simulação da resistência de arco, nos primeiros 20 ms de curto as chaves “DJ-02 e DJ-03” estão fechadas e a chave “DJ-04” aberta, a chave “DJ-04” é fechada ao mesmo tempo que a chave “DJ-03” é aberta para emular uma resistência de arco constante durante a abertura do disjuntor.

Em [1] é mencionado que a resistência de arco possui um valor não linear e com característica puramente resistiva, e a modelagem do arco para a representação real do seu comportamento na simulação é matematicamente complicada.

Para avaliação da influência do arco no fenômeno de zero atrasado será considerada para a simulação a premissa conservadora que a resistência de arco possui valor constante de 3 m Ω [1]. Esta aproximação tende influenciar na redução tempo de atraso da passagem da corrente por zero.

- **Chaveamento do curto no zero de tensão:**

O curto-circuito foi aplicado no momento que a tensão na fase A passava pelo zero de tensão. A Figura 29 apresenta o comportamento das correntes durante o curto e a extinção pela abertura do disjuntor.

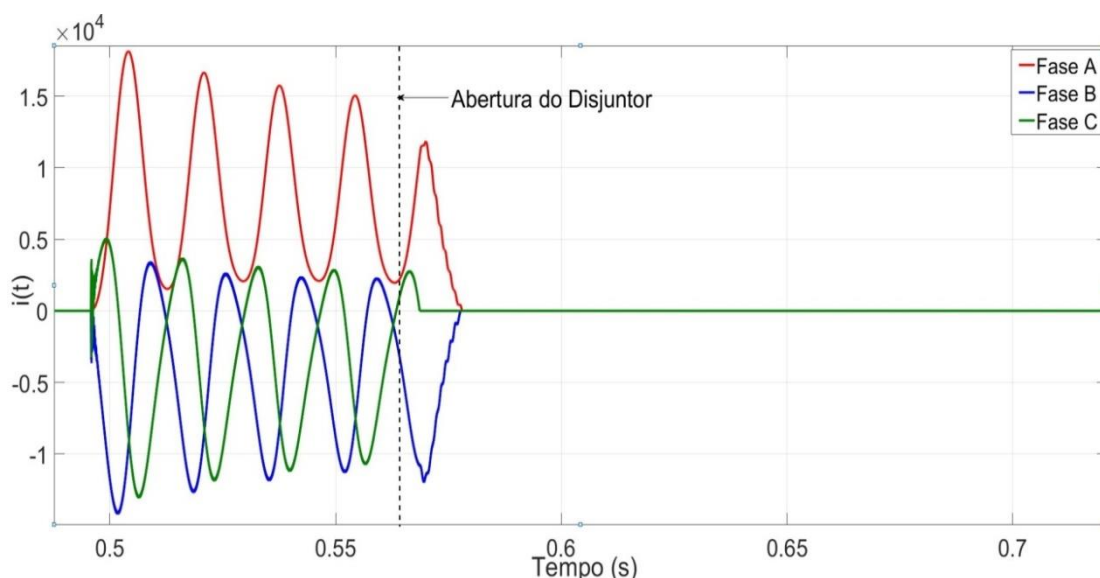


Figura 29 - Correntes de curto nos terminais do gerador no zero de tensão fase A (cenário 2).

A primeira corrente a passar por zero após a abertura do disjuntor e a ser extinta foi a fase C, o curto passa de trifásico para bifásico nas fases A e B, sendo extinta 14 ms após a abertura do disjuntor. Nota-se que no comportamento apresentado na Figura 29, a introdução da resistência de arco não influenciou na redução do tempo de passagem das correntes por zero. Não existe risco de integridade para o disjuntor neste cenário, pois o mesmo é capaz de suportar correntes de arco durante 15 ms.

- **Chaveamento do curto no pico de tensão da fase A:**

O curto-circuito foi aplicado no momento que a tensão na fase A passava pelo pico de tensão. A chave “DJ-02” é configurada para que o instante de seu fechamento provoque um curto-circuito no pico de tensão da fase A.

A componente CC para o curto no pico de tensão na fase A é praticamente desprezível, enquanto que as fases B e C apresentam a máxima assimetria. Nota-se

que a introdução de arco reduziu em um ciclo a extinção das correntes nas fases B e C, as mesmas levaram 31 ms para cruzarem o zero após a abertura do disjuntor.

Comparando o cenário 1 apresentado na Figura 26 com o cenário 2 apresentado na Figura 30, observa-se que ocorreu uma redução de 47 ms para 31 ms no tempo total para eliminar totalmente o curto no sistema após a abertura do disjuntor. A introdução da resistência de arco não foi suficiente para eliminar o risco da integridade do equipamento durante a extinção do curto, pois o mesmo está exposto a arcos durante intervalos de tempo maiores que 15 ms.

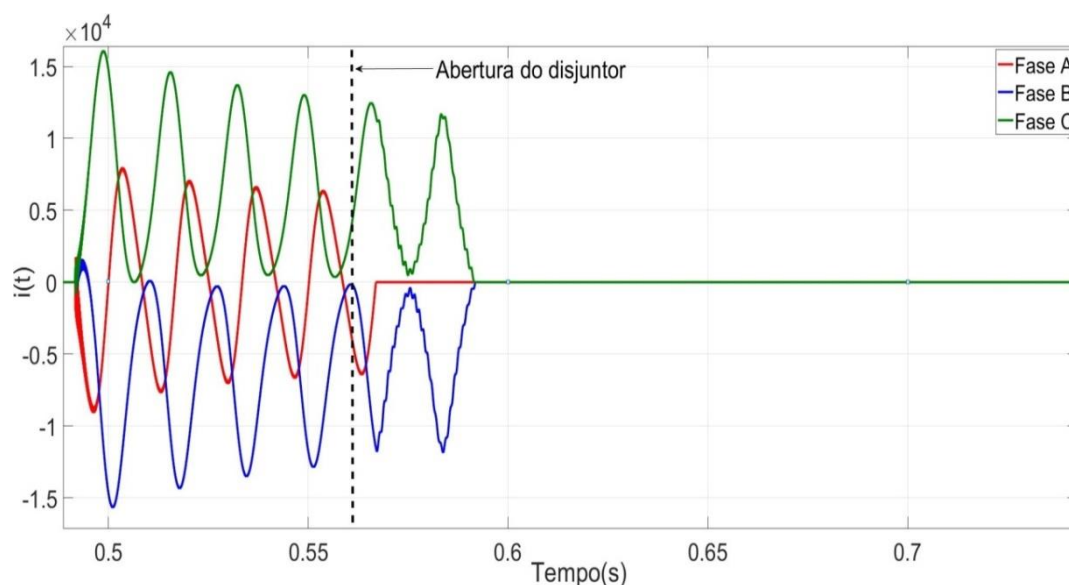


Figura 30 - Correntes para curto no pico de tensão fase A (Cenário 2).

- **Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico no zero de tensão:**

O curto-circuito bifásico (fases B e C) foi aplicado no momento que a tensão na fase B passava pelo zero de tensão evoluindo para um curto trifásico no momento que a fase A passava pelo zero de tensão. A Figura 31 apresenta o comportamento das correntes para esse cenário de curto.

A introdução da resistência de arco não afeta o período subtransitório, ou seja, durante os primeiros 20 ms do curto, ocorrendo o mesmo valor máximo de pico na fase B, sendo igual a 19,4 kA conforme simulado anteriormente na condição ideal. A resistência de arco é inserida na simulação 40 ms após a ocorrência do curto, observa-se que a fase C é a primeira a ser extinta. Comparativamente ao cenário 1 para o cenário de curto evolutivo, verifica-se que houve uma redução de três ciclos para extinção das correntes fases A e B com a introdução da resistência de arco de 3 mΩ.

Neste cenário, após a separação dos polos do disjuntor, os mesmos foram submetidos às correntes de arco durante 133 ms, também colocando em risco a integridade do equipamento.

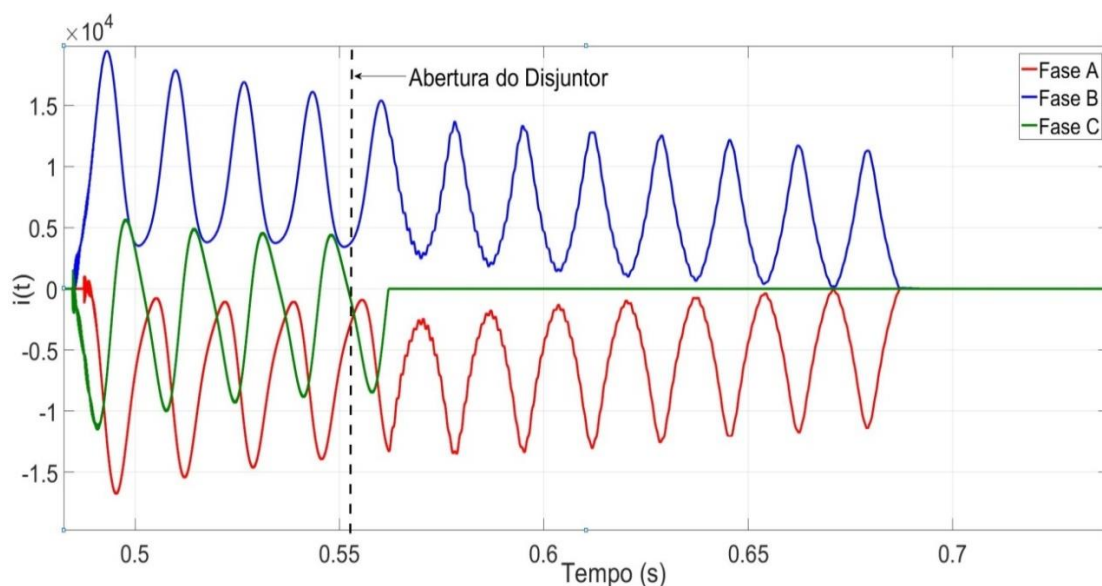


Figura 31 - Curto-circuito bifásico para trifásico (Cenário 2).

A introdução da resistência de arco reduziu os tempos de Zeros Atrasados nos cenários 1 e 2 para o curto no pico de tensão e evolutivo, fornecendo um direcionamento que a introdução de uma resistência no sistema elétrico, reduz a relação X/R do sistema, e consequentemente a assimetria de curto. Baseado nestes resultados será avaliada simulações com a introdução do R-SFCL nos cenários estudados anteriormente com objetivo de avaliar o efeito na mitigação das correntes de zeros atrasados.

5.1.3. Cenário 3: Aplicação do Dispositivo R-SFCL em Série nos Terminais de Saída do Gerador

O R-SFCL apresenta algumas características, como resistência desprezível em condições normais e introduzem um valor de resistência no circuito considerável durante o curto, que tornam o seu uso interessante em aplicações industriais para limitação das correntes de curto-circuito. Na simulação será introduzido o R-SFCL a montante do disjuntor da geração e avaliado a sua influência no fenômeno de zero atrasado.

A premissa para a modelagem do limitador neste cenário utiliza a corrente nominal de placa do gerador acrescida de 30% de sobrecarga, a corrente nominal do gerador é de 1300 A, logo o valor de corrente utilizado para dimensionamento do dispositivo é de 1690 A.

O critério para dimensionamento da fita foi apresentado na seção 4.3 fornecendo um equacionamento para determinação do arranjo de fitas 2G que devem ser construídas em paralelos para que o R-SFCL não atue indevidamente. A equação apresenta o cálculo para determinação do número mínimo de fitas em paralelo.

$$n_{\text{paralelo}}^{\circ} = \frac{1690}{275} \sqrt{2} = 8,69 . \quad (69)$$

Os cálculos apresentados em (69) determinam a necessidade de nove fitas supercondutoras em paralelos para garantir uma operação confiável, sem atuações espúrias. Como cada módulo limitador possui quatro fitas em paralelo, nesta aplicação serão utilizados três módulos de R-SFCL em paralelo no modelo de simulação, totalizando uma quantidade de 12 (doze) fitas em paralelo.

O cálculo do número de elementos em série está associado a tensão máxima suportável por cada módulo (430 V). O dispositivo será aplicado em série com o gerador que fornece 13,8 kV de tensão de linha (7,96 kV tensão de fase), o número mínimo de módulos em série é igual a 19 e foi calculado na equação (67).

A Figura 32 apresenta a modelagem no ATPdraw do cenário 3 em que é introduzido o dispositivo R-SFCL em série com o gerador com objetivo de avaliar o seu desempenho em relação ao curto-circuito nos terminais do alimentador do gerador.

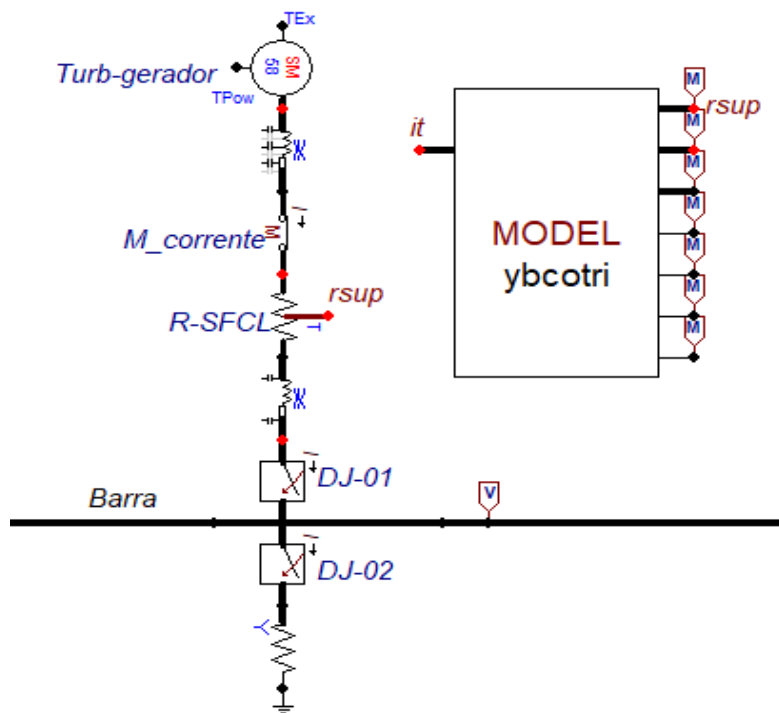


Figura 32 - Modelo de simulação do curto-circuito no sistema com o R-SFCL.

Para a implementação do dispositivo limitador na simulação utilizou-se o componente “R-TACS Type 91” da biblioteca em conjunto com a ferramenta “MODEL” do ATPdraw. No bloco “MODEL” permite o usuário implementar a linguagem de programação para o cálculo da resistividade, resistência e temperatura de cada camada e do R-SFCL. A entrada do “MODEL”, representado pela variável “it” é o valor das correntes trifásicas medidas através do componente “M_corrente”. Uma das saídas do “MODEL” é a resistência equivalente da configuração do limitador supercondutor, representado pela variável “rsup”, sendo utilizado no componente “R-TACS Type 91 (R-SFCL)” que é uma resistência controlada externamente. A chave “DJ-02” é responsável pela aplicação do curto e a chave “DJ-01” simular o disjuntor do gerador responsável por detectar e eliminar a falta do sistema.

- **Chaveamento do curto no zero de tensão:**

A Figura 33 apresenta o comportamento das correntes durante o curto e a extinção pela abertura do disjuntor.

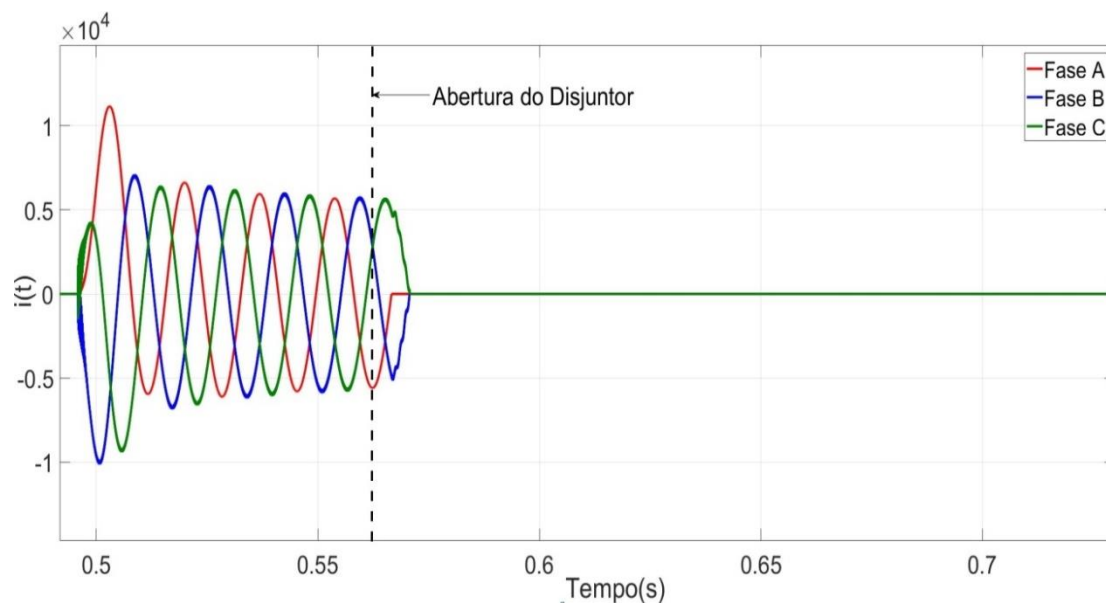


Figura 33 - Curto-circuito no zero de tensão nos terminais do gerador protegido pelo R-SFCL.

Na Figura 33 é demonstrado o comportamento das correntes durante o curto-circuito com o dispositivo R-SFCL inserido no sistema a jusante do gerador, nota-se que houve uma redução da corrente de pico de primeiro ciclo de 35% (17 kA para 11 kA) quando comparados aos cenários 1 e 2. Além disso, cabe mencionar que ocorreu a eliminação da assimetria das correntes, logo após o primeiro ciclo, a primeira fase a ser eliminada foi a fase A, e as fases B e C logo em seguida. A introdução do R-SFCL representou um ganho para o sistema, uma vez que ocorreu a redução do valor da corrente de pico de curto e da assimetria.

A Figura 34 apresenta o resultado para as temperaturas de cada camada da fita 2G YBCO e da fita shunt, e a resistência equivalente do R-SFCL. Observa-se que o dispositivo apresenta transição rápida do estado supercondutor para o estado normal durante sua atuação ao observar o comportamento da resistência na Figura 34 a). Em [3] é mencionado que para garantir a integridade do R-SFCL, as temperaturas nas camadas devem ser mantidas abaixo do limite térmico de 400 K, na Figura 34 b) é ilustrado que a máxima temperatura para essa simulação foi de 210 K evitando danos ao limitador por aquecimento excessivo.

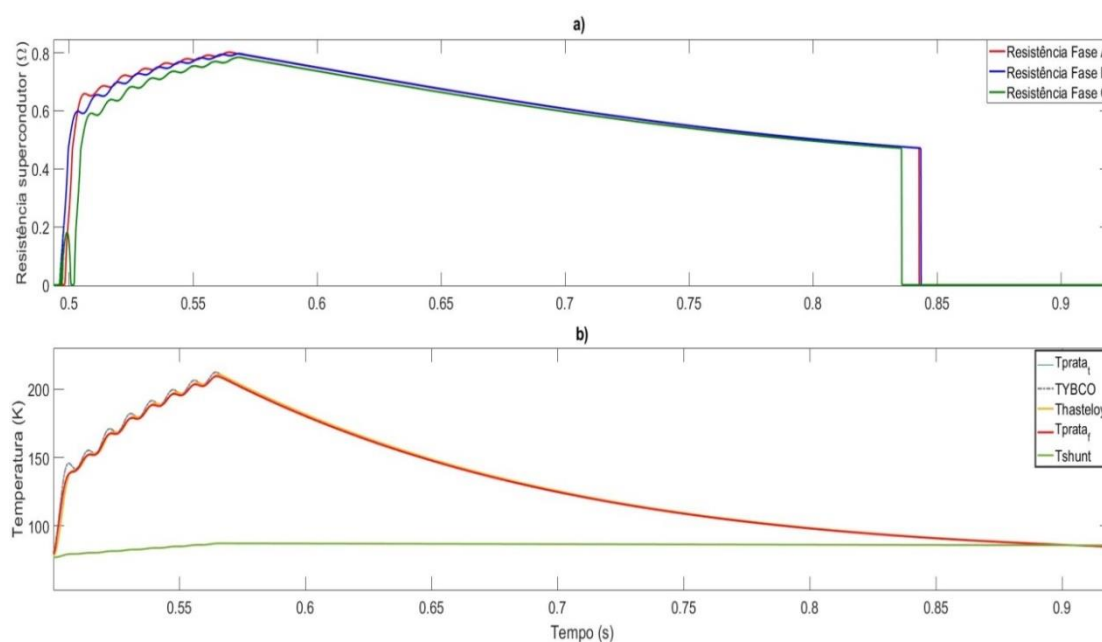


Figura 34 - a) Resistência equivalente do R-SFCL nas três fases. b) Temperatura em cada camada do R-SFCL durante o curto.

- **Chaveamento do curto no pico de tensão da fase A:**

O curto-circuito foi aplicado no momento que a tensão na fase A passava pelo pico de tensão. A Figura 35 apresenta o comportamento da corrente para esse cenário.

Nota-se que a corrente de curto-circuito para a ocorrência de um defeito durante a passagem da fase A pelo pico de tensão apresentado na Figura 35 possui comportamento similar para o defeito na passagem da fase A pelo zero tensão. Com a introdução do R-SFCL o valor da corrente de pico reduziu de 16,2 kA para 11,5 kA, uma redução de 29%, além disso, o curto foi extinto 4 ms após a abertura do disjuntor, eliminando o fenômeno de zeros atrasados que ocorria nos cenários 1 e 2. O desempenho do supercondutor R-SFCL e das suas respectivas variáveis é similar ao apresentado na Figura 34, atingindo uma temperatura máxima de 200 K, assim garantido a integridade do dispositivo durante a sua operação.

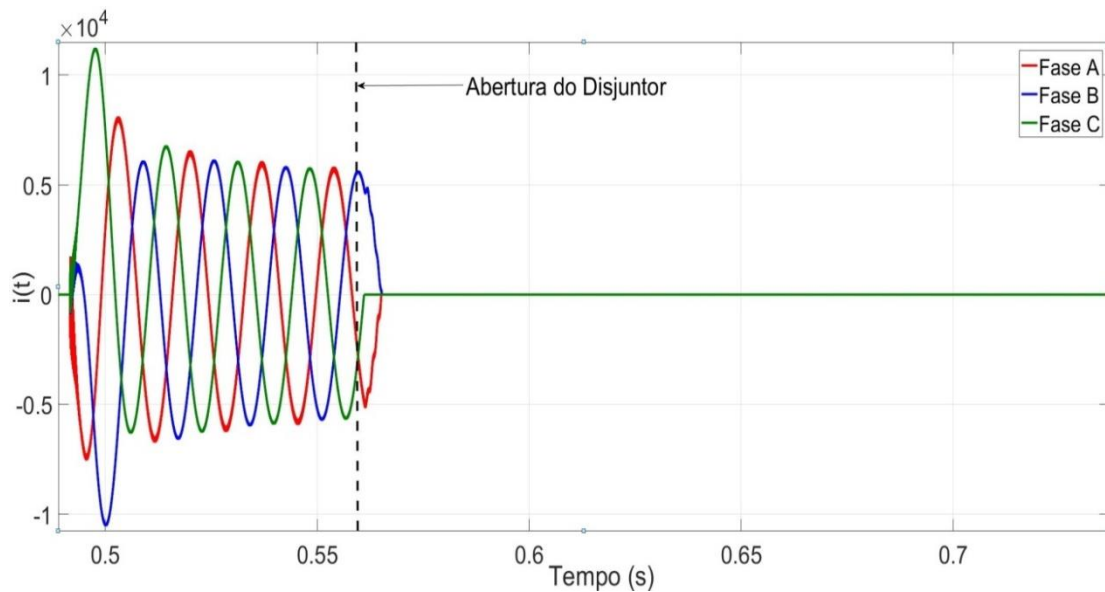


Figura 35 - Correntes de curto-circuito no pico de tensão para o cenário3.

- **Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico no zero de tensão:**

O curto-circuito bifásico (fases B e C) foi aplicado no momento que a tensão na fase B passava pelo zero de tensão evoluindo para um curto trifásico. A Figura 36 apresenta o comportamento das correntes para esse cenário de curto.

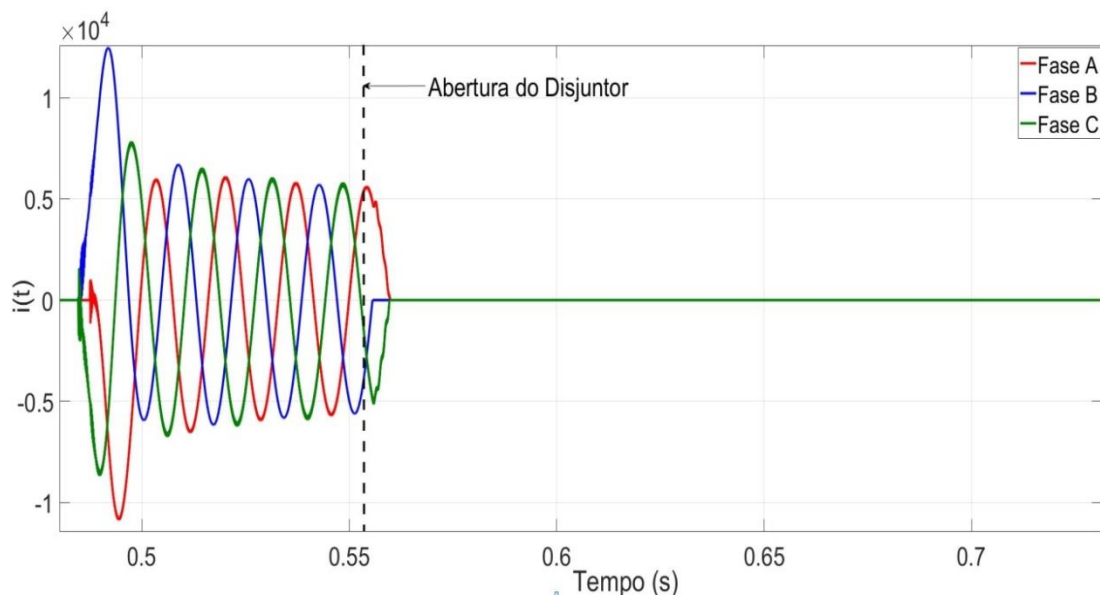


Figura 36 -Curto bifásico para trifásico no cenário com o R-SFCL no sistema elétrico.

Ao observar o comportamento das correntes na Figura 36 nota-se que mesmo no pior cenário de curto para o fenômeno de zeros atrasados, o R-SFCL mitigou a assimetria de corrente. A adição do R-SFCL em série com o circuito do gerador foi responsável pela redução do valor da corrente de pico 19,4 kA para 12,9 kA, além disso, o curto foi extinto 6 ms após a abertura do disjuntor, eliminando o fenômeno de zeros atrasados que ocorria nos cenários 1 e 2.

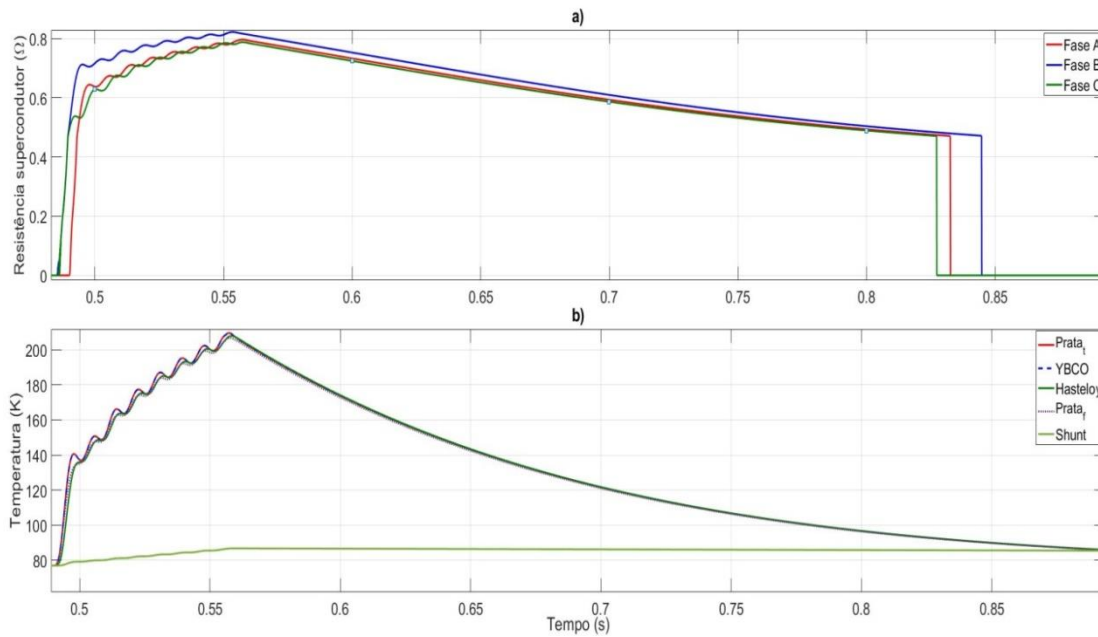


Figura 37 - a) Resistência equivalente do R-SFCL nas três fases. b) Temperatura em cada camada do R-SFCL durante o curto. (Cenário 3)

O desempenho do R-SFCL durante o curto-circuito é verificado na Figura 37 pela avaliação do comportamento das resistências e temperaturas da camada. Nota-se que no momento inicial do curto o limitador transita do estado supercondutor para o normal rapidamente, atingindo valores de 700 m Ω de resistência equivalente. A medição da temperatura de cada camada indica que não houve risco para integridade do R-SFCL durante a atuação do mesmo, pois a temperatura máxima atingida foi de 210 K, abaixo do limite térmico do equipamento.

A Figura 38 ilustra o comparativo da corrente prospectiva e a limitada pelo R-SFCL, considerando o pior cenário que é a evolução do curto bifásico para trifásico.

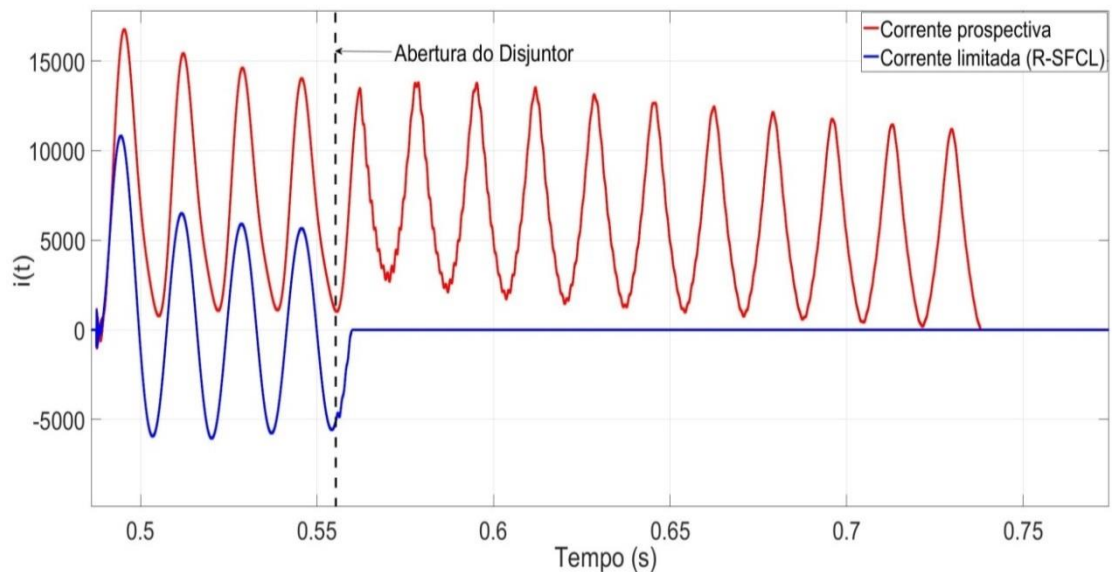


Figura 38 - Comparativo das correntes prospectivas e limitadas do curto bifásico para trifásico na fase A.

A introdução do R-SFCL no circuito em série com o gerador eliminou o fenômeno de zero atrasado e reduziu significativamente o valor da corrente de pico do primeiro ciclo permitindo redução de custos durante a fase do detalhamento no dimensionamento dos disjuntores e os outros equipamentos que compõem a instalação.

5.1.4. Cenário 4: Contribuição Motórica Curto nos Terminais do Gerador

Neste cenário será avaliado o efeito da contribuição do motor para o fenômeno dos zeros atrasados. Durante o curto-circuito, o motor de indução atua similarmente a um gerador de indução no período subtransitório contribuindo com uma parcela da corrente de defeito. No período transitório, a contribuição do motor cai rapidamente tendo uma forte influência no achatamento da componente CA da corrente de curto, podendo em alguns casos agravar o efeito de zeros atrasados [1, 8 , 9].

Similarmente a [1] foi implementado no software ATP um circuito para simular um curto-circuito em que ocorrem contribuições motóricas e avaliar a influência no fenômeno de zeros atrasados. O modelo no ATP é apresentado na Figura 39

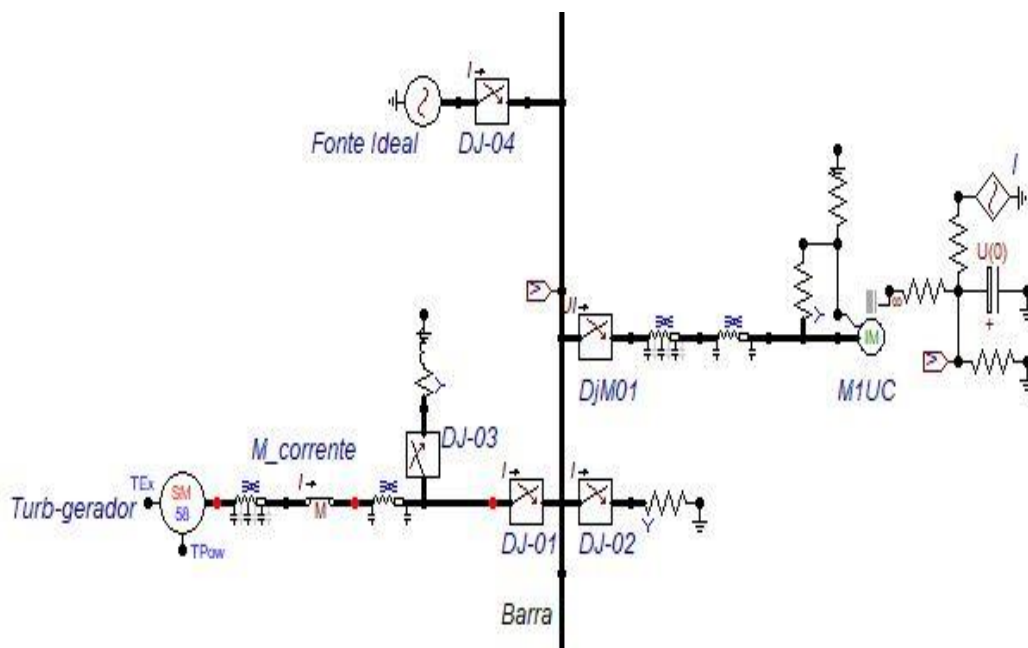


Figura 39 - Representação da simulação da contribuição motórica para um curto nos terminais do gerador.

Neste cenário o interesse para o estudo é avaliar o efeito da contribuição do motor durante o curto-circuito no terminal do gerador, não sendo do interesse a análise transitória da partida do motor assim foi utilizada como artifício uma fonte ideal para inicialização e partida do motor de indução representado por “M1UC” com os principais parâmetros indicados na Tabela 6, adaptado de [1]. Os disjuntores “DJ-04”, “DjM01” e

“DJ-03” estão fechados e os disjuntores “DJ-01” e “DJ-02” mantidos abertos, assim a fonte ideal é responsável pela partida do motor, o Turbo-gerador alimenta uma carga estática resistiva que demanda a mesma corrente do motor de indução em regime permanente.

Após o sistema atingir o regime permanente, os disjuntores “DJ-03” e “DJ-04” são abertos, ao mesmo tempo em que o disjuntor “DJ-01” é fechado, e o motor de indução é alimentado pelo Turbo-gerador. Para a simulação do curto a chave “DJ-02” é fechada no instante de tempo que emule um curto no zero de tensão, no pico de tensão e curto bifásico evolutivo para trifásico, assim é possível observar a resposta do sistema ao curto com a contribuição do motor no fenômeno de zeros atrasados.

Para a modelagem do motor de indução foi utilizado o componente “UM_3 – Induction Machine” do ATPdraw. A Tabela 6 apresenta os principais valores dos parâmetros do motor de indução utilizado na simulação, correspondente a um motor de indução de 7 MW; 13,8kV.

Tabela 6- Dados do motor de indução.

Dados Motor de Indução				
Potência (MW)	7		$L_{S_0} (H)$	0,0064
Tensão (kV)	13,8		$L_{S_d} (H)$	0,0064
$L_{M_d} (p.u.)$	0,271		$L_{S_q} (H)$	0,0064
$L_{M_q} (p.u.)$	0,271		$R_{r_d} (\Omega)$	0,117
$R_{S_0} (\Omega)$	0,092		$R_{r_q} (\Omega)$	0,117
$R_{S_d} (\Omega)$	0,092		$L_{r_d} (H)$	0,0063
$R_{S_q} (\Omega)$	0,092		$L_{r_q} (H)$	0,0063

As grandezas mecânicas são modeladas por componentes elétricos conectados no terminal do motor, onde a resistência elétrica representa o atrito do eixo, a inércia do motor e da carga no eixo pelo valor da capacitância, a velocidade pela tensão no capacitor e o torque no eixo pela fonte de corrente.

Será considerada na simulação a abertura do disjuntor do gerador “DJ-02” após 69 ms da ocorrência do curto-circuito, sendo esta abertura responsável por eliminar a falta e manter a integridade operacional do sistema elétrico.

- **Chaveamento do curto no zero de tensão:**

O curto-circuito foi aplicado no momento que a tensão na fase A passava pelo zero de tensão. A Figura 40 ilustra as correntes de curto-circuito para um defeito trifásico no momento que a fase A passa por zero, neste cenário o motor e o gerador contribuem para a corrente de curto.

A fase A apresentou o maior valor de pico de corrente, alcançando valores na ordem de 21,5 kA, sendo 26% superior ao valor de pico encontrado no cenário 1 para a mesma condição de curto, esse aumento é devido a contribuição motórica, além disso, apresentou a maior assimetria. No instante de tempo de 1,215 s ocorre a abertura do disjuntor “DJ-02”, a fase C é a primeira a cruzar o zero, as fases A e B também cruzam o zero e são extintas após 15 ms da abertura do disjuntor. Neste cenário conclui-se que não há risco de integridade do disjuntor, pois o mesmo é capaz de suportar 15 ms exposto ao arco, conforme informações contidas no catálogo do fabricante [16].

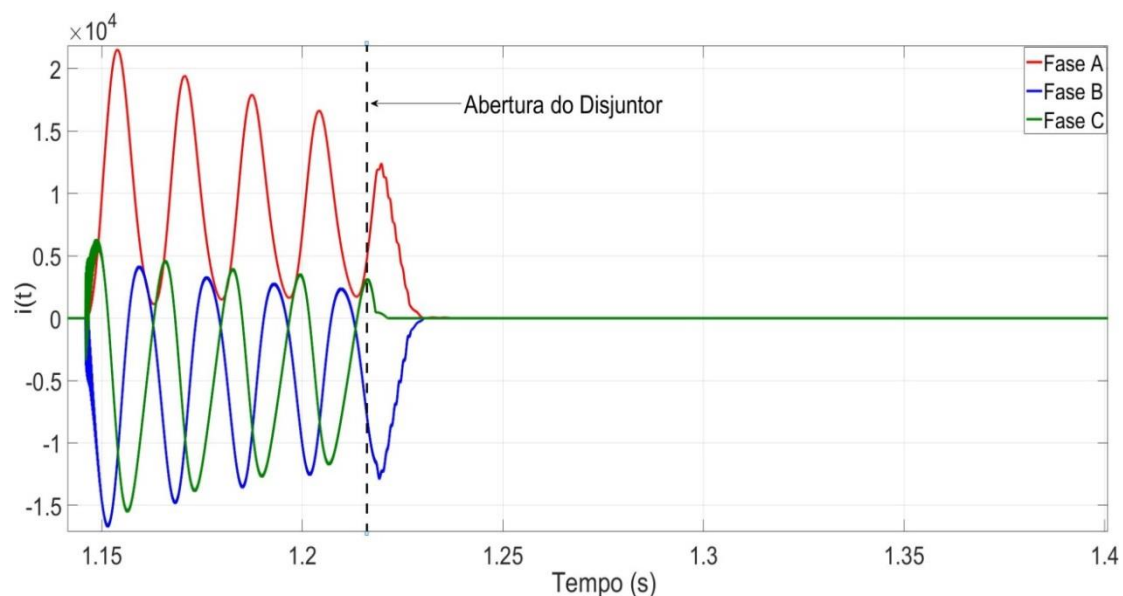


Figura 40 - Correntes de curto no zero de tensão da fase com a contribuição motórica.

- **Chaveamento do curto no pico de tensão:**

O curto-circuito foi aplicado no momento que a tensão na fase A passava pelo pico de tensão. A Figura 41 apresenta as correntes de curto-circuito a jusante do disjuntor “DJ-02” para a simulação de uma falta trifásica no momento que a fase A passava pelo pico de tensão, neste cenário o motor e o gerador contribuem para a corrente de curto.

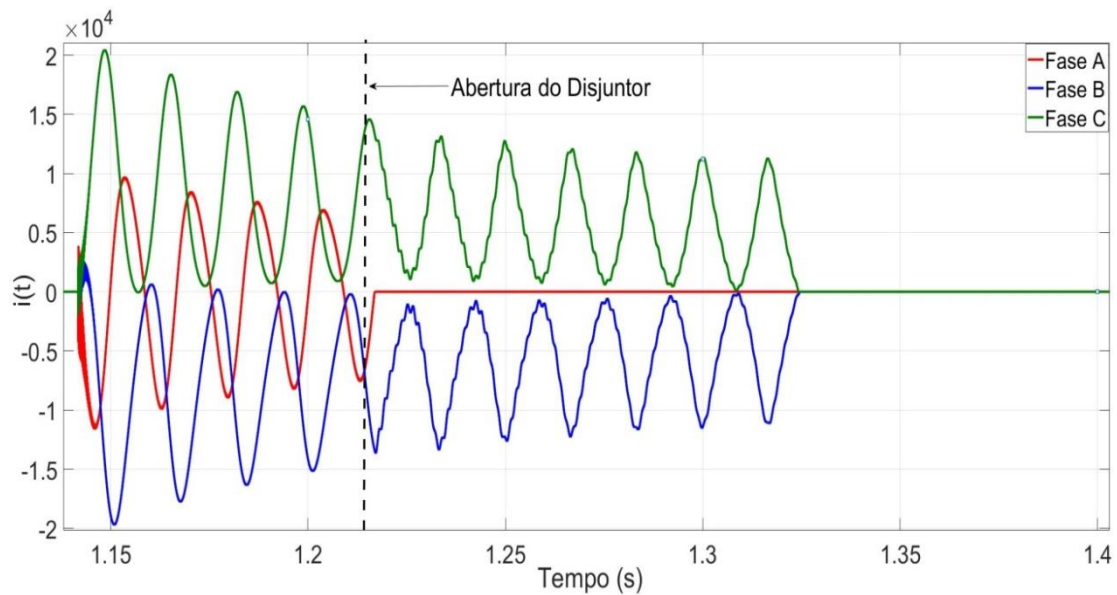


Figura 41 - Correntes de curto para uma falta no momento da passagem da fase A pelo pico de tensão.

Nota-se que a contribuição do motor para o curto-circuito piorou significativamente o fenômeno de zeros atrasados para as fases B e C, a fase A não apresenta assimetria e é a primeira a ser interrompida logo após a abertura do disjuntor. As fases B e C atingiram no primeiro ciclo valores de pico de corrente de 20,4 kA e durante a abertura do disjuntor tais fases demoraram em torno de 113 ms para cruzarem o zero e serem extinta, dessa forma os polos do disjuntor foram submetidos às correntes de arco durante esse período, colocando em risco a integridade do equipamento, conforme manual do equipamento [16].

Na Figura 42 é comparado o comportamento da corrente de curto (linha vermelha pontilhada), contribuição do gerador para o curto (linha tracejada em azul) e contribuição do motor (linha verde) com objetivo de observar o efeito da contribuição do motor no agravamento do fenômeno de zeros atrasados. Nos primeiros ciclos, as três correntes estão em fase e a corrente de curto atinge valores de pico em torno de 20,4 kA, após alguns ciclos, a contribuição motórica para o curto vai ficando fora de fase com a corrente oriunda do gerador, devido ao efeito de desaceleração do motor. Observa-se o rápido decaimento da componente alternada da corrente de curto, devido ao descasamento de fase entre a corrente motórica e a do gerador, potencializando o efeito de zeros atrasados no disjuntor.

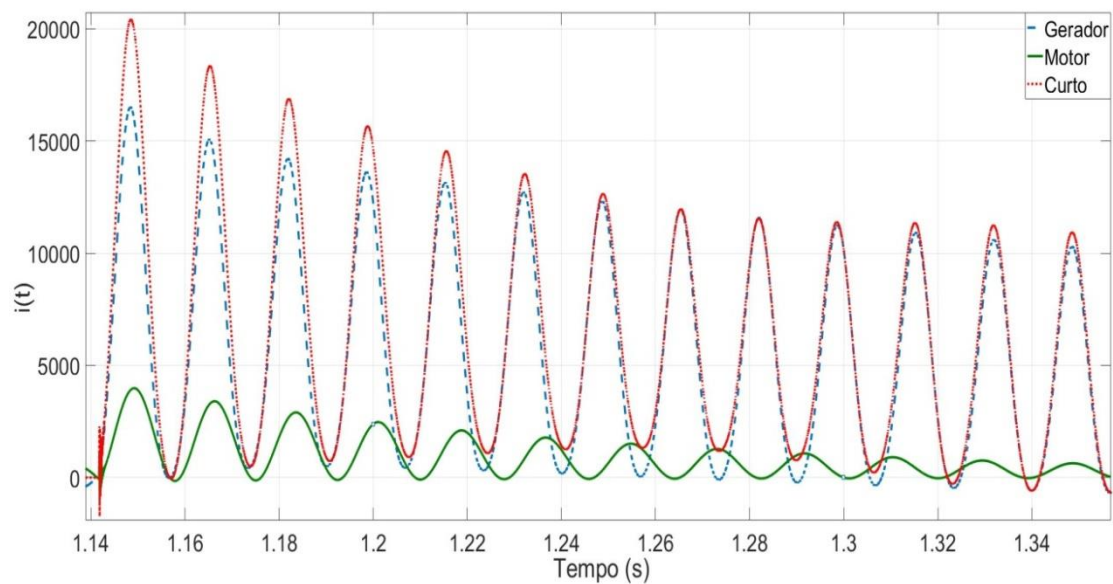


Figura 42 - Detalhamento das correntes de curto, do motor e do gerador.

- **Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico no zero de tensão:**

O curto-circuito bifásico (fases B e C) foi aplicado no momento que a tensão na fase B passava pelo zero de tensão evoluindo para um curto trifásico no momento que a fase A passava pelo zero de tensão. A Figura 43 apresenta as correntes de curto a jusante do disjuntor “DJ-02”.

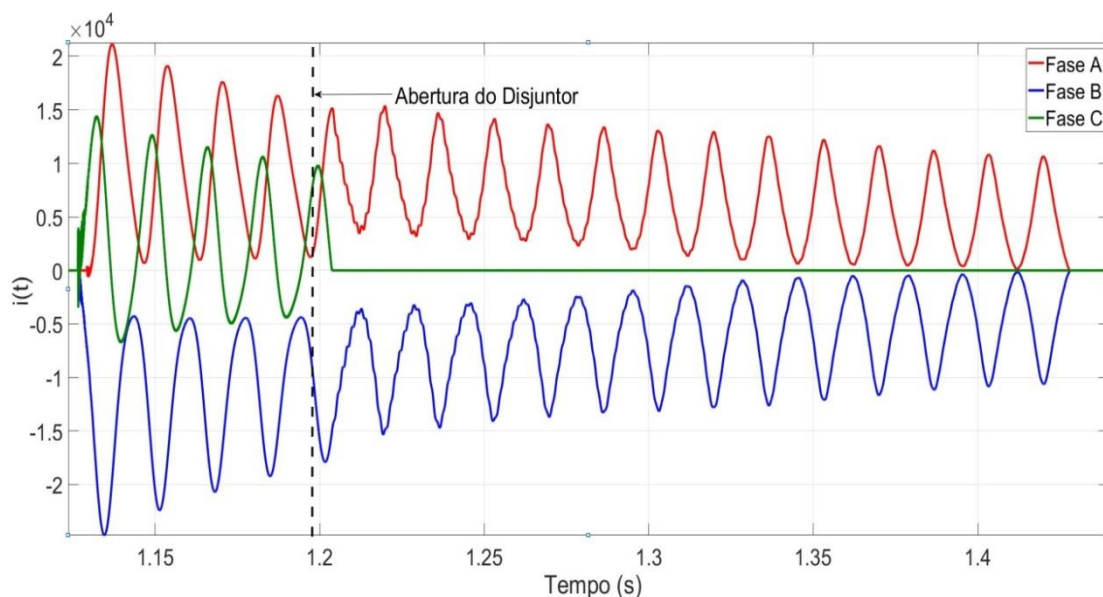


Figura 43 - Curto-circuito bifásico para trifásico (Cenário 4).

Conforme observado nos cenários anteriores o curto evolutivo foi o pior cenário para o fenômeno de zeros atrasados. Nota-se na Figura 43 que o cenário de curto bifásico evolutivo para trifásico com a contribuição motórica foi a pior condição encontrada, as fases A e B demoram em torno de 237 ms para cruzar o zero e serem

extinta. Neste cenário a fase B atingiu o maior valor de corrente de pico de primeiro ciclo, apresentando valores de 24,7 kA, o motor foi responsável pelo aumento de 27% do valor de corrente de pico e ampliou o tempo necessário para passagem da corrente por zero de 190 ms para 237 ms.

5.1.5. Cenário 5: Contribuição Motórica Simulando uma Resistência de Arco Durante a Abertura dos Disjuntores a Vácuo

O cenário 5 é implementado na simulação computacional do “ATPdraw” utilizando as mesmas premissas do cenário 4, porém é simulado a resistência do arco durante a abertura do disjuntor e será observado o comportamento da correntes de curto para uma falta trifásica na passagem no zero de tensão da fase A, no pico de tensão da fase A e um curto bifásico evolutivo para trifásico.

- **Chaveamento do curto no zero de tensão:**

A Figura 44 ilustra o comportamento das correntes para um curto-circuito a jusante do disjuntor “DJ-02” quando a tensão da fase A passava por zero.

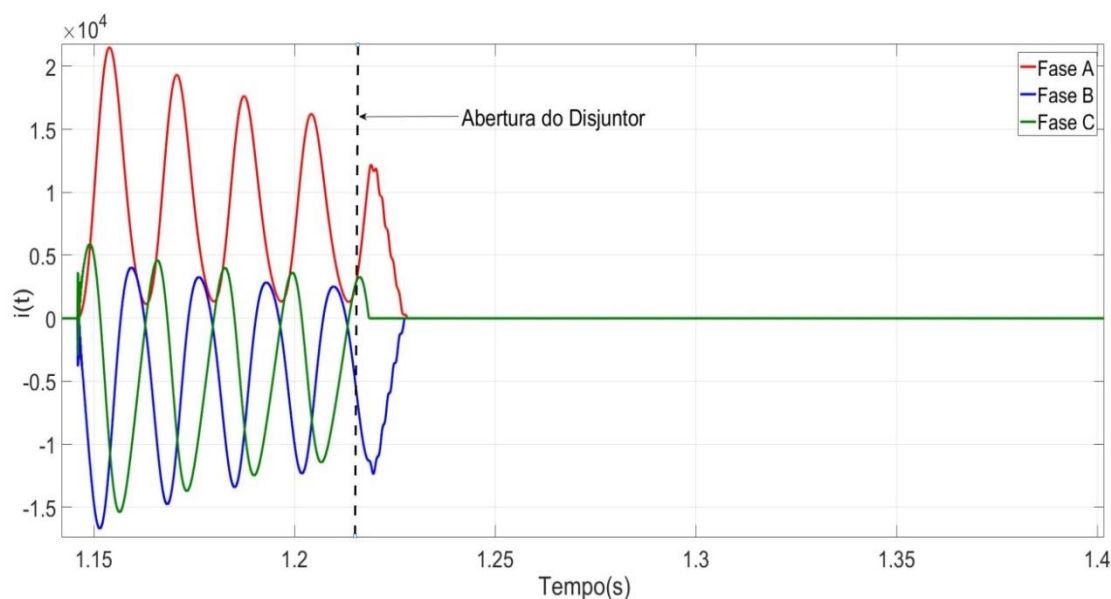


Figura 44 - Correntes de curto-circuito no zero de tensão da fase A para o cenário 5.

Neste cenário é avaliado se a resistência de arco contribui para redução do fenômeno de zeros atrasados, o disjuntor “DJ-02” foi responsável por identificar e eliminar o defeito. As correntes das fases A e B demoraram em torno de 15 ms para cruzarem o zero e serem extintas, sendo o tempo semelhante ao encontrado no cenário 4, o qual não considera a resistência de arco durante a abertura do disjuntor.

Para esse cenário a introdução da resistência de arco na abertura dos contatos não contribuiu para a redução do fenômeno de zeros atrasados.

- **Chaveamento do curto no pico de tensão:**

A Figura 45 ilustra o comportamento das correntes para um curto-circuito a jusante do disjuntor “DJ-02” quando a tensão da fase A passava pelo pico de tensão.

Após a abertura do disjuntor a corrente da fase A é logo extinta, pois não apresenta assimetria. As correntes de curto nas fases B e C levam em torno de 80 ms para cruzarem o zero após a abertura do disjuntor.

Observa-se que a introdução da resistência de arco neste cenário reduziu o tempo de extinção da corrente de curto-circuito de 113 ms para 80 ms, uma redução de 29% no tempo de exposição ao arco, porém não é suficiente para garantir a integridade do disjuntor, pois os fabricantes informam que os disjuntores são capazes de suportar no máximo 15 ms de arco sem risco de dano ao equipamento [16].

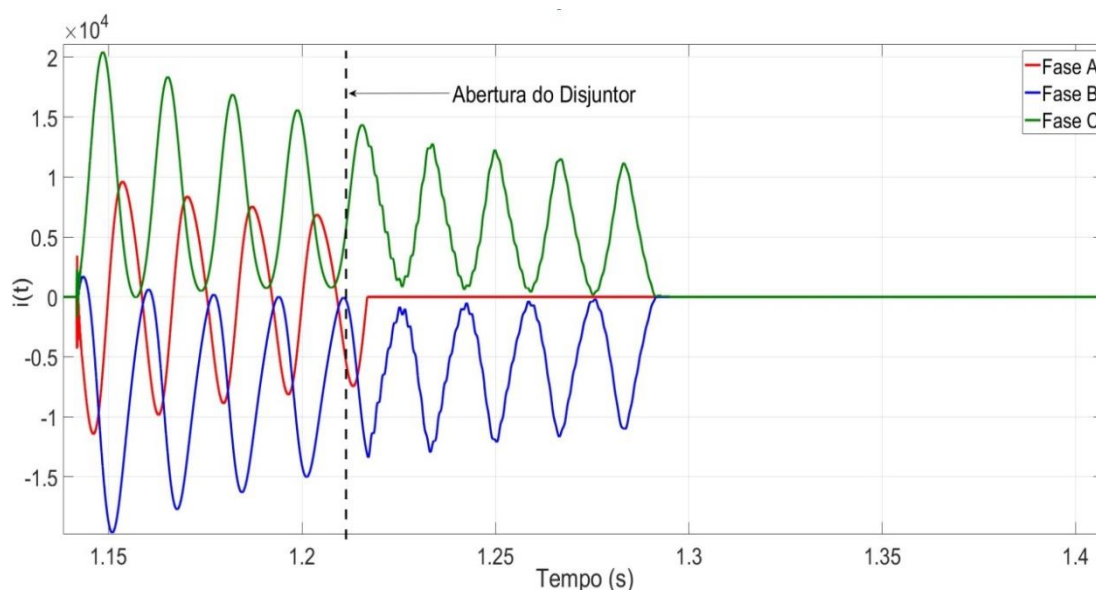


Figura 45 - Correntes de curto-circuito no pico de tensão da fase A para o cenário 5.

- **Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico no zero de tensão:**

O curto-circuito bifásico (fases B e C) foi aplicado no momento que a tensão na fase B passava pelo zero de tensão evoluindo para um curto trifásico no momento que a fase A passava pelo zero de tensão, semelhante ao cenário 4, porém será adicionalmente avaliado o efeito da introdução da resistência de arco nas correntes de curto após a abertura do disjuntor.

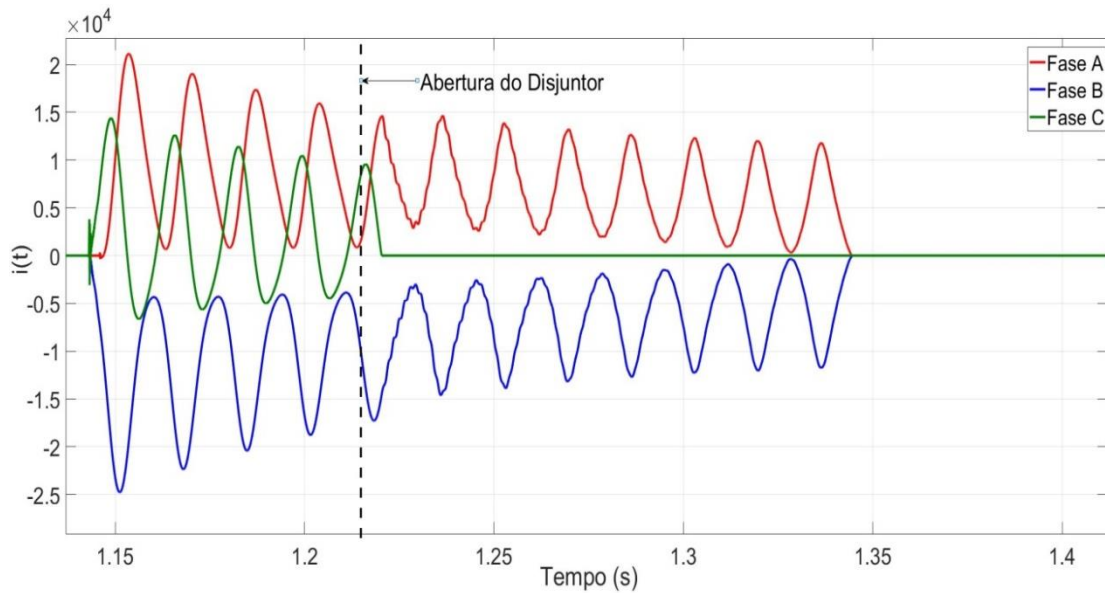


Figura 46 - Correntes de curto para uma falha evolutiva bifásica para trifásica, considerando a resistência de arco durante a abertura do disjuntor.

Conforme observado na Figura 46, as correntes nas fases A e B demoraram em torno de 129 ms para cruzarem o zero após a abertura do disjuntor. Comparativamente ao cenário 4, a introdução da resistência de arco reduziu o tempo de zeros atrasados de 237 ms para 129 ms, porém o tempo não é suficiente para garantir a integridade do disjuntor durante a sua operação para eliminar a falta.

A introdução da resistência de arco reduziu os tempos de Zeros Atrasados na maior parte dos cenários estudados, pois atua na redução da relação X/R do sistema, e consequentemente na assimetria de curto. Baseado nestes resultados será avaliado no cenário 6 a introdução dos limitadores supercondutores resistivos para avaliar o comportamento do R-SFCL para mitigar o fenômeno de zeros atrasados para um curto-circuito com contribuição motórica que foi a pior condição estudada nesta seção.

5.1.6. Cenário 6: Contribuição Motórica Com Dispositivo R-SFCL

Este cenário é similar ao cenário 4 anteriormente apresentado, porém é adicionado o dispositivo limitador R-SFCL em série com o gerador elétrico ilustrado na Figura 47. O dimensionamento do limitador supercondutor é o mesmo que foi apresentado no cenário 3.

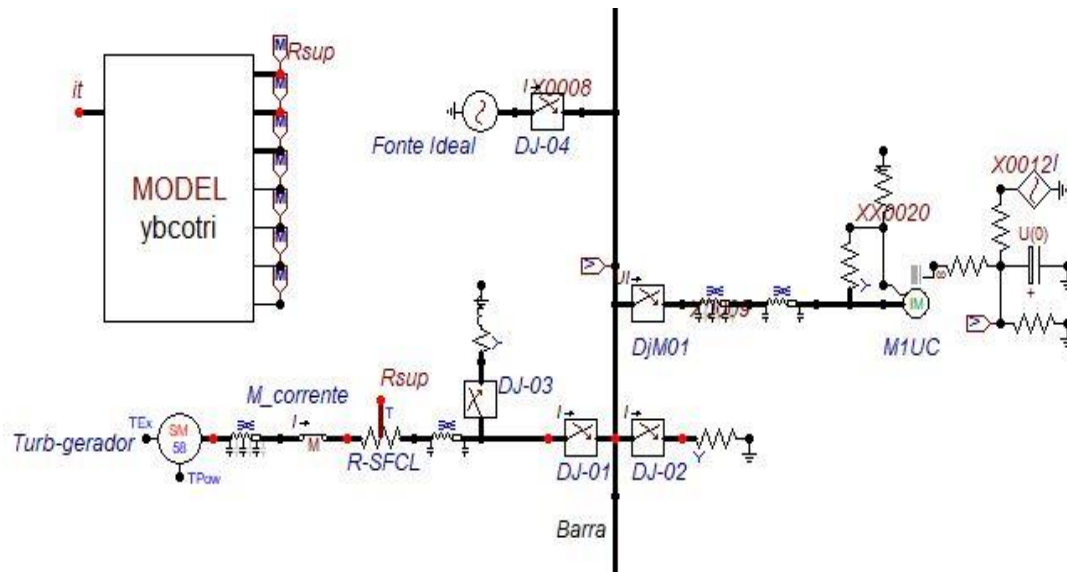


Figura 47 - Modelo para a simulação no ATP do cenário 6.

Conforme concluído pelos cenários anteriores o curto-circuito próximo a geração com a contribuição de carga motórica apresentou a pior condição para zeros atrasados, dessa forma será adicionado o limitador supercondutor em série com a geração com objetivo de verificar o desempenho em reduzir ou eliminar o fenômeno de zeros atrasados, para os casos de ocorrência de curto-circuito no momento da passagem da tensão por zero, pelo pico de tensão e para um defeito bifásico evolutivo para trifásico.

- **Chaveamento do curto no zero de tensão:**

A Figura 48 ilustra o comportamento das correntes para um curto-circuito a jusante do disjuntor “DJ-02” quando a tensão da fase A passava por zero.

Observa-se que ocorreu uma redução da assimetria das correntes de curto, devido à introdução de um valor adicional de resistência pelo R-SFCL. Comparativamente ao cenário 3 nota-se que a redução da assimetria das correntes de curto pela inserção do R-SFCL no circuito foi menos significativa, devido a contribuição das correntes motóricas.

Com o R-SFCL aplicado no circuito ocorreu uma redução do pico da corrente de curto de 1º ciclo para o valor de 15,7 kA, uma redução de 27% quando comparado com o cenário 4. O R-SFCL também reduziu o tempo para eliminar a falta do sistema, após a abertura do disjuntor o curto foi totalmente extinto em 6 ms.

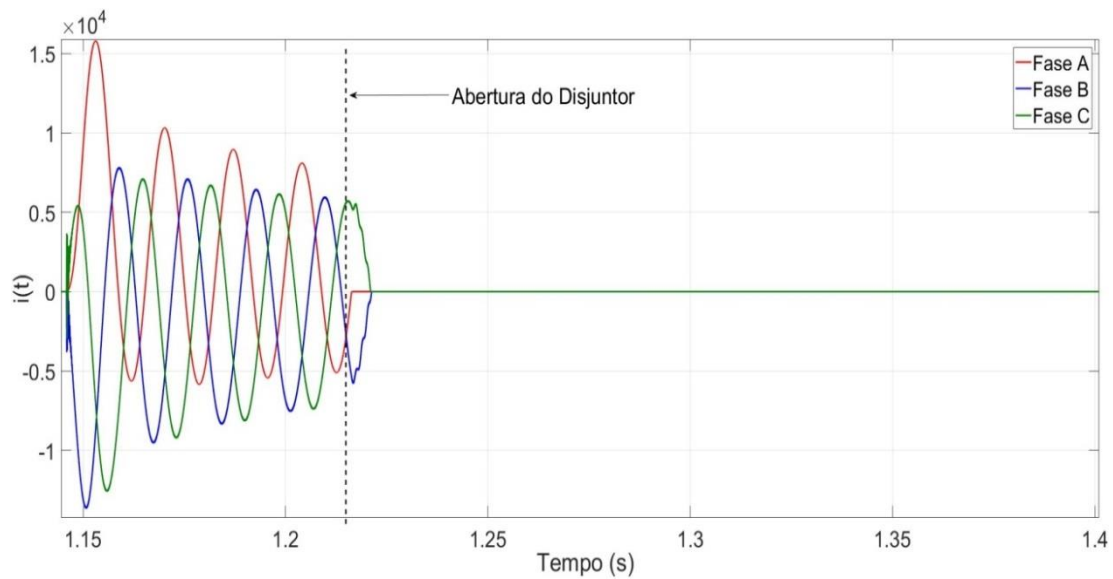


Figura 48 - Correntes de curto-circuito nos terminais do disjuntor "DJ-02" com o dispositivo R-SFCL no sistema.

- **Chaveamento do curto no pico de tensão:**

A Figura 49 ilustra o comportamento das correntes para um curto-circuito a jusante do disjuntor "DJ-02" quando a tensão da fase A passava pelo pico.

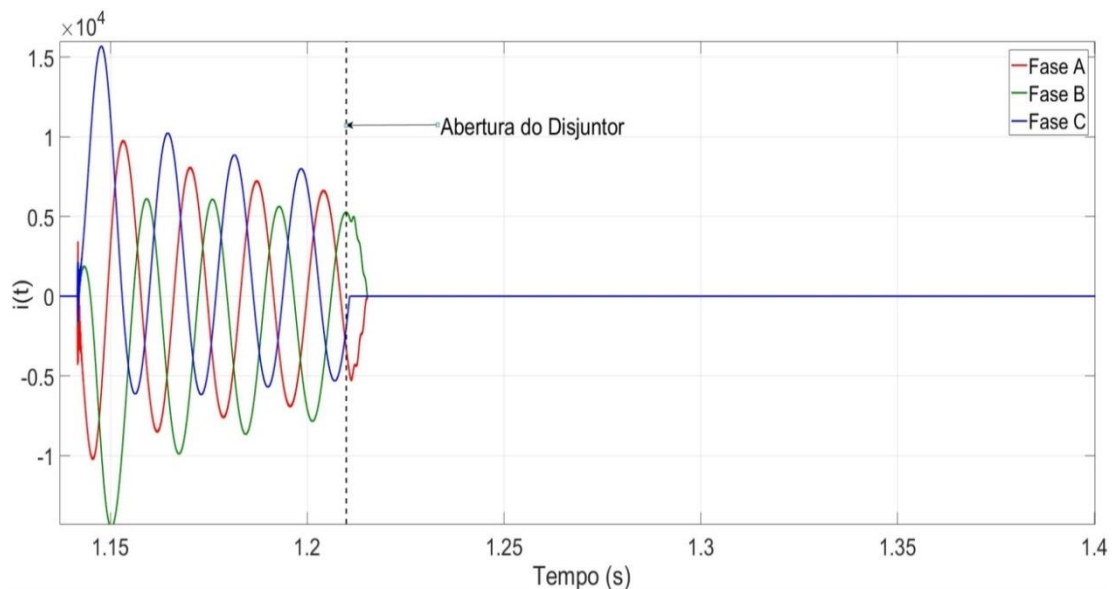


Figura 49 - Correntes de curto para uma falta no pico de tensão da fase A (Cenário 6).

Após a abertura do disjuntor, o defeito foi totalmente extinto em 5 ms, para essa mesma condição no cenário 4 foi observado o fenômeno de zeros atrasados, a introdução do R-SFCL no circuito reduziu a assimetria das correntes de curto eliminando o efeito de DCZ durante a abertura do disjuntor. Cabe mencionar também o efeito na redução do valor da corrente de pico de 1º ciclo para o valor de 15,6 kA,

uma redução de 24% do valor quando não é considerada a aplicação do R-SFCL no circuito.

- **Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico no zero de tensão:**

O curto-circuito bifásico (fases B e C) foi aplicado no momento que a tensão na fase B passava pelo zero de tensão evoluindo para um curto trifásico no momento que fase A passava pelo zero de tensão. Este cenário mostrou-se a pior condição para o fenômeno de zeros atrasados e será avaliado o desempenho do R-SFCL para atenuar ou eliminar tal fenômeno. A Figura 50 apresenta as correntes de curto no terminal do disjuntor “DJ-02”.

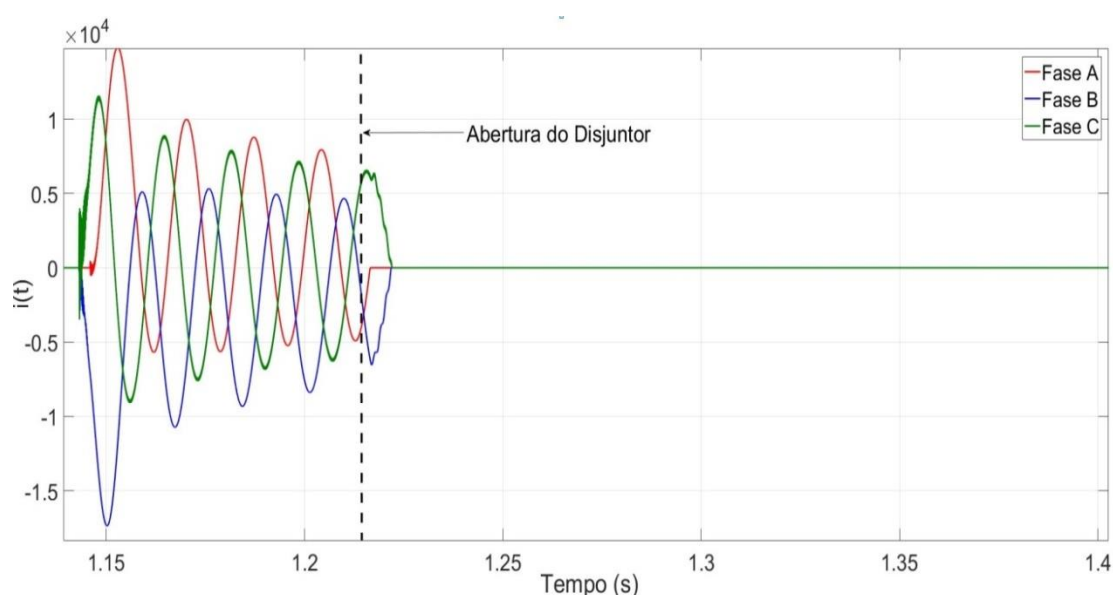


Figura 50 - Correntes de curto no terminal do disjuntor "DJ-02" para uma falta bifásica evoluindo para trifásica.

Nota-se na Figura 50 que não ocorreu o fenômeno de zeros atrasados quando inserido o dispositivo R-SFCL no circuito da geração, após a abertura do disjuntor o curto-circuito foi totalmente extinto em 7 ms. A fase B atingiu o maior valor de corrente de pico de 1º ciclo em torno de 17,3 kA, representando uma redução de 30% quando comparado a mesma condição de curto para o cenário 4.

Não existe risco de integridade para o disjuntor neste cenário durante a sua operação de abertura, pois o mesmo foi exposto ao arco durante 7 ms, e o mesmo é capaz de suportar correntes de arco durante 15 ms, conforme catalogo do fabricante [16].

A Figura 51 apresenta o comportamento do limitador supercondutor durante o curto-circuito através do valor da resistência equivalente e da elevação de temperatura em cada camada.

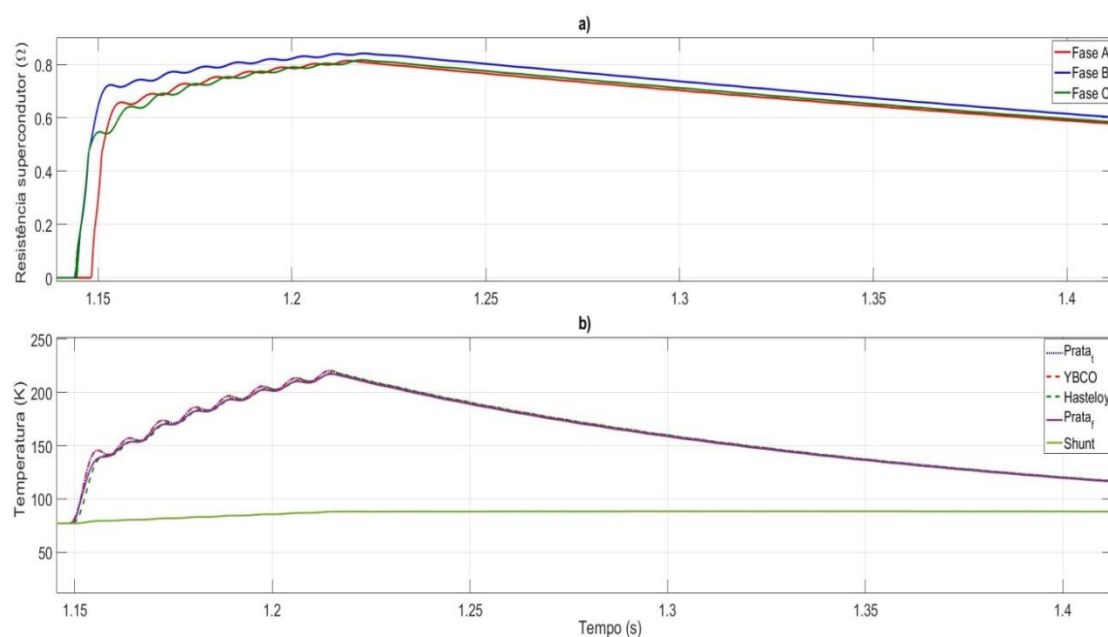


Figura 51 - a) Resistência equivalente do R-SFCL nas três fases. b) Temperatura em cada camada do R-SFCL durante o curto. (Cenário 6)

Nota-se que no momento inicial do curto o limitador transita do estado supercondutor para o normal em 1/4 de ciclo, atingindo valores de $800\text{ m}\Omega$ de resistência equivalente. A medição da temperatura de cada camada indica que não houve risco para integridade do R-SFCL durante a sua atuação, pois a temperatura máxima atingida foi de 220 K, abaixo do limite térmico de 400 K encontrado nos ensaios de curto-circuito apresentados em [32] sem degradação da fita.

A Figura 52 mostra o transitório de tensão nas três fases dos módulos limitadores durante o curto-circuito.

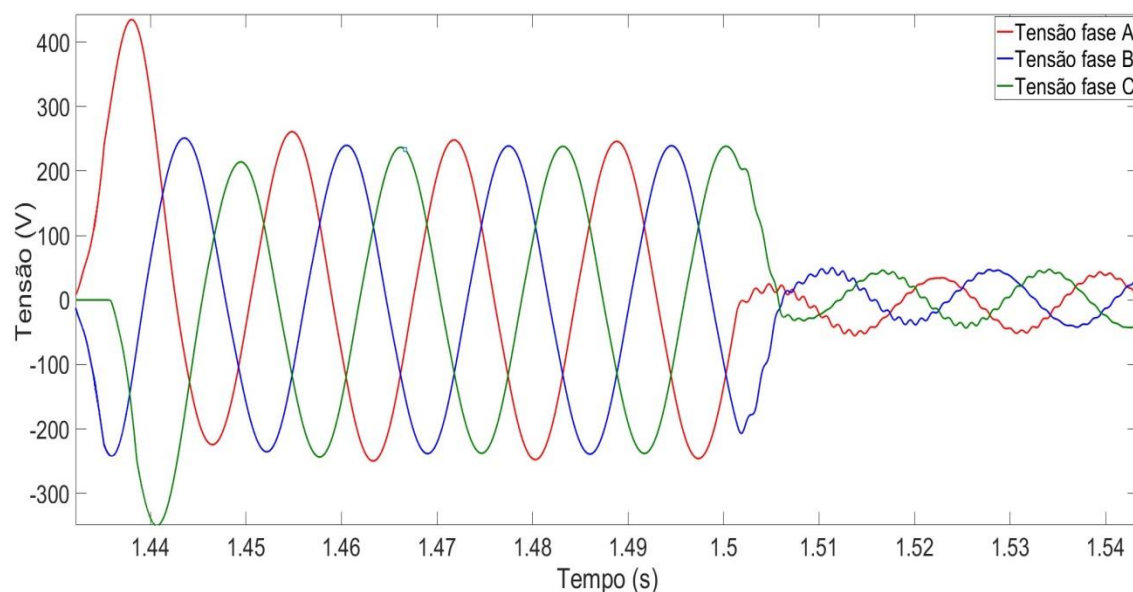


Figura 52 - Transitório de tensão nos terminais do R-SFCL.

O máximo valor de tensão transitória é encontrado na fase A durante o primeiro pico de curto-circuito, atingindo o valor máximo de 427 V, ou seja, dentro dos requisitos de especificação do equipamento.

Conforme observado nas simulações do cenário 6, o dispositivo R-SFCL desempenhou adequadamente sua função de redução nos valores de curto e na assimetria das correntes. Além disso, atingiu o objetivo de eliminar o fenômeno de zeros atrasados no pior cenário de curto conforme referências [1, 8, 9], garantindo uma operação segura do disjuntor durante a separação dos contatos para sanar a falta do sistema pela redução do tempo de exposição ao arco.

5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram estudados e simulados cenários de curto-circuito em um sistema com um único gerador e um segundo sistema que é considerado um motor de indução para avaliar os diversos fatores que mais influenciam no surgimento do fenômeno de Zeros Atrasados. Na Tabela 7 é apresentado um resumo do comparativo para o fenômeno de Zeros Atrasados em todos os cenários estudados.

Tabela 7 - Comparativo das correntes de curto e zeros atrasados.

Curto-Circuito				
Cenários	Aplicação do curto	Corrente de pico	Zero Atrasado	Tempo para cruzar zero(ms)
Cenário 1	Zero de tensão	17 kA	Não	12
	Pico de Tensão	16,2 kA	Sim	47
	Bifásico -> Trifásico	19,4 kA	Sim	190
Cenário 2	Zero de tensão	17 kA	Não	14
	Pico de Tensão	16,2 kA	Sim	31
	Bifásico -> Trifásico	19,4 kA	Sim	133
Cenário 3	Zero de tensão	11,6 kA	Não	5
	Pico de Tensão	11,5 kA	Não	4
	Bifásico -> Trifásico	12,9 kA	Não	6
Cenário 4	Zero de tensão	21,5 kA	Não	15
	Pico de Tensão	20,4 kA	Sim	113
	Bifásico -> Trifásico	24,7 kA	Sim	237
Cenário 5	Zero de tensão	21,5 kA	Não	15
	Pico de Tensão	20,4 kA	Sim	80
	Bifásico -> Trifásico	24,7 kA	Sim	129
Cenário 6	Zero de tensão	15,7 kA	Não	6
	Pico de Tensão	15,6kA	Não	5
	Bifásico -> Trifásico	17,3 kA	Não	7

No cenário 1 aplicou-se um curto-circuito trifásico no terminal de um gerador a vazio nos momentos em que a tensão da fase A passava pelo zero e pelo pico de

tensão e para uma falta evolutiva bifásica para trifásica. Observa que a pior condição para ocorrência de zeros atrasados ocorreu para a simulação de um defeito bifásico evolutivo para trifásico, cabe mencionar que no curto trifásico no momento que a fase A passava pelo pico de tensão também foi observado o fenômeno de zeros atrasados.

No cenário 2 foi emulado a resistência de arco entre os polos do disjuntor por meio de um valor de resistência constante ($3\text{ m}\Omega$) com o objetivo de avaliar o efeito na assimetria e na redução do tempo para a passagem por zero. Nota-se que a introdução da resistência de arco acarretou na diminuição do tempo para passagem por zero quando comparado com o cenário 1, porém não o suficiente para garantir a integridade do disjuntor durante sua operação.

No cenário 3 foi inserido no circuito o dispositivo limitador R-SFCL com objetivo de avaliar o seu desempenho durante o curto-circuito para eliminar o fenômeno de zeros atrasados. Nota-se que em todas as condições de curto estudadas, o limitador eliminou totalmente o zeros atrasados durante a abertura do disjuntor garantindo uma operação segura do equipamento.

O cenário 4 é similar ao cenário 1 adicionado de um motor de indução no circuito com objetivo de avaliar a influência do mesmo durante o curto-circuito. Nota-se que houve um aumento na corrente de pico de 1º ciclo com a contribuição motórica e o agravamento do fenômeno de zeros atrasados. Conforme foi apresentado este efeito é devido ao decaimento da frequência do motor durante o curto com o passar do tempo a contribuição do gerador e motor ficam fora de fase afastando a corrente de curto do seu valor zero.

O cenário 5 é similar ao cenário 4, porém é simulada uma resistência de arco durante a abertura do disjuntor. Conforme observado no cenário 2 e no cenário 5, a resistência de arco contribuiu para adiantar a passagem pelo zero da corrente de curto, mas não foi o suficiente para garantir uma operação segura para o disjuntor durante sua abertura.

No cenário 6 verificou-se que a introdução do dispositivo limitador R-SFCL em série com o circuito de geração eliminou o fenômeno de zeros atrasados e ainda reduziu o valor da corrente de pico de 1º ciclo. O R-SFCL mostrou resultados robustos para limitação do curto e na redução significativa das correntes assimétricas tornando-se uma alternativa tecnicamente viável como dispositivos limitadores de curto.

6. APLICAÇÃO DO R-SFCL E ESTUDOS DE ZEROS ATRASADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS TÍPICOS DE FPSOs

Em [1] foram avaliados os fatores que mais influenciam o fenômeno de zeros atrasados em um sistema elétrico típico de uma plataforma do tipo FPSOs. Os resultados obtidos levantaram um alerta sobre a possibilidade de ocorrência do fenômeno de zeros atrasados para faltas localizadas entre o gerador e o disjuntor do gerador, foram obtidos tempos de arco durante a abertura do disjuntor maior que o limite suportável informado pelo fornecedor do equipamento [16].

Em [1, 9, 12] constatou-se que para curto-circuitos evolutivos ocorreram correntes com zeros atrasados em diversas condições operacionais e para diferentes localizações da falta. Esta condição já era esperada pelos resultados obtidos neste trabalho no capítulo 5.

Devido à limitação de espaço físico em FPSOs, os disjuntores aplicados para a geração são o vácuo que não são adequados para utilizar com geradores, pois não suportam correntes de curto-circuito com zeros atrasados. Em [10] são apresentados resultados de laboratórios que os disjuntores a vácuo são capazes de suportar correntes de arco sem dano por até 45 ms em suas camaras internas por tempo maior que o definido no catalogo do fabricante [16].

Uma forma de mitigar esse problema no sistema elétrico é programar atrasos no tempo de atuação das proteções de curto-circuito evitando a região inicial de elevada assimetria. Outra alternativa é a inserir um reator no circuito elétrico da geração, porém a qualidade de energia seria degradada.

Em [2] é apresentado um estudo com aplicação do limitador supercondutor resistivo (R-SFCL) baseados em fitas 2G HTS em substituição ao dispositivo pirotécnico para limitação da corrente de curto no barramento principal da plataforma, no qual foram encontrados resultados promissores. No capítulo 5 deste trabalho foi aplicado o R-SFCL em série com a unidade geradora, os resultados das simulações demonstram que o limitador atuou com sucesso na redução da assimetria de corrente e eliminando o fenômeno de zeros atrasados.

Neste capítulo serão verificadas as condições com maior probabilidade de ocorrência de zeros atrasados em sistema elétrico do FPSO e a avaliar o desempenho da aplicação do R-SFCL no sistema elétrico para resolver este problema.

6.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO TÍPICO DO FPSO

6.1.1. Sistema Elétrico Típico Do FPSO

O sistema elétrico do FPSO é caracterizado por ser isolado e com geração própria possuindo equipamentos instalados em painéis de distribuição nos níveis de tensão de 13,8 kV, 4,16 kV, 690 V e 480 V.

O sistema de geração principal é constituído por quatro geradores elétricos de 31,25 MVA / 25 MW acionados por turbinas aeroderivadas bicomcombustível (gás ou óleo diesel). Os geradores estão conectados ao barramento principal de 13,8 kV da plataforma, podendo operar em paralelo, e também estão conectados os grandes motores da plataforma com potências nominais que variam de 1 MW até 11 MW.

O painel de 13.8 kV é denominado CDC (Centro de Distribuição e Controle), o qual é realizada a distribuição principal de energia para os outros painéis da unidade em níveis de tensão diferentes através de transformadores abaixadores de 13800 / 4.160 V, 13.800 / 690 V e 13.800 / 480 V possuindo topologia redundante e operam com 50% da carga. No nível de tensão de 4,16 kV fornecem energia para painéis denominados CCMs (Centro de Controle de Motores), no qual estão conectados motores cujas potências variam de 100 kW até 1200kW.

Os transformadores de 13.800 / 480 V são do tipo de três enrolamentos garantindo uma maior flexibilidade operacional e distribuem a energia para painéis CCMs que alimentam motores de menor potência, outros painéis para distribuição de energia em baixa tensão, cargas resistivas e de iluminação.

A Figura 53 apresenta o diagrama unifilar simplificado com objetivo de ilustrar a topologia do sistema elétrico da plataforma. Os sistemas de 13,8 KV e 4,16 kV são representados com maiores detalhes pois exercem maior influência no curto-circuito e no fenômeno de zeros atrasados que é o interesse deste trabalho. Os painéis de 480 V conectados aos transformadores TF-002A/B e TF-003A/B foram representados como cargas equivalentes, devido a sua baixa contribuição para a corrente de curto-circuito. Observa-se uma grande quantidade de motores de indução de potência nominal de 11 MW com o método de partida direta conectados diretamente ao painel de distribuição de 13,8 kV. Devido a proximidade física entre os motores e geradores, as distâncias são relativamente curtas. Há em torno de 200 metros de cabos que pouco contribuem para o aumento da resistência equivalente do sistema, tal que os níveis de curto-circuito atingem valores elevados (maiores que 50 kA) e com elevada assimetria.

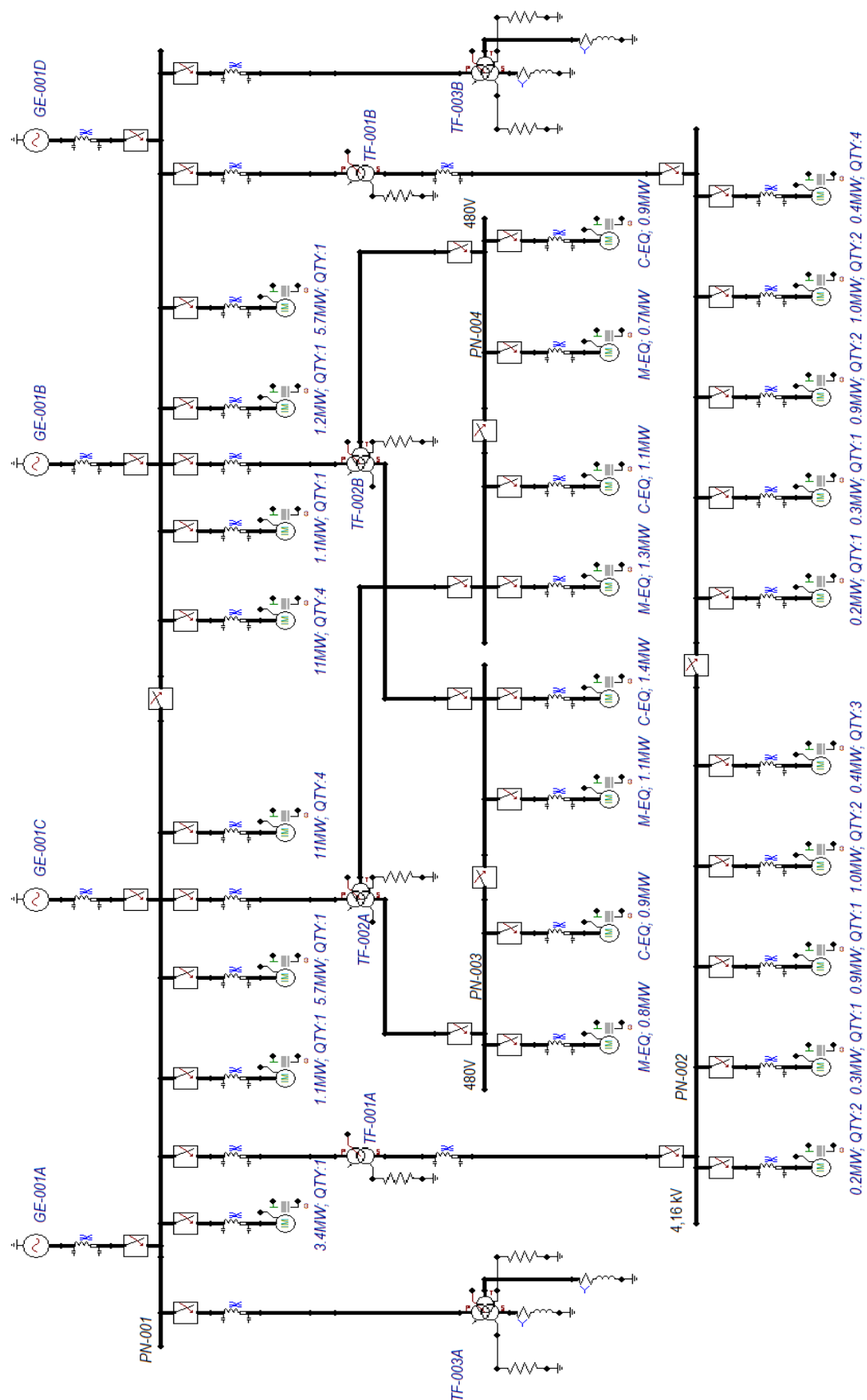


Figura 53 - Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico típico de um FPSO.

A impedância típica dos geradores utilizada na simulação tem como característica uma razão X/R elevada, contribuindo para correntes de curto-circuito com grande assimetria durante os primeiros ciclos. A assimetria torna-se uma premissa de projeto durante o dimensionamento dos equipamentos que devem ter maiores valores de capacidade de suportabilidade ao curto. Os disjuntores devem ser dimensionados para maiores valores de corrente de interrupção e requisitos especiais para aplicação em série com geradores, devido à necessidade de interrupção de correntes com grande assimetria que acarretam em formação de arco em suas câmaras internas até a passagem da corrente por zero.

Conforme apresentado em [2] as correntes de curto podem atingir valores de pico maiores que 130 kA e a corrente de interrupção simétrica valores acima de 50 kA na configuração com 3 ou 4 geradores em paralelo. Deve ser somada à corrente de curto a contribuição das cargas motóricas, pois tais motores atuam durante o defeito como geradores de indução, sendo mais uma fonte para alimentação do curto-circuito.

Cabe aqui mencionar que no período transitório do curto-circuito os motores desaceleram e a frequência da corrente gerada pelo motor cai abaixo da frequência do sistema ficando fora de fase com a corrente do gerador. Tal fenômeno acarreta na atenuação mais rápida da componente alternada com relação a componente contínua de curto tornando-se mais um fator de contribuição para o surgimento de correntes de zero atrasado.

Para atenuar o nível de curto-circuito no painel de 13,8 kV é atualmente utilizado nos sistemas elétricos do FPSO o dispositivo pirótecnico limitador de curto-circuito, conhecido pelo nome comercial de "*Is-Limiter*" [21].

O *Is-Limiter* é aplicado na interconexão entre as barras A e B do painel de 13,8kV, conforme observado na Figura 53, segregando as semibarras durante o curto-circuito em uma das barras reduzindo a contribuição de motores e geradores localizado na outra barra limitando a corrente de falta a valores menores que 50 kA_{RMS} e 130 kA_{pico} para atendimento a certificação do painel e manter a especificação dos equipamentos dentro dos valores nominais de mercado.

O princípio de funcionamento do *Is-Limiter* foi apresentado em 3.1.1 tem como principal característica a capacidade de detectar e interromper correntes de curto-circuito rapidamente, atuando em tempos menores que 1/4 de ciclo, ou seja em menos que 5 ms, limitando o pico de primeiro ciclo da corrente de curto-circuito. A desvantagem deste equipamento é que após a sua atuação o mesmo é destruído,

sendo necessário a sua substituição, acarretando em restrição operacional para o sistema elétrico da unidade.

6.1.2. Modelagem Do Sistema Elétrico Do FPSO

As simulações de curto-circuito para investigação dos cenários com probabilidade de ocorrência do fenômeno de zeros atrasados e para avaliação do desempenho da aplicação do limitador supercondutor resistivo R-SFCL no sistema elétrico de um FPSOs foram realizadas no software de simulação *ATPdraw*.

A modelagem do circuito e dos seus principais componentes como os geradores, motores, transformadores, cabos e disjuntores para a simulação do sistema elétrico da plataforma no *ATPdraw* com os pontos de aplicação da falta são apresentados na Figura 54.

Uma simplificação realizada é que os motores de baixa tensão (480 V e 690 V) não são modelados na simulação, devido à baixa contribuição para o curto-circuito no barramento de 13,8 kV. Os painéis de 480 V e 690 V são modelados como cargas de impedância constante conectados diretamente nos enrolamentos secundários e terciários dos respectivos transformadores, conforme se observa na Figura 54. Os valores de resistência e indutância inseridos no componente *RL* do *ATPdraw* devem ser tal que drenem a mesma corrente e com o mesmo fator de potência em regime permanente da condição nominal de operação do painel.

Os geradores GE-001A/B/C/D são implementados com os mesmos dados e parâmetros do gerador utilizado na simulação do capítulo 5 e apresentados na Tabela 5.

Os motores comportam-se de maneira distinta durante o curto-circuito. As características elétricas da máquina em conjunto com as dos cabos que conectam os motores aos painéis afetam diretamente a relação X/R do circuito contribuindo para maiores valores de pico da corrente de curto-circuito de 1º ciclo e na assimetria. As características mecânicas de cada conjunto motor elétrico e carga acionada representado pela inércia na simulação impactam na desaceleração, acarretando no descasamento de fase das correntes dos motores com a do gerador, o qual pode exercer influência no fenômeno de zeros atrasados.

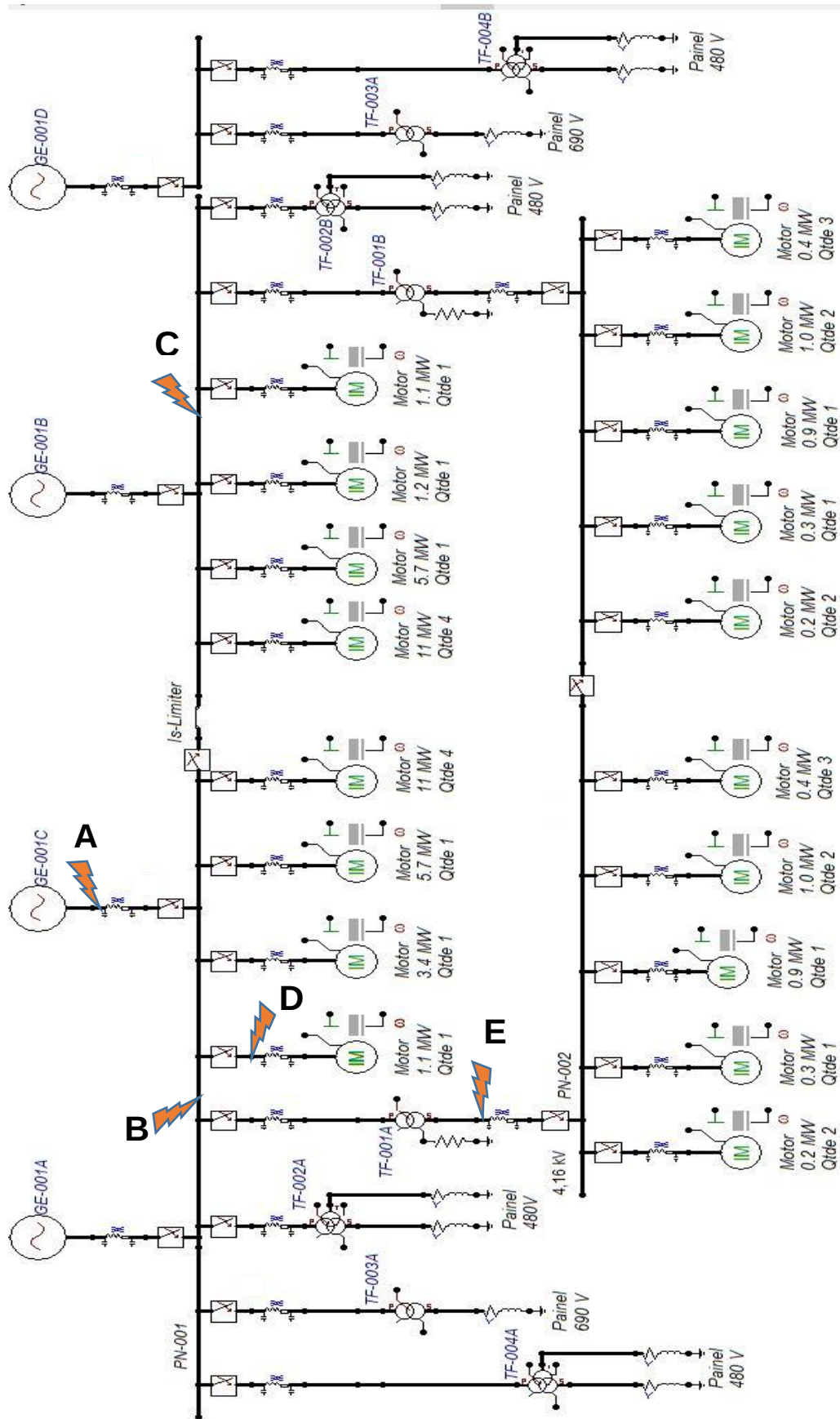


Figura 54 - Modelo unifilar do circuito elétrico do FPSO implementado na simulação.

Os motores de 13,8 kV exercem influência relevante no fenômeno de zeros atrasados durante o curto-circuito. Sendo assim, cada um deles é modelado individualmente na simulação com os valores dos seus parâmetros elétricos e mecânicos obtidos de [1, 2].

Os motores de 4,16 kV foram modelados como motores equivalentes, uma vez que não é esperado que tais motores influenciem no fenômenos de zeros atrasados. O transformador abaixador atenua a contribuição dos motores de 4,16 kV para um curto-circuito no sistema de 13,8 kV.

Para a modelagem do motor equivalente de 4,16 kV considerou a sua potência nominal igual ao do transformador que alimenta o painel. Os dados dos parâmetros elétricos do motor foram obtidos de dados de fabricante de motores nesta faixa de potência, seguindo as regras de agregação de motores mencionadas na norma [34].

A modelagem dos motores de indução da simulação implementada no *ATPdraw* utilizou o componente “*UM3 – Induction Machine. UM Type 3*”, os parâmetros elétricos de cada motor implementando no sistema de 13,8 kV e do motor equivalente de 4,16 kV são apresentados no anexo C.

Conforme mencionado em [1], o *ATPdraw* apresenta erro de convergência para a simulação com mais de três motores do tipo *Universal Machine*. Para contornar essa limitação é necessário inserir o componente “*LineZT_3 – Distributed parameters (Clarke) 3 phase Transposed*” entre o motor e a barra. Tal componente é uma linha trifásica transposta e os critérios para o seu dimensionamento são detalhados em [1]. Basicamente os parâmetros inseridos na linha devem ser ajustados para que o tempo de propagação da onda neste trecho da linha seja menor que o passo de integração utilizado na simulação.

As cargas de baixa tensão (480 V e 690 V) são modeladas como carga *RL* de impedância constante, a corrente drenada possui a mesma amplitude e fator de potência da corrente demandada prevista pelo projeto do respectivo painel. Os motores de baixa tensão pouco contribuem para o curto no sistema de 13,8 kV e a atenuação provocada pela impedância do transformador abaixador não influencia no fenômeno de zeros atrasados, assim a modelagem do sistema de baixa tensão como uma carga *RL* de impedância constante não afetará os resultados da simulação.

A modelagem correta dos cabos que conectam os motores e os geradores ao painel é de fundamental importância para análise dos fenômenos de zeros atrasados, pois os cabos inserem uma resistência no sistema que é responsável por amortecer a

assimetria das correntes de curto. Os cabos tiveram os dados das suas seções transversais e comprimentos retirados de [35, 36] que é baseado em um sistema elétrico de uma plataforma em operação.

A Tabela 8 apresenta os dados dos cabos elétricos utilizados na modelagem do sistema de 13,8 kV para conectar os motores e geradores ao painel, sendo utilizadas informações técnicas de catálogos dos fabricantes Nexans e Wirex [35, 36].

Tabela 8 - Dados dos cabos elétricos do sistema de 13,8 kV.

Parâmetros dos Cabos Elétricos						
Identificação	Seção Transversal	$R_+(\Omega/km)$	$X_+(\Omega/km)$	$R_0(\Omega/km)$	$X_0(\Omega/km)$	Fabricante
A001	70 mm ²	0,3349	0,1334	0,5443	0,3441	Wirex
A002	95 mm ²	0,2495	0,1271	0,3927	0,3265	Wirex
A003	120 mm ²	0,1988	0,119	0,3122	0,3265	Nexans
A004	185 mm ²	0,1294	0,1243	0,2039	0,2993	Wirex
A005	300 mm ²	0,0799	0,1186	0,1271	0,3017	Nexans

Os disjuntores foram modelados na simulação como chaves ideais com os tempos de abertura e fechamento controlado. Em [1] é mencionado que no sistema elétrico do FPSOs são utilizados disjuntores trifásicos a vácuo para controle e proteção do sistema elétrico. Segundo catalogo do fabricante [16] e resultados de testes de laboratório [19] é informado que o tempo total para a separação dos contatos do disjuntor está na faixa de tempo entre 33 ms a 63 ms. Conforme já mencionado no capítulo 5, o tempo de processamento de relé é algo em torno de 20 ms, e logo o tempo total de abertura do disjuntor após o curto-circuito varia de 53 ms a 83 ms. Será avaliado na simulação se o tempo de abertura exerce influência no fenômeno de zeros atrasados.

O *Is-Limiter* é modelado na simulação como uma chave ideal trifásica. O dispositivo só irá atuar para a condição operacional com 3 ou 4 geradores conectados no barramento, nas outras condições o mesmo é bloqueado. O tempo de abertura da chave que emula o *Is-Limiter* é programado para 4 ms após a detecção do curto, isolando as semi barras A.

Em [1] os estudos de zeros atrasados foram realizados sem necessidade de implementar os controles de tensão e frequência para o gerador. Assim, não foi necessário a modelagem do regulador de tensão e o controlador de velocidade do

turbo-gerador para análise de zeros atrasados durante o curto-circuito, pois a resposta do regulador ocorre em torno de 120 ms e para o controlador de velocidade o tempo é ainda maior, assim os fenômenos de zeros atrasados já teriam ocorrido antes da resposta dos controladores.

Porém, neste capítulo será simulada a introdução do limitador supercondutor resistivo para mitigação das correntes assimétricas e por consequência os fenômenos de zeros atrasados. Assim, além de avaliar o seu comportamento durante o curto-circuito, também deverá ser avaliado sua operação durante as correntes normais de operação do sistema nas condições mais críticas, como por exemplo, na partida de um motor de grande porte. O limitador supercondutor não deverá transitar para o estado normal durante as condições de operações nominais do sistema.

Para o estudo de partidas de motores é necessário modelar o controlador de velocidade e regulador de tensão do gerador. Estes controladores são implementados através da biblioteca “TACS” do *ATPdraw* e são utilizados na simulação da partida de motores em conjunto com a aplicação do R-SFCL no circuito elétrico. A modelagem detalhada é apresentada no anexo C.

6.2. SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO EM FPSOs

Com o intuito de verificar a existência de fenômenos de zeros atrasados em um sistema elétrico típico de um FPSO serão realizados estudos de curto-circuito neste sistema. A assimetria de corrente e por consequência a ocorrência dos fenômenos de zeros atrasados são influenciados pela condição operacional do sistema como a quantidade de geradores e motores em operação, a localização da falta e o instante de abertura do disjuntor.

6.2.1. Condições Operacionais

A condição operacional juntamente com a localização da falta exerce a maior influência no aumento de probabilidade de ocorrência de correntes com zeros atrasados no sistema elétrico.

As localizações das faltas que serão aplicadas no sistema elétrico do FPSO estão indicadas na Figura 54 e serão denominadas por **A**, **B**, **C**, **D** e **E**. Semelhante ao realizado no capítulo 5, serão aplicadas faltas trifásicas quando a tensão da barra estiver passando pelo zero e pelo pico de tensão na fase A e curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico.

- **A** – Falta localizada no terminal do gerador GE-001C a montante do disjuntor de interligação com o barramento;
- **B** – Falta localizada na barra A do sistema de 13,8 kV;
- **C** – Falta localizada na barra B do sistema de 13,8 kV;
- **D** – Falta localizada no terminal do disjuntor do motor de 1,1 MW;
- **E** – Falta localizada na barra do sistema de 4,16 kV.

Conforme supracitado já foram definidas as localizações e os tipos de curto-circuito que serão aplicados no sistema elétrico do FPSOs. Por fim são definidos as condições operacionais da planta em que serão simuladas os curtos-circuitos. Basicamente são três condições operacionais.

1. **Condição operacional 1:** Quatro geradores em paralelo no sistema elétrico com sete motores de 11 MW, dois motores de 5,7 MW, dois motores de 1,1 MW, um motor de 3,7 MW e um motor de 1,2 MW.
2. **Condição operacional 2:** Três geradores em paralelo (dois na barra A e um na barra B) no sistema elétrico com cinco motores de 11 MW, dois motores de 5,7 MW, dois motores de 1,1 MW, um motor de 3,7 MW e um motor de 1,2 MW.

6.2.2. Resultados Simulações

6.2.2.1. Condição Operacional 1

Nesta seção serão discutidos os resultados na condição operacional 1 e para o curto-circuito trifásico no momento em que a fase A passa pelo pico de tensão e o curto evolutivo, pois foram os piores cenários de faltas encontradas no capítulo 5 para a ocorrência do fenômeno de zeros atrasados.

• **Falta localizada no ponto A**

A falta trifásica localizada no ponto A da simulação expõe o disjuntor do gerador às condições mais severas de curto-circuito, pois a corrente que flui através do disjuntor é a soma da contribuição das correntes dos geradores em paralelo e de todos os motores conectados ao sistema no momento da falta.

A Figura 55 ilustra a corrente de curto-circuito no terminal do gerador GE-001C no para um defeito trifásico no momento que a fase A está no pico de tensão, considera que o disjuntor do gerador é responsável por identificar e eliminar defeito do sistema e

será considerado para efeito de simulação que o *Is-Limiter* não atuou. O tempo considerado para a abertura do disjuntor após a ocorrência da falta é de 68 ms.

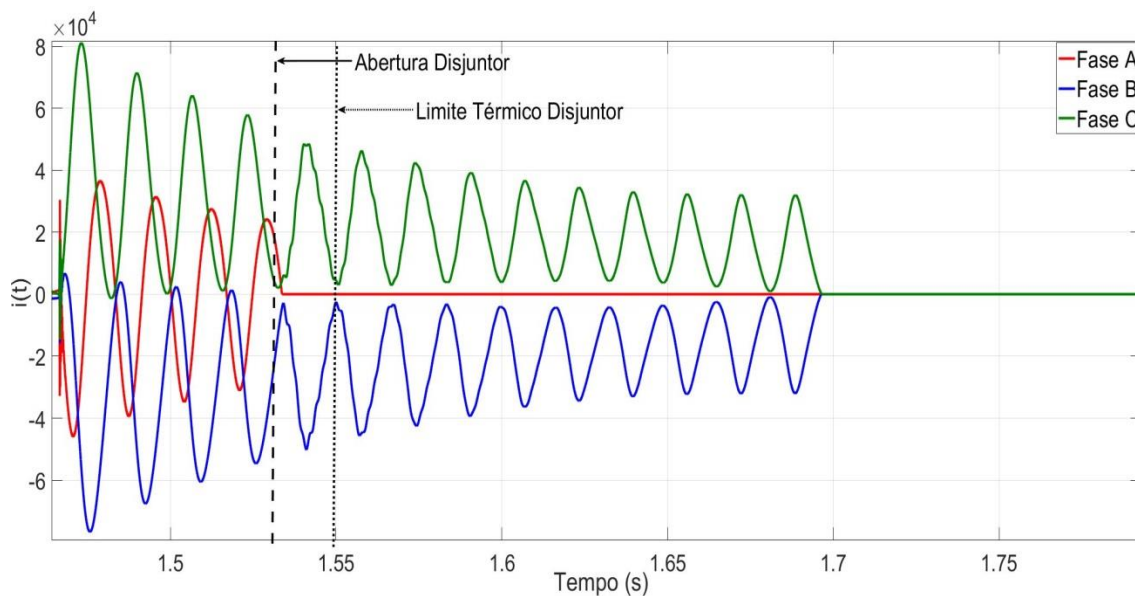


Figura 55 - Correntes de curto-circuito no disjuntor do gerador condição A.1.

Na Figura 55 é ilustrado as correntes de curto-circuito percorrendo o disjuntor do gerador 2 atingindo valores de pico de 1º ciclo de 80 kA, verifica-se que o mesmo é exposto a um tempo de arco interno em suas câmaras após a abertura do disjuntor de 162,7 ms. Este tempo é superior ao limite de exposição ao arco recomendado no catalogo do fabricante [16].

Na Figura 56 são apresentadas as correntes no terminal do gerador para o cenário A.1, porém o *Is-Limiter* atua 4 ms após o curto-circuito. Com a atuação do *Is-Limiter*, o tempo necessário para as correntes de curto cruzarem o zero foi de 178,9 ms, sendo maior que para o caso de falha de atuação do mesmo. Na abertura do dispositivo ocorre o isolamento das duas semibarras, assim apenas um único gerador, GE-001A, e os motores conectados a barra A contribui para o curto no terminal do gerador GE-001C, tornando o comportamento das contribuições motóricas mais influente o que favorece o deslocamento de fase entre as correntes do gerador e dos motores para o curto agravando o fenômeno de DCZ.

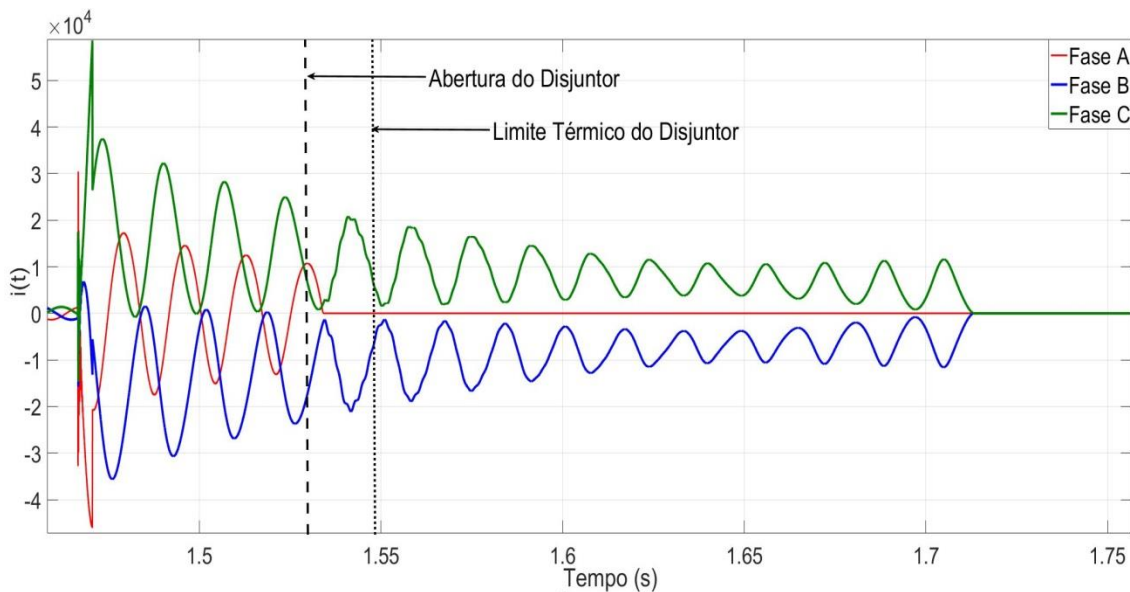


Figura 56 - Correntes de curto condição CO 1_A atuação Is-Limiter.

Observa-se na Figura 56 que o *Is-Limiter* atuou no primeiro quarto de ciclo limitando o valor de pico da corrente no 1º ciclo, sendo reduzido de 80 kA para 58,5 kA. Os resultados para o curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico e o curto trifásico no momento em que a fase A está no zero de tensão são apresentados a seguir na Tabela 9.

• Falta localizada no ponto B

A falta localizada na Barra A do sistema elétrico do sistema de 13,8 kV apresenta os maiores valores de corrente de curto-circuito, para essa condição os disjuntores dos geradores GE-001C e GE-001A e o *Is-Limiter* devem operar eliminando a falta e isolando a barra A.

Neste cenário, os disjuntores são responsáveis pela interrupção da corrente de curto-circuito dos seus respectivos geradores. Foram realizadas simulações com diversos tempos diferentes de abertura dos disjuntores do gerador, onde foi observado que para tempo de aberturas dos disjuntores maiores que 58 ms não há o fenômeno de zero atrasado, assim para a simulação foi considerado o tempo de abertura do disjuntor de 57,2 ms após o curto.

A escolha do tempo de abertura foi proposital para que a fase A fosse a primeira a ser extinta que é a pior condição para ocorrência de zeros atrasados, quando uma falta trifásica ocorre no momento que a fase A está no seu valor de pico, as fases B e C apresentam a maior assimetria e a fase A não possui assimetria. A Figura 57 ilustra as correntes no terminal do gerador GE-001A durante seu processo de abertura.

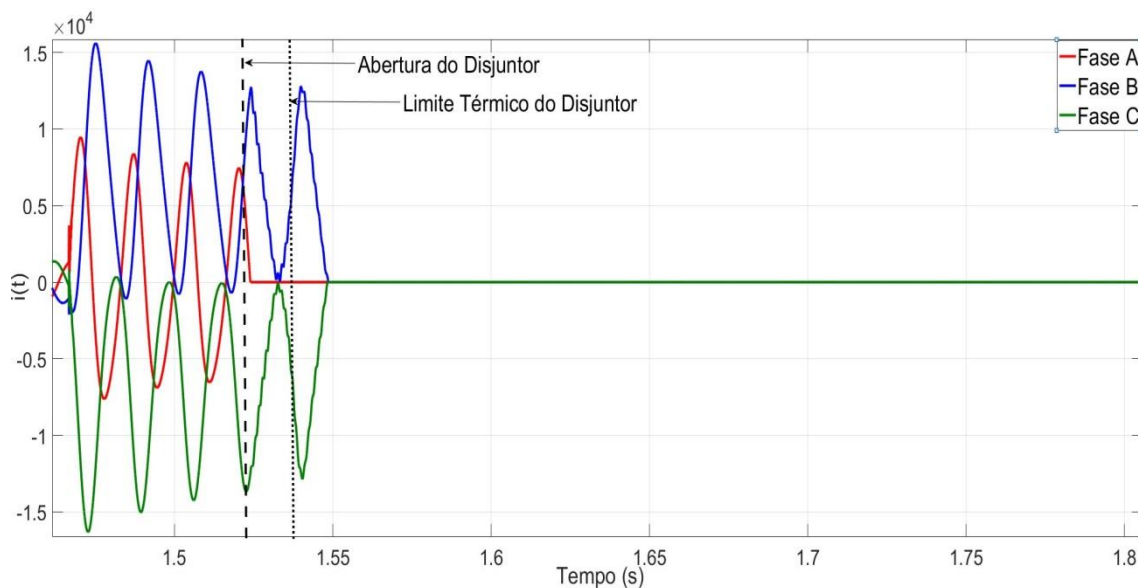


Figura 57 - Correntes de curto-circuito abertura do disjuntor do gerador GE-001C para falta trifásica.

A Figura 58 ilustra o comportamento sobre os disjuntores dos geradores durante o processo de abertura para o curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico.

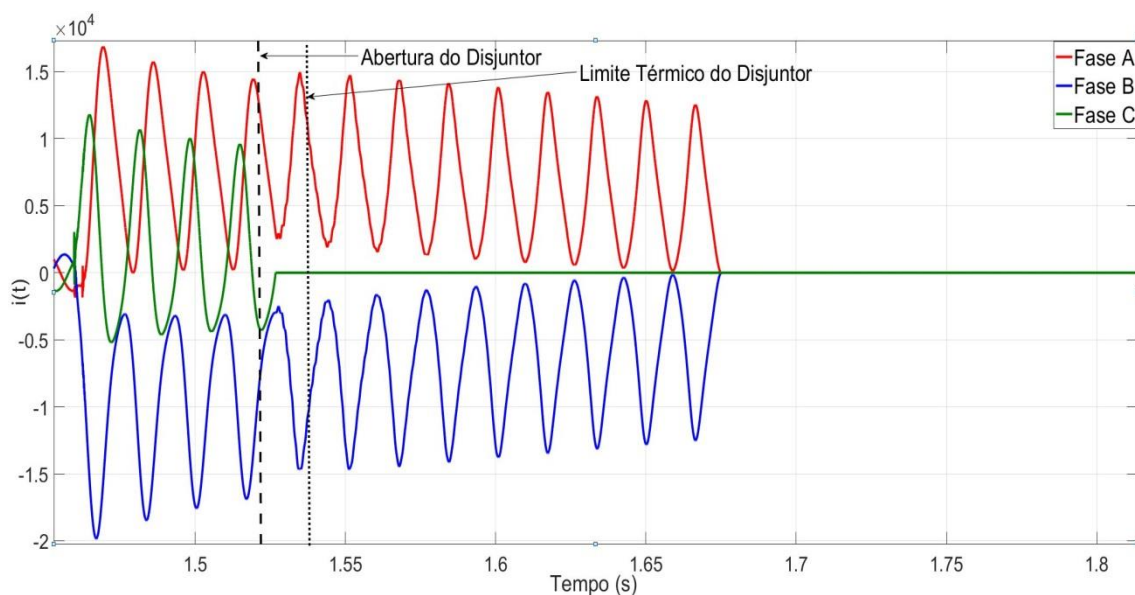


Figura 58 - Curto-circuito evolutivo para falha localizada em B.

Nota-se que após a abertura do disjuntor, os polos do mesmo ficaram submetidos ao arco elétrico durante 155 ms, tempo dez vezes maior que o limite máximo de suportabilidade ao arco informado pelo fabricante [15]. O curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico ilustra mais uma vez como uma condição severa de ocorrência de DCZ.

- **Falta localizada no ponto C**

Neste cenário a falta é localizada na barra B do sistema de 13,8 kV, o comportamento das correntes será similar ao discutido anteriormente para uma falta localizada na barra A. A topologia do sistema elétrico tem influência no comportamento das correntes de curto-circuito, na configuração simulada a barra B apresenta uma maior quantidade de motores conectados, dois motores adicionais, sendo um de 11 MW e outro de 3,7 MW. A Figura 59 ilustra as correntes de curto para uma falta trifásica no momento que a fase A passa pelo pico de tensão e para um curto evolutivo.

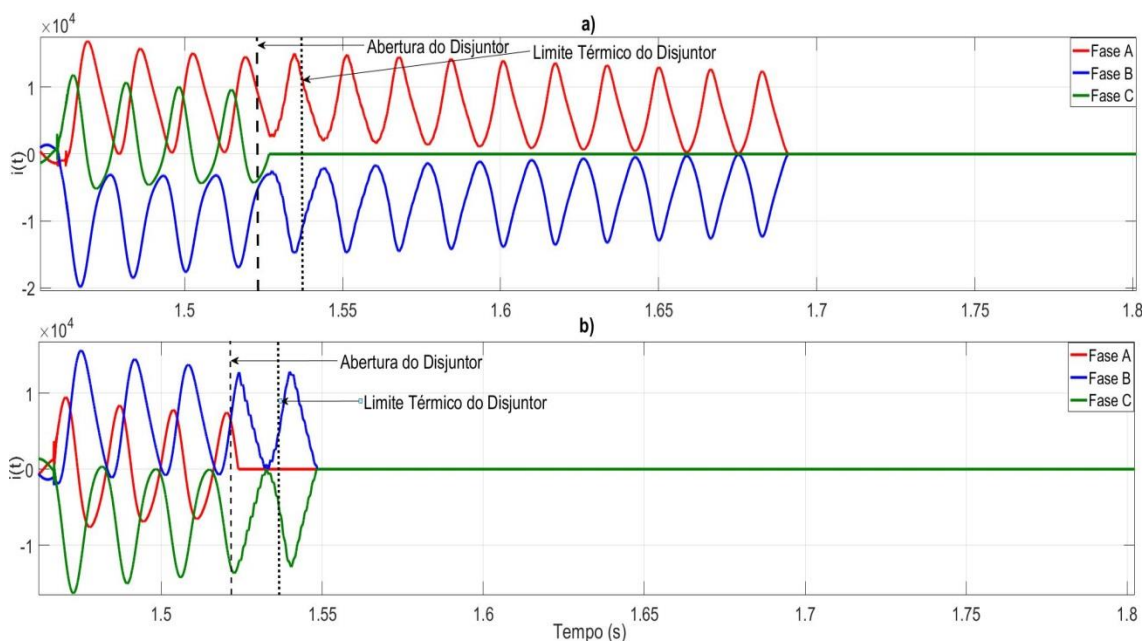


Figura 59 - a) Curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico. b) Curto-circuito no momento que a fase A está no pico de tensão.

Nota-se que uma maior quantidade de motores na barra B piorou o fenômeno de zeros atrasados quando comparados para a mesma condição de curto na barra A apresentada anteriormente. Na Figura 59 a) observa-se que para o caso do curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico, os motores adicionais aumentaram o tempo de zeros atrasados após a abertura do disjuntor para 212 ms, no caso do mesmo defeito na barra A este tempo foi de 155 ms.

• Falta localizada no ponto D

Os resultados encontrados para essa localização de falta é similar ao cenário para a falta localizada no ponto A, pois a corrente que percorre o disjuntor responsável por eliminar o curto é a soma das contribuições motóricas com as dos geradores. A Figura 60 apresenta os resultados obtidos para o curto-circuito trifásico no momento em que fase A está no pico de tensão e para o curto evolutivo. Observa-se a ocorrência dos fenômenos de zeros atrasados para tempos superiores a 163 ms colocando em risco a

integridade do disjuntor e o do painel. O disjuntor sofre os efeitos dos zeros atrasados para os dois tipos de falta apresentado na Figura 60, nesta condição há risco a integridade do equipamento.

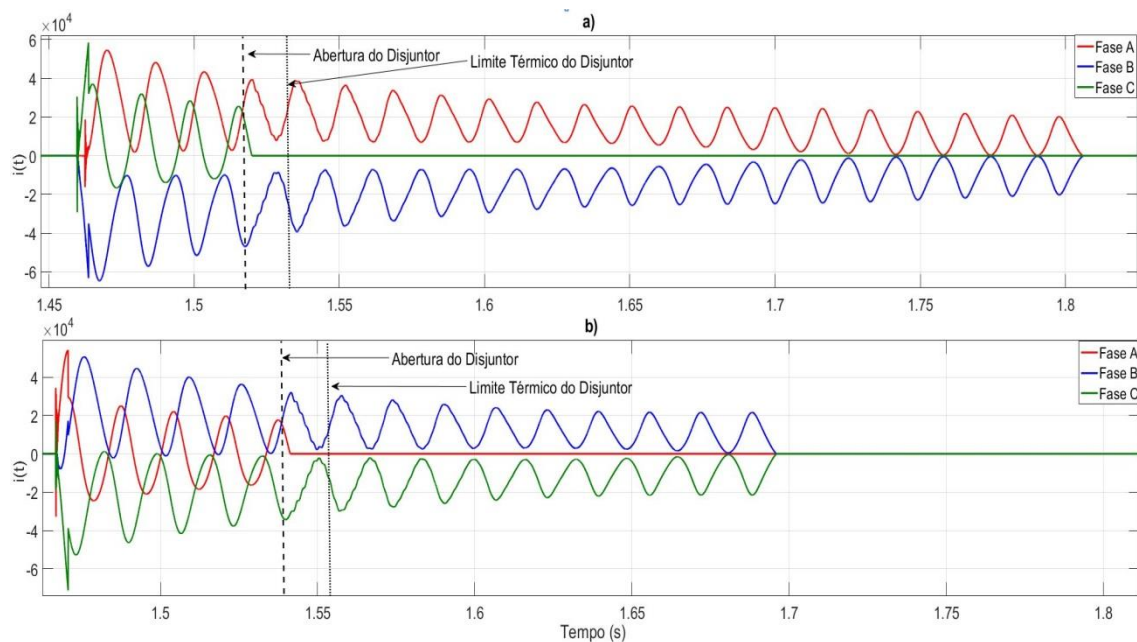


Figura 60 - a) Curto-circuito evolutivo para falta em D. b) Curto trifásico.

- **Falta localizada no ponto E**

Neste cenário de falta será avaliado se um curto-circuito no sistema de 4,16 kV influencia no fenômeno de zeros atrasados durante a abertura do disjuntor no sistema de 13,8 kV.

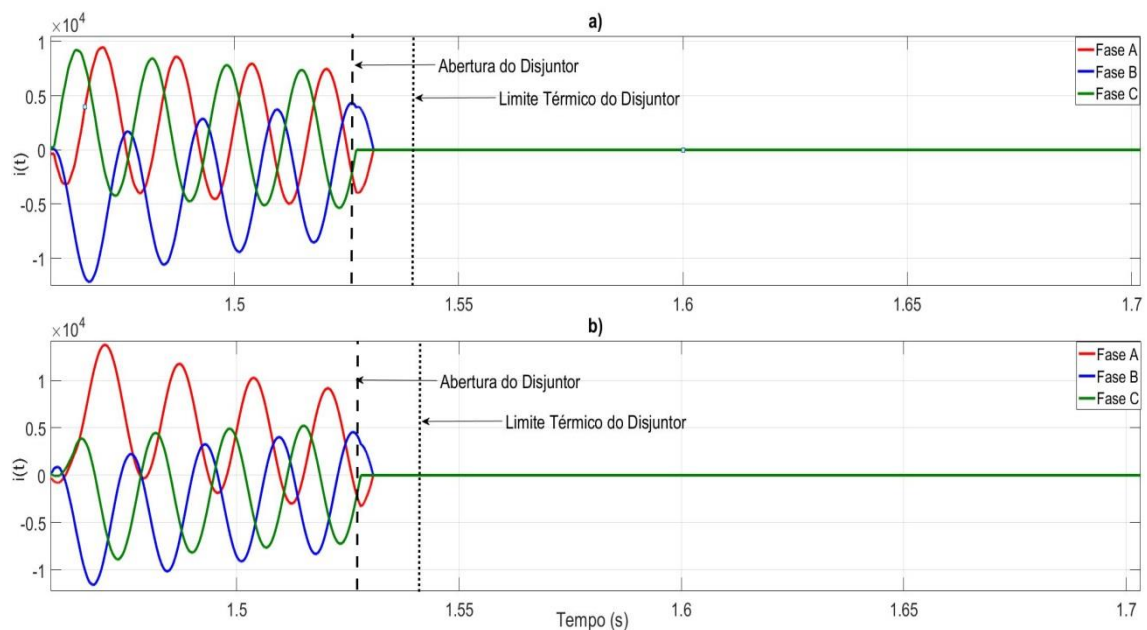


Figura 61 - a) Curto-circuito evolutivo no painel de 4,16 kV. b) Curto trifásico.

Considera neste cenário um curto-circuito a montante do disjuntor de entrada do painel 002 (4,16 kV), o equipamento responsável por eliminar a falta é o disjuntor de saída que alimenta o primário do transformador. Observa-se na Figura 61 que para a falta localizada em **E** não ocorreram zeros atrasados durante abertura do disjuntor, devido às impedâncias no caminho do curto-circuito dos cabos e transformadores.

A Tabela 9 resume os resultados encontrados para os diferentes tipos de curto-circuito e localizações, considerando o cenário em que o *Is-Limiter* opera corretamente e no outro sem operação do dispositivo com o objetivo de avaliar a efetividade do mesmo na limitação da corrente de pico.

Na Tabela 9 é inserida a coluna relativa ao tempo de arco nos polos do disjuntor, observa-se que exceto para a falta em **E** ocorreram zeros atrasados para todas outras localizações durante a abertura do disjuntor para os curtos-circuitos trifásico no pico de tensão e no curto evolutivo. Para o curto no momento que uma das fases passa pelo zero de tensão ocorreram os maiores valores de corrente de pico, porém não ocorreram zeros atrasados, similarmente aos resultados encontrados no capítulo 5.

Tabela 9 - Resultados para o curto-circuito na condição operacional 1.

Estudo de Curto Circuito						
Condição Operacional	Localização da Falta	Tipo de curto	Máxima corrente de pico de curto com Limiter (kA)	Máximo valor corrente de pico de curto (kA)	Tempo para cruzar o zero (ms)	Limite de tempo exposição ao arco excedido
CO 1	A	Zero Tensão	60,5	84,8	11,9	Não
		Pico de Tensão	58,5	80,7	178,9	Sim
		Evolutivo	52,7	98,5	323	Sim
	B	Zero Tensão	72,9	101,7	5,3	Não
		Pico de Tensão	71,6	96,9	24,6	Sim
		Evolutivo	65,2	118,5	155,3	Sim
	C	Zero Tensão	73	101,7	9,6	Não
		Pico de Tensão	71,6	96,9	29,1	Sim
		Evolutivo	63,6	118,5	212,1	Sim
	D	Zero Tensão	73,1	101,1	12,6	Não
		Pico de Tensão	71,3	96,1	161,3	Sim
		Evolutivo	65,3	118,4	286,8	Sim
	E	Zero Tensão	xxxxxxxx	47,8	5,6	Não
		Pico de Tensão	xxxxxxxx	44,4	4,6	Não
		Evolutivo	xxxxxxxx	54	4,3	Não

Para falta localizada em **E**, o *Is-Limiter* não opera, dessa forma não é preenchido na tabela os resultados de máxima corrente de pico de curto com o *Is-limiter*.

Para as faltas trifásicas no pico de tensão localizadas em **B** e **C**, o instante de abertura do disjuntor determinará se ocorrerão zeros atrasados ou não. A Figura 62

apresenta a influência do instante de abertura do disjuntor no comportamento das correntes de curto-circuito para um defeito localizado em **B** na condição operacional **CO 1**.

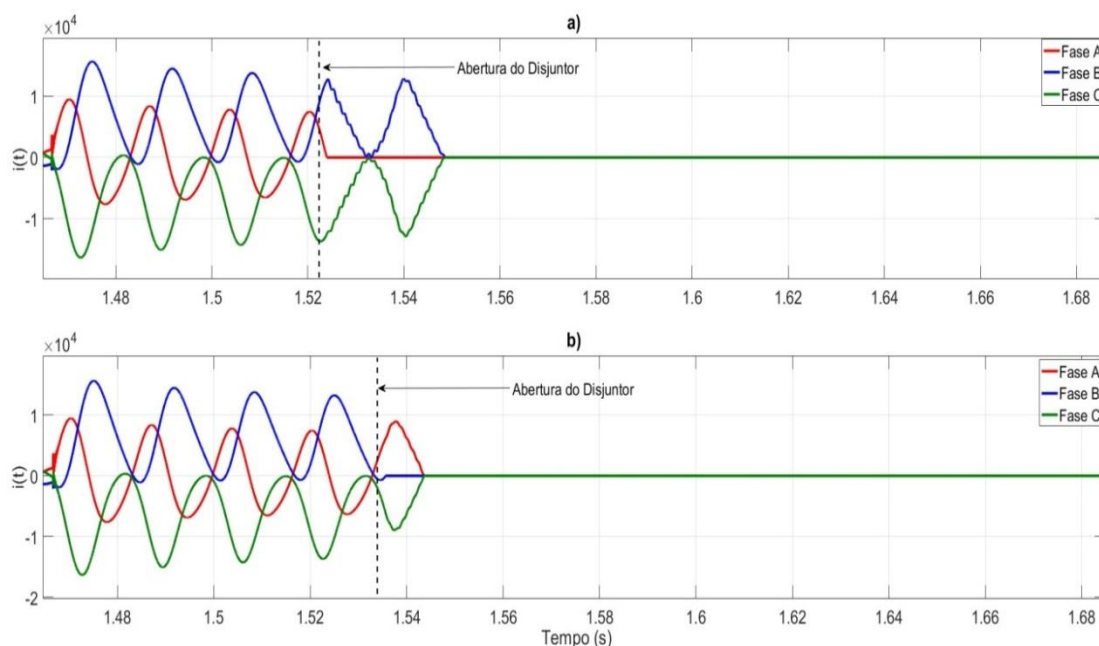


Figura 62 - a) Curto-circuito trifásico 1 para tempo de abertura t_1 . b) Curto trifásico para tempo abertura t_2 .

Para efeito de simulação o tempo t_1 é de 57 ms e o tempo t_2 é de 68 ms. Nota-se que para a Figura 62 a) a primeira fase a ser interrompida é a fase A e o defeito trifásico ocorreu no momento em que a fase A passava pelo pico de tensão. As fases B e C possuem alta assimetria neste tipo de curto, após a interrupção da fase A, tem-se uma falta bifásica com elevada assimetria. Na Figura 62 b) nota-se que não ocorreram zeros atrasados e a primeira fase a ser interrompida é a fase B, o curto evolui para bifásico e a fase A que não apresenta assimetria tende a influenciar a fase C eliminando o curto na próxima passagem por zero.

Para o estudo da aplicação do limitador supercondutor resistivo (R-SFCL) sempre será considerado a pior condição para ocorrência de fenômenos de zeros atrasados na simulação.

6.2.2.2. CONDIÇÃO OPERACIONAL 2

Neste cenário para o estudo do curto-circuito considera-se a operação de três geradores em paralelo (dois na barra A e um na barra B) no sistema elétrico de 13,8 kV, considera que os geradores GE-001A/B/C estão em operação e o gerador

GE-001D desligado. A Tabela 10 apresenta os resultados para todas as condições e localizações de defeitos estudados neste trabalho.

Para as faltas localizadas em **A** e **D** na condição operacional 2 foram encontrados os piores cenários de zeros atrasados após a abertura do disjuntor, uma vez que as correntes que percorrem os disjuntores será a soma das correntes do geradores e motores, que em determinados instantes de tempo podem ficar em oposição de fase que favorece o surgimento de zeros atrasados.

Tabela 10 - Resultados de curto-circuito para condição operacional 2.

Estudo de Curto Circuito						
Condição Operacional	Localização da Falta	Tipo de curto	Máxima corrente de pico de curto com Limiter (kA)	Máximo valor corrente de pico de curto (kA)	Tempo para cruzar o zero (ms)	Limite de tempo exposição ao arco excedido
CO 2	A	Zero Tensão	48,1	67,7	11,7	Não
		Pico de Tensão	46,8	64,5	160,1	Sim
		Evolutivo	47	79,6	285,6	Sim
	B	Zero Tensão	66,9	84,4	6,4	Não
		Pico de Tensão	60,4	80,9	8,1	Não
		Evolutivo	64,9	98,2	123,9	Sim
	C	Zero Tensão	61,5	84,5	6,5	Não
		Pico de Tensão	60,3	80,7	8,6	Não
		Evolutivo	60,8	98,7	135,2	Sim
	D	Zero Tensão	62,6	84,5	13,1	Não
		Pico de Tensão	60,3	80,8	127,1	Sim
		Evolutivo	65,2	98,6	240,3	Sim
	E	Zero Tensão	xxxxxxxx	46,7	7,3	Não
		Pico de Tensão	xxxxxxxx	44,1	6,6	Não
		Evolutivo	xxxxxxxx	52,8	7,4	Não

Resumidamente discute-se nesta seção o comportamento das correntes durante sua interrupção para o pior caso encontrado na seção 6.2.2.1, defeito em **A** na Figura 54, ou seja, para um defeito localizado a montante do disjuntor do gerador.

A Figura 63 apresenta as correntes que percorrem o disjuntor do gerador GE-001C após a sua abertura, para uma falta localizada na posição **A** da Figura 54 para um curto-circuito trifásico no pico de tensão fase A e para um curto bifásico evolutivo para trifásico.

Nota-se que tanto para uma falta trifásica no momento em que a fase A passa pelo pico de tensão quanto para o curto evolutivo ocorrem zeros atrasados durante a abertura do disjuntor, expondo o disjuntor do gerador a tempos de arcos superiores ao recomendado pelo fabricante [16].

Em [1] são citadas possíveis soluções para eliminar a ocorrência de zeros atrasados, uma delas é o atraso intencional da proteção por tempo suficiente para a redução da componente CC. O ponto negativo dessa solução é que o sistema e os equipamentos da instalação ficarão expostos por maior tempo as correntes de curto o que pode acarretar danos aos próprios equipamentos e prejudicar a estabilidade de operação do sistema.

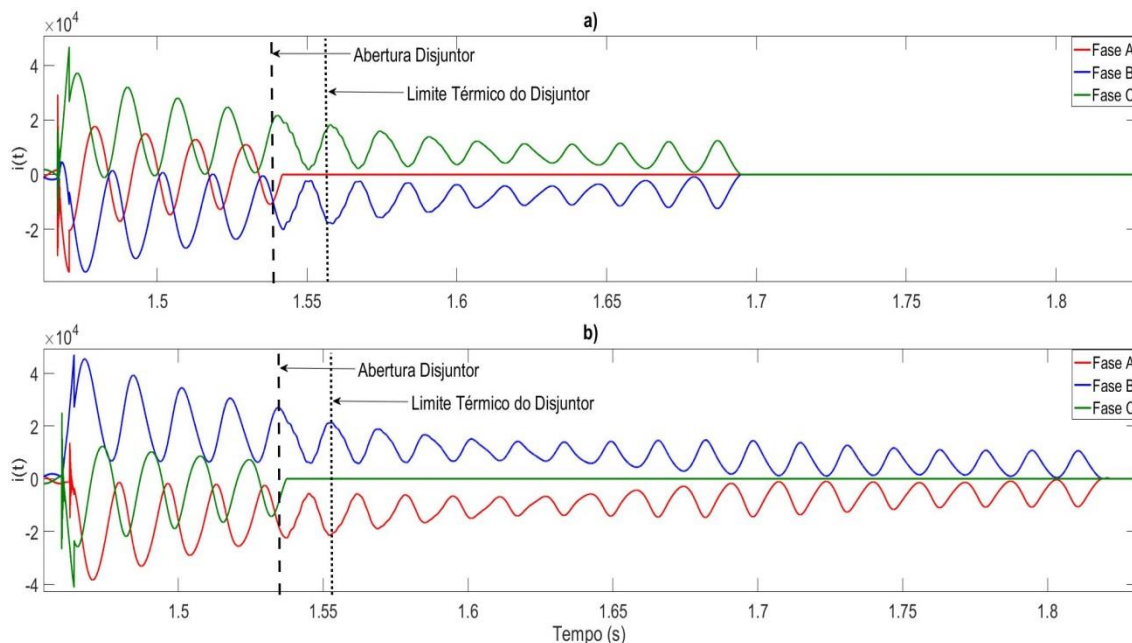


Figura 63 - a) Curto trifásico disjuntor gerador. b) Curto bifásico evolutivo para trifásico.

Outra solução citada em [1] é a utilização de resistores de pré-inserção introduzidos no sistema durante o curto-circuito com objetivo de reduzir a relação X/R , adiantando a passagem da corrente por zero. Porém, apresenta como desvantagem a necessidade de instalação adicional de um disjuntor e do próprio resistor de pré-inserção com potência apropriada para o curto, necessitando a ocupação de um espaço físico razoável que é limitado no FPSO.

Outra desvantagem é o tempo de fechamento dos disjuntores, sendo algo em torno entre 65 a 80 ms [16], assim o valor de resistência somente é inserido no circuito após o fechamento do disjuntor, além de depender do fechamento do mesmo, o qual pode falhar. Nesse aspecto o R-SFCL apresenta como vantagens o fato de não necessitar de disjuntores adicionais para operação, acarretando em menor ocupação de espaço físico e sua operação não depende da operação do disjuntor, apresentando maior confiabilidade. Cabe aqui mencionar outra vantagem oriunda da característica de operação do limitador, na ocorrência do curto, o valor da resistência é inserido em 1/4 de ciclo no circuito, limitando a corrente de curto-circuito no período subtransitário.

6.3. APLICAÇÃO DO R-SFCL BASEADO EM FITAS SUPERCONDUTORAS DE 2G NO SISTEMA ELÉTRICO DO FPSO

Em [2] é apresentado o estudo de aplicação do R-SFCL no sistema elétrico de um FPSO com objetivo de limitar correntes de curto-circuito em um sistema que a corrente de defeito presumida apresenta valores maiores que os limites típicos de painéis e equipamentos.

Neste trabalho será avaliada a aplicação do R-SFCL no sistema elétrico da FPSO com objetivo de reduzir as correntes assimétricas e por consequência eliminar o fenômeno de zero atrasado durante a abertura do disjuntor.

Em [2] foi proposto à aplicação do limitador supercondutor resistivo como substitutivo do *Is-Limiter* com objetivo de limitar a corrente de defeito presumida no painel.

Será simulada a utilização do limitador supercondutor resistivo em duas localizações, a primeira similar à efetuada em [2], ou seja, em série com o disjuntor TIE conectando as semibarras A e B, Figura 64. A segunda localização é a instalação em série com o circuito de geração, sendo necessário o dimensionamento de R-SFCL para cada gerador do sistema elétrico da plataforma.

6.3.1. R-SFCL em Conjunto com o Disjuntor do TIE

Nesta seção será avaliado o desempenho da aplicação do R-SFCL em conjunto com o disjuntor TIE na limitação do curto e mitigação do zero atrasado.

O dimensionamento do limitador supercondutor para aplicação no sistema elétrico deve considerar à atuação do dispositivo durante o curto-circuito, ou seja, o mesmo deve transitar do estado supercondutor para o estado normal. Além disso, o dispositivo não deve operar para correntes nominais de operação do sistema elétrico. O primeiro passo é determinar a corrente máxima que percorre o sistema em condição normal de operação. Conforme [2], o valor máximo da corrente que percorre o limitador em condição normal é a soma das correntes em regime permanente máxima somada e a parcela relativa à partida do maior motor.

A pior condição para o cálculo da corrente que percorre o disjuntor TIE é o sistema elétrico configurado com dois geradores na barra B alimentando as cargas na barra A somado da corrente relativa a partida do motor de 11 MW. O valor máximo da corrente de pico durante a partida do motor que percorre o disjuntor TIE é 4600 A.

Assim, foram adotados cinco módulos limitadores em paralelo e dezenove módulos limitadores em série (critério de tensão, ou seja, aproximadamente 160 m de fitas supercondutoras) totalizando noventa e cinco módulos limitadores em cada fase, Tabela 3, para a simulação de aplicação de um limitador supercondutor entre as barras A e B.

A discussão dos resultados para a aplicação do supercondutor entre as semibarras A e B em série com o disjuntor TIE focará na condição operacional 1 e para defeitos localizados em **A** (defeito a montante do disjuntor do gerador), em **B** (defeito na barra A) e em **D** (a jusante ao disjuntor do motor), as quais foram as piores condições para a ocorrência de zeros atrasados. A Figura 64 ilustra os cenários estudados.

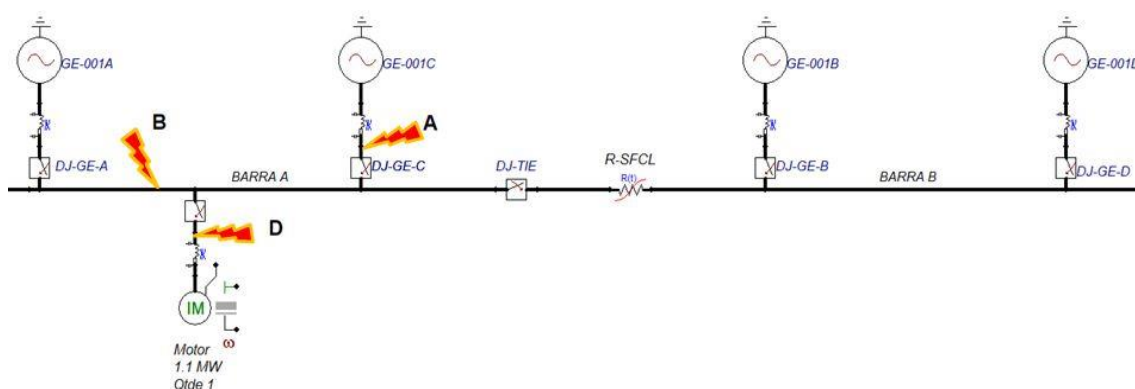


Figura 64 - Casos de curto-circuito para estudo da aplicação do R-SFCL.

Para um defeito localizado na barra A (ponto **B** da figura 63), os disjuntores dos geradores (DJ-GE-A e DJ-GE-C) e do Tie (DJ-TIE) devem abrir para isolar o defeito. A Figura 65 ilustra as correntes sobre os disjuntores dos geradores (DJ-GE-A/C) durante a interrupção das suas respectivas contribuições de corrente de curto na barra A.

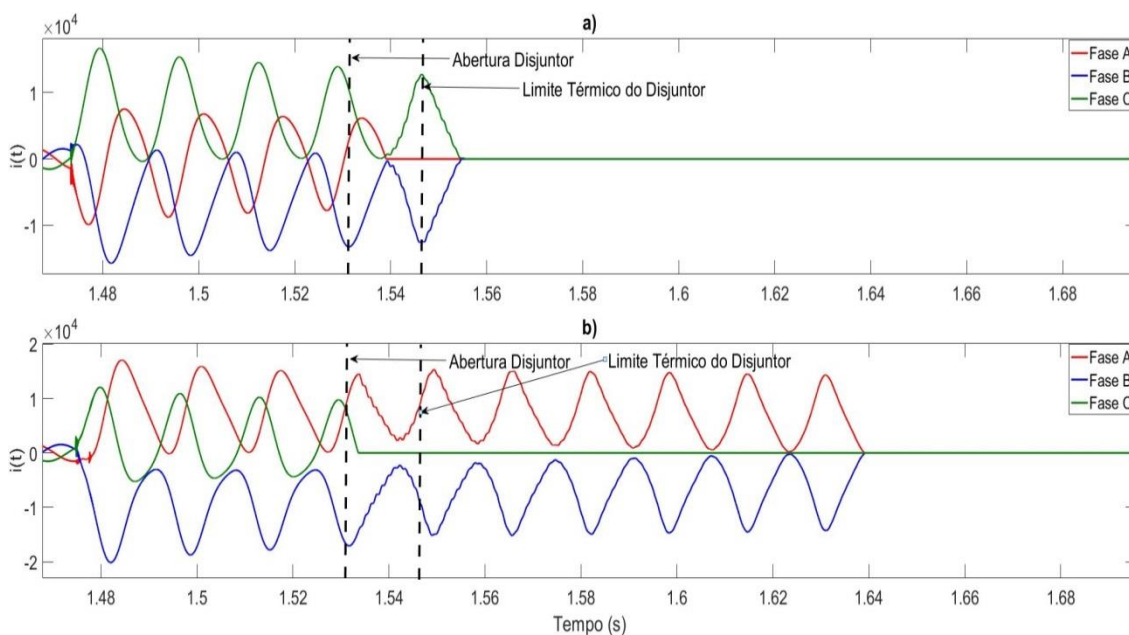


Figura 65 - a) Corrente de curto trifásico durante a abertura do DJ-GE-A. b) Corrente de curto-circuito bifásico evolutivo para trifásico durante a abertura do DJ-GE-A.

Observa-se que durante a abertura do disjuntor GE-001A ocorre zeros atrasados para os dois tipos de curto-circuito simulados para a falta na barra A, conforme ilustrado na Figura 65. O R-SFCL localizado no TIE não influenciou no comportamento das correntes sobre os disjuntores dos geradores localizados na barra A. O caminho das correntes dos geradores GE-001A e GE-001C até o curto não percorre o limitador, e assim, para esta localização de instalação do R-SFCL ainda persiste o problema de zeros atrasados durante a abertura dos disjuntores dos geradores da barra A para um curto-circuito localizado na própria barra. Uma alternativa a ser avaliada é a instalação do R-SFCL em série com o disjuntor da geração para solucionar esta condição.

A contribuição dos geradores (GE-001B/D) e dos motores localizados na barra B para o curto-circuito na barra A percorrem o disjuntor TIE e o limitador R-SFCL até o ponto da defeito. Essas contribuições de correntes têm o seu valor de pico e de regime permanente limitada pelo dispositivo supercondutor resistivo, porém as contribuições dos geradores (GE-001A/C) localizados na barra A não percorrem o R-SFCL no caminho até o ponto de falta, portanto não tem os seus valores de corrente limitados pelo dispositivo.

A Figura 66 apresenta o comparativo das correntes trifásicas prospectiva e limitada que percorrem o disjuntor TIE para a condição operacional 1 e para um defeito localizado na barra A.

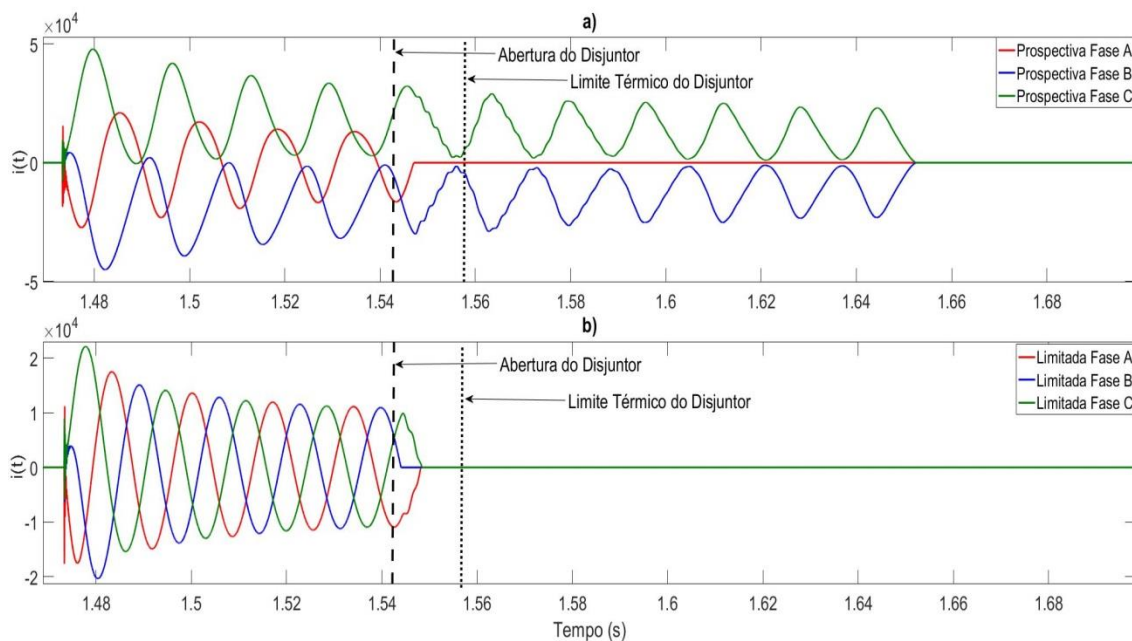


Figura 66 - a) Corrente prospectiva no Tie. b) Corrente de curto-circuito no Tie limitada pelo R-SFCL.

Observa-se o efeito do R-SFCL na limitação da corrente e na eliminação do zero atrasado durante a abertura do disjuntor do TIE para isolar a barra B da falta na barra A. O valor da corrente de pico de primeiro ciclo percorrendo o disjuntor TIE sem o limitador é de 48 kA e com a utilização do R-SFCL foi reduzido para 22 kA, ou seja, uma redução de 54%. Além disso, sem a utilização do R-SFCL o disjuntor do TIE estará exposto a correntes de arco por 120 ms durante a abertura, colocando em risco a integridade do equipamento.

Para melhor observação do efeito do limitador na corrente de curto, a Figura 67 apresenta o comparativo da corrente prospectiva e limitada de um curto evolutivo na barra A.

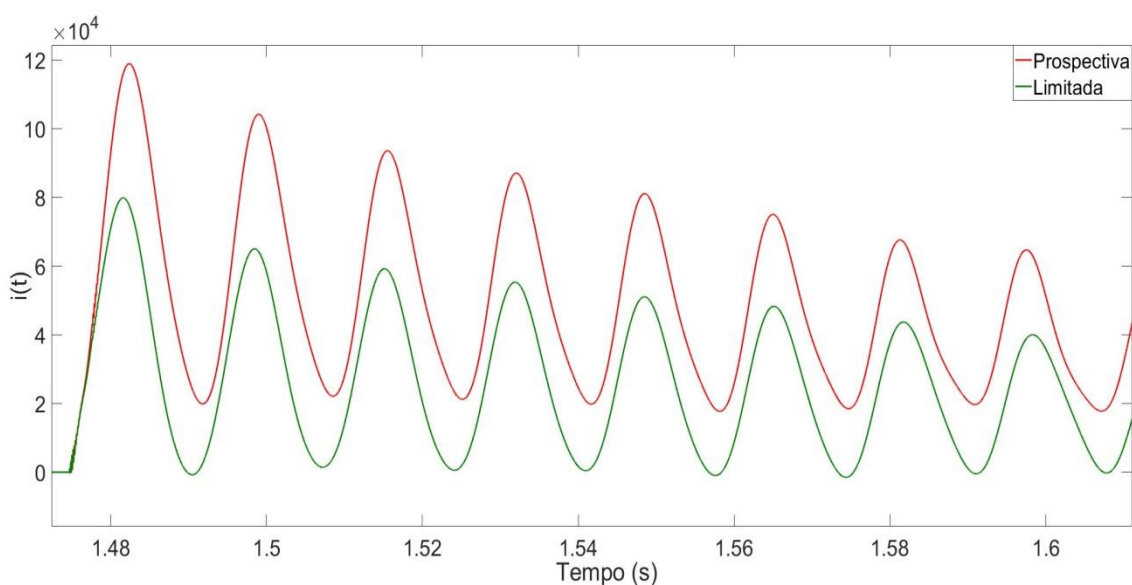


Figura 67 - Comparativo das correntes prospectiva e limitada de curto.

O resultado das temperaturas de cada camada e da resistência equivalente do R-SFCL durante o curto-circuito é apresentado na Figura 68. A resistência equivalente transita rapidamente do estado supercondutor para o estado normal, conforme observado na rápida mudança do valor da resistência. Os valores de temperatura e da resistência decaem no momento em que ocorre a abertura do disjuntor TIE e o defeito é eliminado do sistema elétrico. As barras **A** e **B** são segregadas e nenhuma corrente percorre o R-SFCL, em que permite o resfriamento do mesmo retornando ao estado supercondutor, o que pode ser observado no decaimento da temperatura da fita supercondutora apresentado na Figura 69 b).

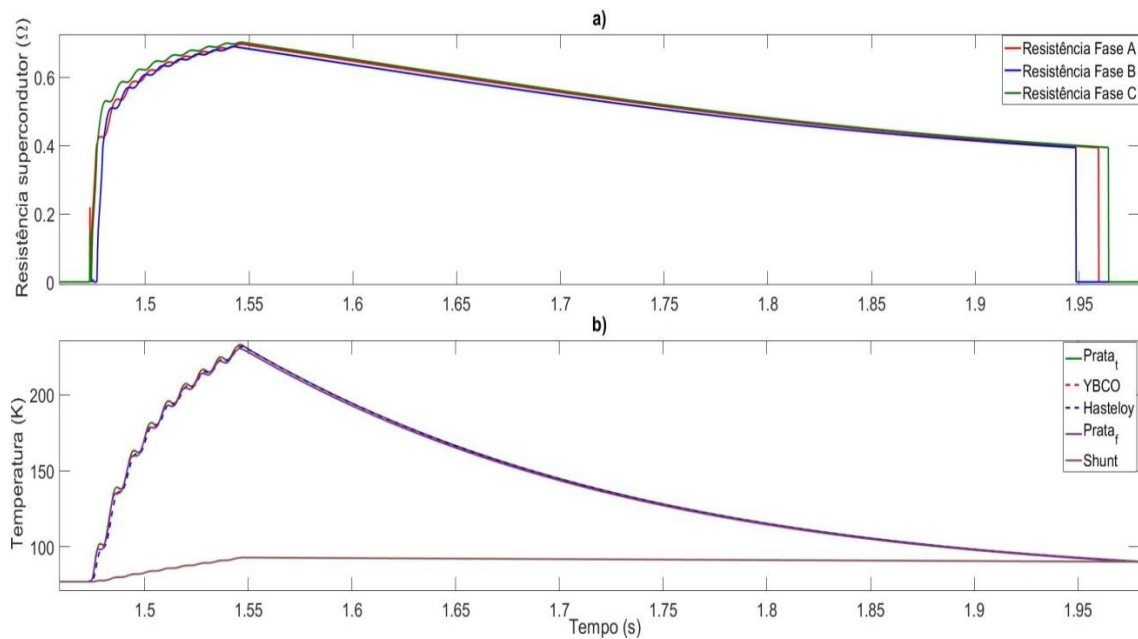


Figura 68 - a) Resistência equivalente do módulo R-SFCL. b) Temperaturas de cada camada do limitador.

Os resultados para a evolução da temperatura em cada camada do limitador demonstram que durante o curto-circuito até a sua interrupção há elevação de temperatura até o valor máximo de 233 K, respeitando o máximo valor de 400 K que é o limite de temperatura de dano na fita 2G HTS [33].

A Figura 69 ilustra as correntes sobre o disjuntor do gerador (DJ-GE-C) durante a interrupção da corrente de curto-circuito para um defeito trifásico e bifásico evolutivo para trifásico no ponto A.

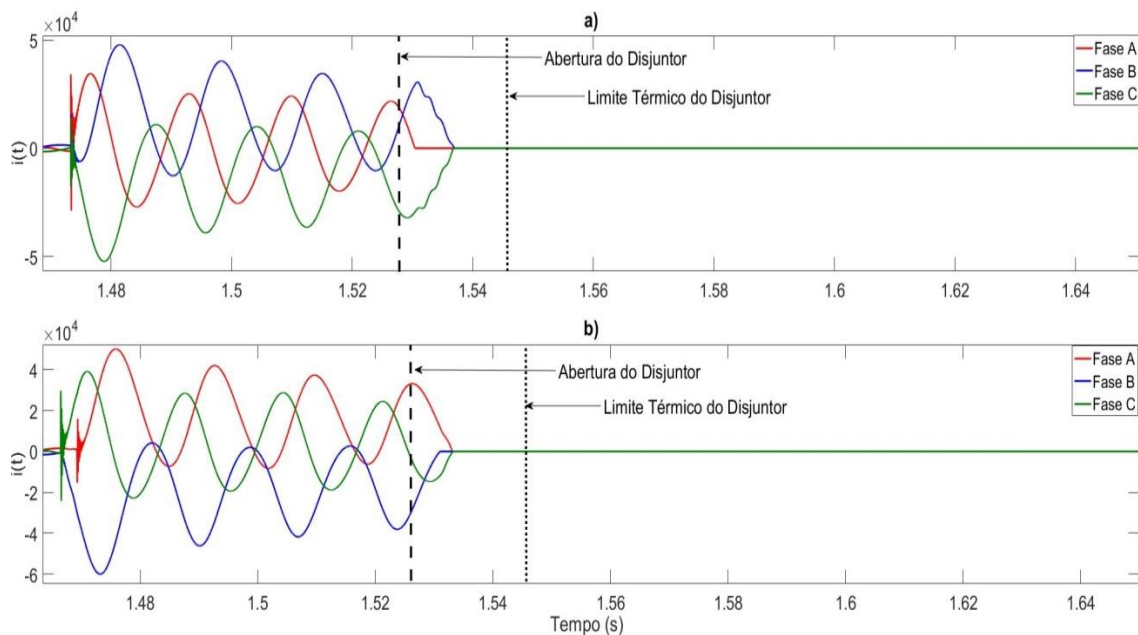


Figura 69 - a) Corrente de curto trifásico durante a abertura do disjuntor DJ-GE-C. b) Corrente de curto evolutivo durante a abertura do disjuntor DJ-GE-C.

A introdução do R-SFCL apresentou desempenho satisfatório eliminando a ocorrência DCZ para o defeito trifásico franco e para o bifásico evolutivo para trifásico. Na pior condição de zeros atrasados, considerando a configuração do *Is-limiter* em série com o disjuntor TIE, o defeito foi totalmente isolado do sistema em 285,6 ms conforme Tabela 9. A utilização do R-SFCL em série com o disjuntor TIE reduziu esse tempo para 5 ms após a abertura do disjuntor, o dispositivo limitador supercondutor foi submetido a corrente de curto-circuito durante 71 ms.

Gráfico da corrente $i(t)$ em função do tempo (s). O eixo horizontal representa o tempo em segundos, variando de 1.45 a 1.75. O eixo vertical representa a corrente $i(t)$ em unidades de 10^4 , variando de 0 a 10. Duas curvas são mostradas: 'Prospectiva' (vermelha) e 'Limitada' (verde). A curva 'Limitada' apresenta picos decrescentes até $t \approx 1.53$ s, onde atinge o valor zero e permanece constante. A curva 'Prospectiva' apresenta picos decrescentes até $t \approx 1.53$ s, onde atinge o valor zero e permanece constante.

Nota-se que o limitador supercondutor atuou eliminando o zero atrasado durante a abertura do disjuntor e reduziu o valor da corrente de curto de pico de primeiro ciclo, expondo o equipamento a menores estresses durante o curto.

Na Figura 71 é apresentado o resultado das temperaturas de cada camada e da resistência equivalente do R-SFCL durante o curto-circuito evolutivo. A máxima temperatura atingida nas camadas do limitador durante o curto foi de 232 K, dentro do limite máximo de 400 K de dano na fita 2G HTS [2]. Após a abertura do disjuntor TIE ocorreu o resfriamento do R-SFCL retornando ao estado supercondutor.

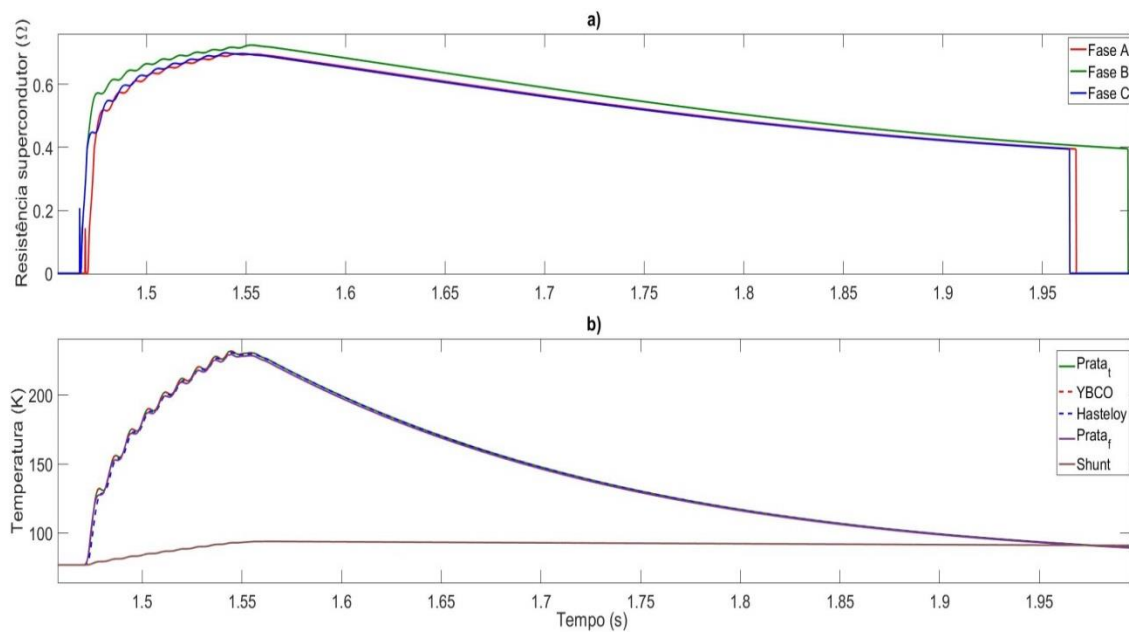


Figura 71 - a) Resistência equivalente do R-SFCL. b) Temperatura em cada camada durante o curto evolutivo no ponto A.

Nota-se que na ocorrência do curto-circuito a resistência equivalente do limitador transita rapidamente do estado supercondutor para o estado normal, inserindo um valor de resistência para limitar as correntes de curto que percorrem o disjuntor TIE.

Para um defeito localizado em **D**, o disjuntor do motor deverá ser responsável por eliminar a falta e outros disjuntores devem permanecer em operação para garantir a estabilidade da operação do sistema elétrico. A Figura 72 apresenta as correntes de curto-circuito durante a abertura do disjuntor do motor para uma falta trifásica e bifásica evolutiva para trifásica.

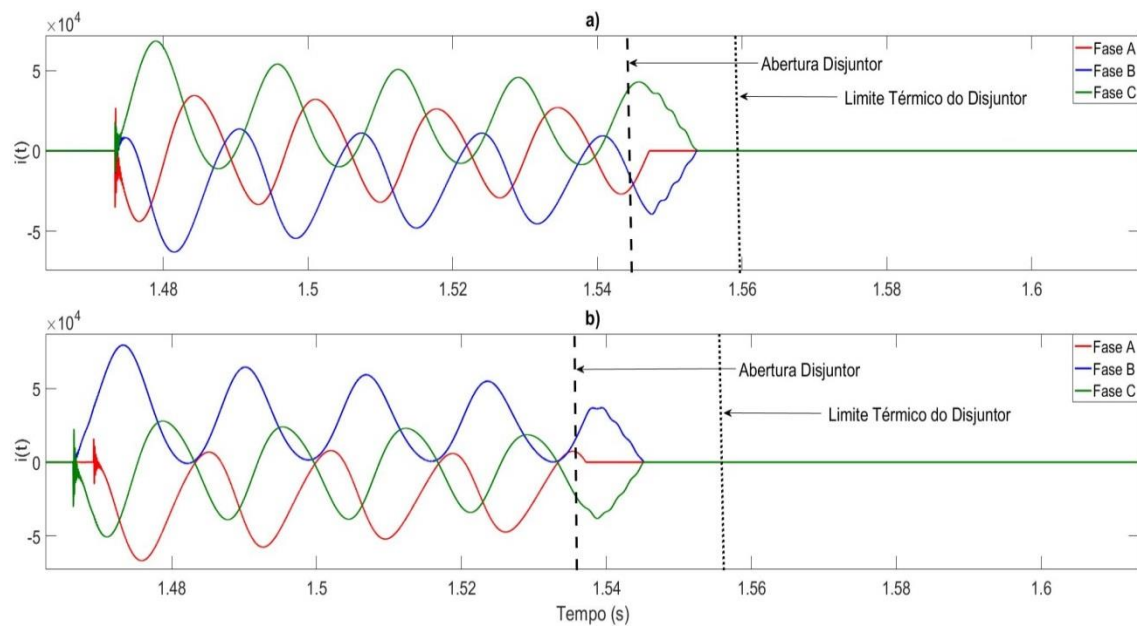


Figura 72 - a) Corrente de curto trifásico durante a abertura do disjuntor do motor. b) Corrente de curto evolutivo durante a abertura do disjuntor do motor.

Observa que as correntes de curto-circuito sobre o disjuntor do motor foram eliminadas sem a ocorrência de zeros atrasados tanto para o cenário de um defeito trifásico ou bifásico evolutivo para trifásico a jusante do disjuntor do motor. O R-SFCL atuou conforme esperado na assimetria, na redução do valor de pico e de regime permanente da corrente de curto.

Durante o curto-circuito, a tensão na barra A e B tende a zero e neste momento todos os motores conectados ao sistema elétrico começam a desacelerar. Após a eliminação do curto, os controles dos geradores atuam no restabelecimento das condições nominais de operação e todos os motores retornam a acelerar ao mesmo tempo, impondo sobre o sistema elétrico valores de correntes elevados circulando pelo disjuntor TIE e pela geração. Na Figura 73 é apresentada a variação de tensão na barra A e barra B durante o evento de curto-circuito e posterior recuperação dos sistemas de controles dos geradores restabelecendo a tensão nominal do sistema.

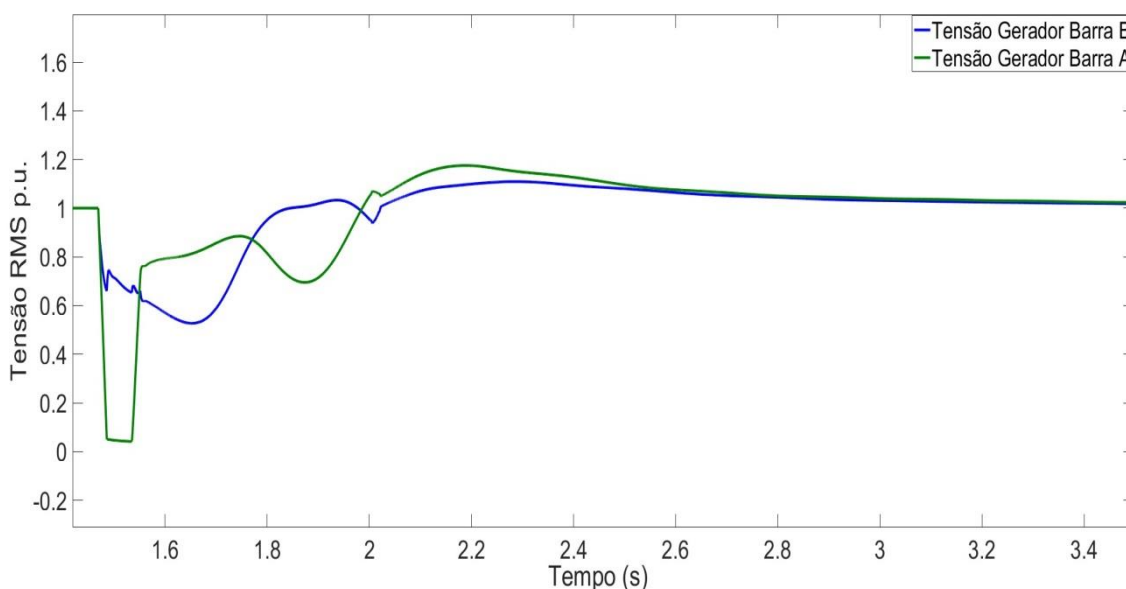


Figura 73 - Comportamento da tensão nas barras A e B do sistema de 13,8 kV.

Na Figura 73 nota-se o melhor desempenho da estabilidade de tensão do terminal do gerador conectado a barra B comparado com o gerador conectado à barra A. O R-SFCL oferece um caminho com resistência para as correntes dos geradores conectados a barra B até o curto a jusante do disjuntor do motor conectado a barra A, garantindo maior estabilidade de tensão.

A Figura 74 apresenta o comportamento da temperatura do R-SFCL e da tensão nos terminais do R-SFCL durante o evento de curto-circuito e posterior atuação do sistema de proteção eliminando o defeito do sistema elétrico, retornando a condição normal de operação.

O módulo limitador supercondutor atingiu a temperatura máxima de 220 K, mesmo durante a retomada de aceleração de todos os motores ao mesmo tempo, significando solicitações de elevadas correntes de partidas. O disjuntor TIE permaneceu fechado durante todo evento de curto-circuito e o R-SFCL foi exposto a essas correntes. Logo em seguida, o limitador foi submetido às correntes de partida dos motores durante a reaceleração dos mesmos para a retomada a condição nominal de operação. Nas simulações o R-SFCL permaneceu conduzindo a corrente nominal do sistema (2000 A) durante seu resfriamento, porém durante os 10 s da simulação não tinha retornado ao estado supercondutor. O estudo e a modelagem do resfriamento do R-SFCL em carga não é o foco desse trabalho, com objetivo de evitar danos de sobreaquecimento na fita supercondutora recomenda-se a abertura do disjuntor TIE para o retorno do estado supercondutor do R-SFCL para os eventos de curto-circuito.

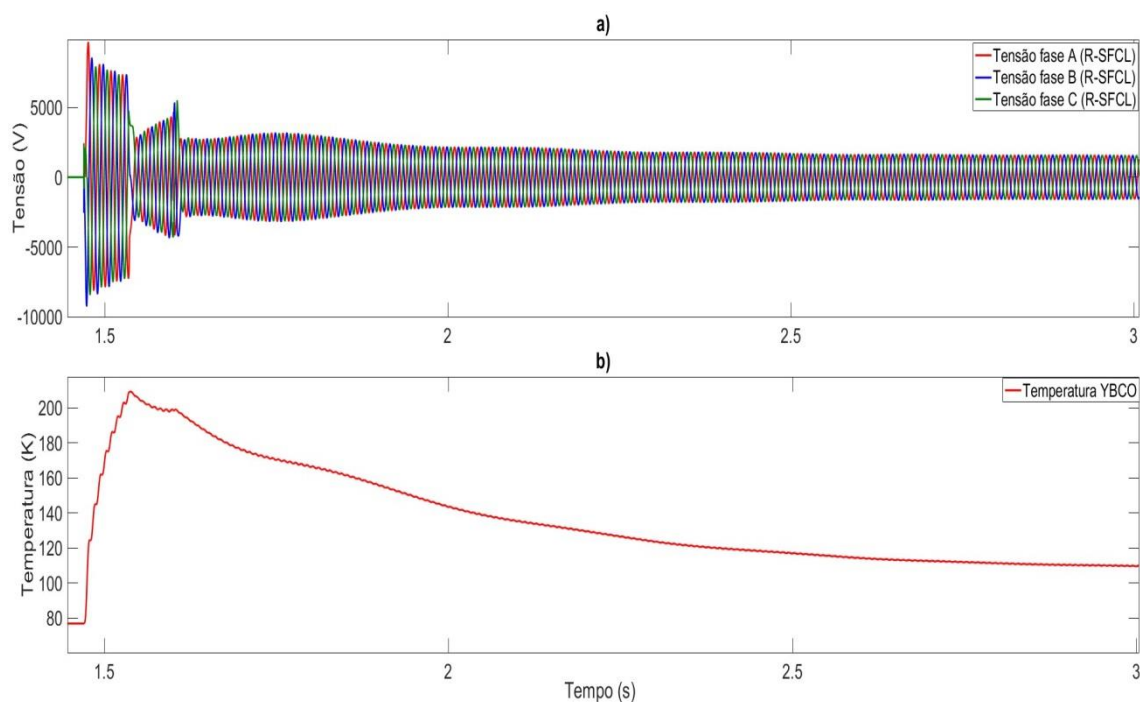


Figura 74 - a) Tensão nos terminais do R-SFCL. b) Comportamento da temperatura do supercondutor.

A tensão nos terminais do R-SFCL atinge um valor máximo de 9350 V (primeiro ciclo fase A), ou seja, um valor de 492 V por módulo limitador supercondutor, decaindo rapidamente para valores inferiores a 8170 V (tensão nominal de cada módulo é 430 V, sendo utilizados 19 módulos em série) no segundo ciclo. O valor máximo de 492 V por módulo limitador supercondutor corresponde a 57,2 V/m na fita, devido ao efeito transitório não é esperado danos na fita [32]. Nas simulações em laboratório apresentadas em [32], durante o curto-circuito a tensão no R-SFCL atingiu valores de 66 V/m sem ocorrência de danos na fita.

O comparativo do desempenho do limitador supercondutor na limitação da corrente de curto com relação ao dispositivo *Is-Limiter* na condição operacional 1 são apresentados na Tabela 11.

Observa-se nas colunas o comparativo da limitação dos valores de pico da corrente de curto com a utilização do *Is-limiter* e com o limitador supercondutor resistivo (R-SFCL), o qual apresentou resultados similares ao dispositivo pirotécnico quanto à limitação no valor de pico da corrente de curto. Porém, o R-SFCL sobressaiu no quesito de redução das correntes assimétricas de curto-circuito reduzindo o cenário de zeros atrasados durante a abertura do disjuntor para a eliminação do defeito.

Tabela 11 - Comparativo desempenho Is-Limiter e o R-SFCL.

Estudo de Curto Circuito							
Condição Operacional	Localização da Falta	Tipo de curto	Máximo valor corrente de pico de curto (kA)	Máxima corrente de pico com Is-Limiter (kA)	Máxima corrente de pico com R-SFCL (kA)	Tempo para cruzar o zero geração "Is-Limiter" (ms)	Tempo para cruzar o zero geração R-SFCL (ms)
CO 1	A	Zero Tensão	84,8	60,5	54,5	11,9	9,3
		Pico de Tensão	80,7	58,5	52,2	178,9	6,8
		Evolutivo	98,5	52,7	62,7	323	6,5
	B	Zero Tensão	101,7	72,9	68,6	11,2	12
		Pico de Tensão	96,9	71,6	71,1	22,6	22,4
		Evolutivo	118,5	65,2	83,3	155,3	108,4
	C	Zero Tensão	101,7	73	68,1	9,6	9,1
		Pico de Tensão	96,9	71,6	67,2	29,1	23,2
		Evolutivo	118,5	63,6	78,2	212,1	108,4
	D	Zero Tensão	101,1	73,1	62,7	12,6	3,1
		Pico de Tensão	96,1	71,3	70,1	161,3	9,4
		Evolutivo	118,4	65,3	70,9	286,8	2,3

6.3.2. Aplicação Do R-SFCL Em Série Com os Geradores

Nesta seção será avaliado o desempenho para a configuração do sistema elétrico com a aplicação do R-SFCL em série com os geradores para a limitação do curto e mitigação do zero atrasado comparando os resultados com a aplicação do limitador no TIE da seção anterior.

O dimensionamento do limitador supercondutor para aplicação no sistema elétrico deve considerar à atuação do dispositivo durante o curto-circuito e o mesmo não deve atuar para correntes nominais de operação do sistema elétrico. São utilizadas duas premissas para o dimensionamento do dispositivo.

A primeira é a mesma premissa da seção 6.3.1, ou seja, a pior condição para o cálculo da corrente que percorre o R-SFCL, considerando o pior carregamento em

condições nominais do sistema elétrico. Considera como pior condição de carregamento, o sistema configurado com dois geradores na barra B alimentando as cargas na barra A simultaneamente à partida do motor de 11 MW. O valor máximo da corrente de pico durante a partida do motor que percorre o circuito do gerador é 2280 A.

Outra premissa para o dimensionamento do limitador supercondutor resistivo na configuração em série com o gerador é que o mesmo não deve transitar para o estado normal para defeitos localizados fora do sistema de 13,8 kV. Para um curto-circuito evolutivo no sistema de 4,16 kV, o máximo valor da corrente de pico encontrada no circuito do gerador foi de 3400 A. Dessa forma, foram adotados quatro módulos limitadores em paralelo (corrente crítica de 4400 A) e dezenove módulos limitadores (critério de tensão, ou seja, aproximadamente 160 m de fitas supercondutoras) em série totalizando setenta e seis módulos limitadores, Tabela 3, em cada fase para a simulação de aplicação de um limitador supercondutor em cada um dos circuitos de geração.

A discussão dos resultados para a aplicação do supercondutor em série com os geradores é similar ao que foi apresentado quando aplicado entre as semibarras **A** e **B**, ou seja, avalia-se o seu desempenho para a condição operacional 1 e faltas localizadas no ponto **A** (defeito interno ao gerador) e no ponto **B** (defeito na barra A).

Para um defeito interno ao disjuntor do gerador GE-001C (no ponto **A**), apenas o disjuntor DJ-GE-C deve abrir para isolar a falta. A Figura 75 ilustra as correntes sobre o disjuntor do gerador (DJ-GE-C) durante a interrupção da corrente de curto-circuito para um defeito trifásico e bifásico evolutivo para trifásico. Observa-se que na configuração do limitador supercondutor resistivo em série com o gerador, as correntes foram eliminadas logo após a abertura do disjuntor não ocorrendo o fenômeno de zeros atrasados, possuindo desempenho similar para configuração do R-SFCL inserido entre as semibarras A e B.

Para um defeito localizado na barra A (no ponto **B**), os disjuntores dos geradores (DJ-GE-A e DJ-GE-C) e do TIE (DJ-TIE) devem abrir para isolar a falta. A Figura 76 apresenta o comportamento da corrente durante o processo de abertura.

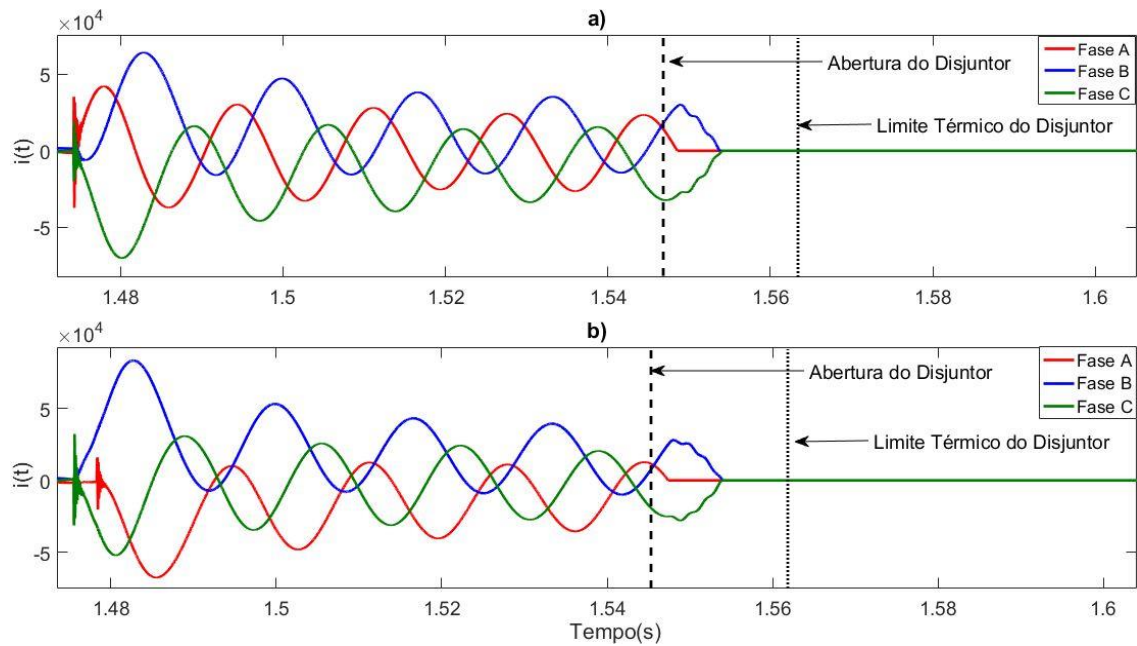


Figura 75 – a) Falta trifásica no terminal do gerador. b) Corrente para uma falta evolutiva.

Na Figura 76 observa-se que na configuração do R-SFCL em série com a geração não ocorre zeros atrasados durante a abertura do disjuntor, uma vez que os caminhos percorridos pelas correntes de curto dos geradores sempre percorrem o R-SFCL, impactando positivamente na redução da relação X/R de curto do sistema e eliminando o zero atrasado.

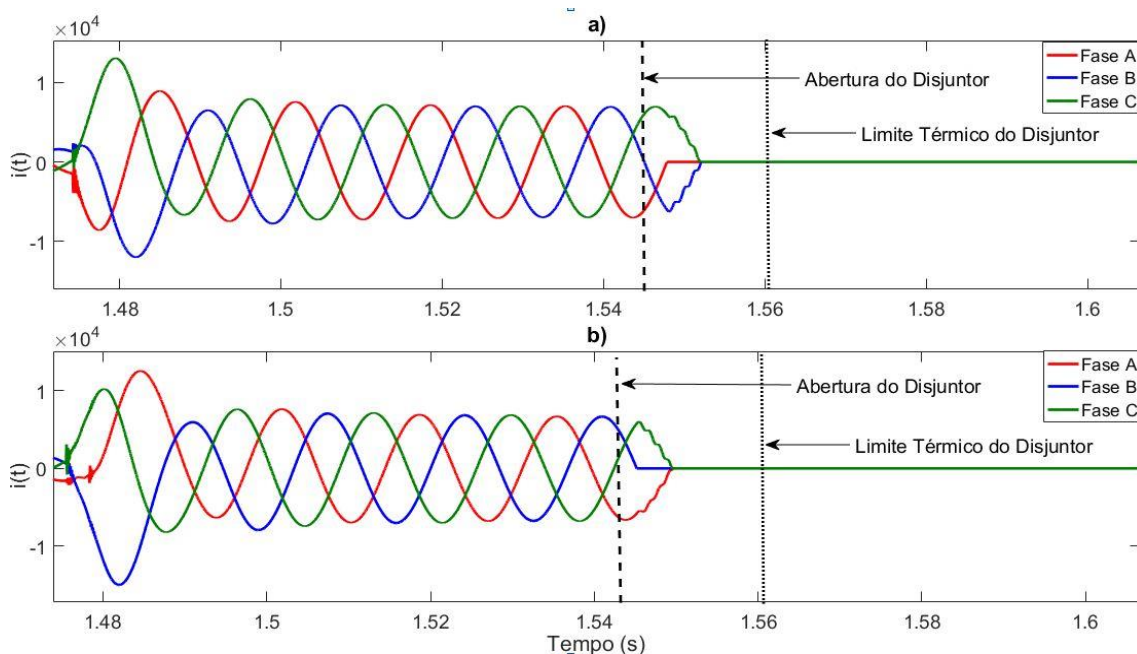


Figura 76 - a) Corrente de curto trifásico terminal do disjuntor gerador. b) Curto evolutivo terminal do disjuntor gerador.

Observa-se que durante a abertura do disjuntor não ocorre zeros atrasados para os dois tipos de defeitos simulados na barra A. O R-SFCL configurado em série com a

geração apresentou desempenho mais satisfatório eliminando o fenômeno de DCZ durante a abertura do disjuntor da geração quando comparado a configuração do R-SFCL entre as semibarras A e B.

A temperatura máxima atingida pelo limitador supercondutor resistivo instalado em série com o gerador durante o curto-circuito foi de 143 K, ocorrendo para a pior condição de defeito, bifásico evolutivo para trifásico, pois neste cenário ocorrem os maiores valores de corrente de curto-circuito de pico, provocando maior estresse térmico para o dispositivo. Este valor de temperatura encontra-se dentro do limite máximo de 400 K de dano na fita 2G HTS [33], considerando assim que durante a atuação do dispositivo o mesmo não foi exposto à temperatura que pudessem causar danos ao equipamento.

A Tabela 12 apresenta comparações da atuação do limitador supercondutor resistivo na redução dos valores de pico das correntes de curto e na eliminação dos zeros atrasados durante a abertura do disjuntor. Compara-se o desempenho do R-SFCL para quando instalado em série com o gerador e quando aplicado entre as semibarras A e B.

Tabela 12 - Comparativo entre o Is-Limiter, o R-SFCL em série com a geração e no TIE.

Estudo de Curto Circuito								
Condição Operacional	Localização da Falta	Tipo de curto	Máxima corrente de pico de curto com "Is-Limiter" (kA)	Máxima corrente de pico com R-SFCL no Tie (kA)	Máxima corrente de pico com R-SFCL no gerador (kA)	Tempo para cruzar o zero geração "Is-Limiter" (ms)	Tempo para cruzar o zero geração R-SFCL no tie (ms)	Tempo para cruzar o zero geração R-SFCL no gerador (ms)
CO 1	A	Zero Tensão	60,5	54,5	71,2	11,9	9,3	6,5
		Pico de Tensão	58,5	52,2	70,1	178,9	6,8	7,8
		Evolutivo	52,7	62,7	83	323	6,5	7,7
	B	Zero Tensão	72,9	68,6	83,7	11,2	12	6
		Pico de Tensão	71,6	68,1	82,6	22,6	22,4	6,1
		Evolutivo	65,2	83,3	97,6	155,3	108,4	6,1
	C	Zero Tensão	73	68,1	83,9	9,6	9,1	6
		Pico de Tensão	71,6	67,2	82,8	29,1	23,2	6,1
		Evolutivo	63,6	78,2	97,6	212,1	108,4	6,1
	D	Zero Tensão	73,1	62,7	83,9	12,6	3,1	6,5
		Pico de Tensão	71,3	70,1	82,6	161,3	9,4	7,4
		Evolutivo	65,3	70,9	97,6	286,8	2,3	6,1

Nota-se que não ocorreram zeros atrasados durante a abertura do disjuntor para todos os cenários simulados quando considerado a instalação do R-SFCL em série com o gerador.

Quando o R-SFCL é aplicado em série com o disjuntor TIE, ou seja, entre as semibarras A e B, ocorreram zeros atrasados na abertura do disjuntor do gerador

responsáveis por eliminar o curto para defeitos localizados nas suas respectivas barras A e B. Porém, mesmo não atendendo ao limite térmico de exposição ao arco recomendado pelo fabricante [16], há uma redução no tempo de exposição ao arco após a abertura do disjuntor para essa configuração de topologia de instalação do R-SFCL no sistema elétrico. Dessa forma, podendo limitar a extensão dos danos do arco elétrico no disjuntor e no próprio painel.

Comparando a influência na redução do valor de primeiro pico da corrente de curto-circuito, o R-SFCL instalado em série com o disjuntor TIE apresentou o melhor desempenho, pois os caminhos das correntes de curto dos motores e geradores que percorrem o disjuntor TIE são limitadas pelo R-SFCL. No caso da instalação do R-SFCL em série com a geração somente será limitada as correntes de curto do gerador.

A configuração do R-SFCL em série com o circuito da geração eliminou o fenômeno de zeros atrasados durante a abertura do disjuntor para todos os tipos de falta e carregamento da plataforma atingindo o objetivo da sua aplicação. Além disso, exerce influência na redução da corrente de primeiro ciclo do curto-circuito permitindo a aplicação de painéis e equipamentos com valores nominais menores de suportabilidade a corrente de pico e regime permanente.

7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a avaliação do desempenho da aplicação de um limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo (R-SFCL) no sistema elétrico típico de uma plataforma de petróleo do tipo FPSO. O objetivo principal foi averiguar a influência do dispositivo para eliminar os fenômenos de zeros atrasados que ocorrem durante a abertura dos disjuntores.

Foram apresentadas as teorias básicas para a modelagem analítica das correntes de curto-circuito, tendo o foco nas condições de operação do sistema elétrico que são favoráveis para a ocorrência de zeros atrasados e o cálculo do provável tempo de atraso.

Sendo apresentada resumidamente a teoria que descreve o comportamento elétrico e térmico do dispositivo para ser implementado na simulação computacional com objetivo de avaliar o seu desempenho.

As diversas simulações computacionais realizadas ao longo do trabalho utilizaram o programa *Alternative Transient Program*, sendo modelados os geradores, motores, cabos, disjuntores e o dispositivo limitador de corrente de curto-circuito supercondutor resistivo. Foi implementado no programa o sistema elétrico de uma plataforma de petróleo do tipo FPSO e estudado os possíveis cenários de zeros atrasados e a implementação do R-SFCL em diferentes topologias.

No capítulo 5 foram apresentados os resultados das simulações para um sistema elétrico isolado contendo um único gerador, motor e uma carga de impedância constante. Observou-se para falta nos terminais do gerador a vazio ocorreram zeros atrasados durante a abertura do disjuntor para faltas trifásicas no momento em que uma das fases passava pelo pico de tensão, porém foi ilustrado que a pior condição é na ocorrência do curto bifásico evolutivo para trifásico.

Observou-se que a abertura do disjuntor e a consequente eliminação da falta em uma das fases, alterou a dinâmica do curto e a primeira fase a ser eliminada exerce grande influência no surgimento do fenômeno de zeros atrasados.

No capítulo 5 também foi mostrado que a contribuição motórica para o curto-circuito pode piorar ainda mais o tempo necessário para a passagem da corrente por zero.

Uma das contribuições desse trabalho foi à adição de um R-SFCL em série com o circuito da geração. Foi avaliado o seu desempenho na mitigação da assimetria de corrente e na eliminação do fenômeno de zeros atrasados. Observou-se que quando adicionado o R-SFCL em série com o circuito do gerador do sistema isolado não ocorriam zeros atrasados durante a abertura do disjuntor para qualquer um dos cenários estudados.

Após os resultados positivos obtidos no capítulo 5 com a introdução do R-SFCL no circuito de geração, foi realizado no capítulo 6 a aplicação deste tipo de limitador de corrente de curto-circuito no sistema elétrico de uma plataforma de petróleo do tipo FPSO. O modelo dinâmico do sistema elétrico foi implementados utilizando os componentes da biblioteca do *ATPdraw* para representar o comportamento dinâmico dos geradores, motores, transformadores, cabos e disjuntores em conjunto foi implementado na biblioteca *Models* do *ATPdraw* as equações que descrevem o modelo eletrotérmico do R-SFCL no programa.

Os resultados demonstraram que a topologia da implementação do R-SFCL no sistema elétrico influência bastante para eliminação dos fenômenos de zeros atrasados e na redução dos valores da corrente de curto-circuito. O R-SFCL aplicado entre as semibarras tem grande potencial na redução dos valores de pico e regime permanente de curto-circuito nos painéis garantindo que fique abaixo dos valores nominais típicos dos painéis industriais disponíveis, porém para alguns cenários de curto ainda persistia o fenômeno de zeros atrasados durante a abertura do disjuntor.

Na configuração do R-SFCL em série com o circuito de geração foram necessários quatro limitadores supercondutores resistivos no sistema elétrico, ou seja, individualmente para cada um dos circuitos de geração. Nesta configuração o problema de zeros atrasados durante a abertura do disjuntor foi eliminado para todos os cenários de curto-circuito e todos os tempos de abertura do disjuntor. O R-SFCL aplicado em série com a geração apresentou grande potencial como uma das alternativas para mitigação do problema de zeros atrasados no sistema elétrico do FPSO. Porém, nesta configuração será necessária uma maior quantidade de módulos limitadores, ou seja, mais fitas que acarretaria em aumento de custos e o espaço ocupado no FPSO.

7.2. TRABALHOS FUTUROS

Nos estudos realizados neste trabalho considerou a utilização de um disjuntor ideal, em que não foi considerada a resistência de arco na câmara de vácuo durante a

abertura do disjuntor, assim propõe como trabalho futuro a modelagem da não linearidade da resistência de arco com objetivo de avaliar seu efeito na assimetria de corrente.

Avaliar o comportamento do R-SFCL durante o resfriamento e recuperação para o estado supercondutor em carga nominal do sistema elétrico após a interrupção da corrente de curto-circuito.

Outro tema para trabalho futuro é avaliar a aplicação de outros modelos de limitadores de corrente de curto-circuito no sistema elétrico da plataforma FPSO e comparar o desempenho com o R-SFCL com relação a redução da corrente de curto-circuito, na assimetria de corrente, eliminação do zero atrasados e na qualidade de energia.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bezerra, F.V.C. **Análise de Zeros Atrasados em Unidades Offshore**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Engenharia Elétrica COPPE/UFRJ, 2017.
- [2] Mafra, G.R.F.Q. **Aplicação de Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores em Sistemas Elétricos de Distribuição e Plataformas de Produção de Petróleo e Gás Natural**. Dissertação (Mestrado em Montagem Industrial) – Universidade Federal Fluminense, 2016.
- [3] Queiroz, André Tiago. **Simulação de um Limitador de Corrente de Curto-Circuito Supercondutor em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Montagem Industrial) – Universidade Federal Fluminense, 2019.
- [4] Sousa, W. T. B. **Transient simulations of superconducting fault current limiters**. Rio de Janeiro, 2015. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [5] 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.
- [6] Hong, Z.; et. al. **The development and performance test of a 10 kV resistive type superconducting fault current limiter**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, jun. 2012.
- [7] Hyum, O. B.; et. al. **6.6 kV Resistive superconducting fault current limiter based on YBCO films**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, pp. 2027-2030, jun. 2005.
- [8] Canay, I. M.; Braun, D.; Koppl, G. S. **Delayed Current Zeros Due to Out-of-Phase Synchronizing**. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, N°. 2, Junho 1998.
- [9] Brito, P. M. **Análise Paramétrica da Rede Elétrica no Estudo de Zeros Atrasados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Março, 2014.
- [10] Smith, R.K.; Long, R.W.; Birmingham, D.L. **Vacuum Interrupters for Generator Circuit Breakers. They're Not Just For Distribution Circuits Breakers Anymore**. 17th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Barcelona, Maio de 2003.
- [11] Dias, Thiago Carvalho. **Aplicação de Limitadores de Correntes de Curto-Circuito Pirotécnicos em Sistemas Elétricos Industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNIFEI. Abril, 2016.

- [12] Pallazo, Mirko; Braun, Dieter; Delfanti, Maurizio. **Investigation on the Occurrence of Delayed Current Zeros Phenomena in Power Stations and Related Stress Imposed on Generator-Circuit-Breakers**. The International Conference on Power Systems Transients (IPST2011) in Delft, the Netherlands June 14-17, 2011.
- [13] Kindermann, Geraldo. **Curto-Circuito**. Edição do Autor – Florianópolis-SC, 5ª edição, 2010.
- [14] Mardegan, Cláudio. **Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais**. Atitude Editorial – São Paulo-SP, 1ª edição, 2012.
- [15] Schettino, Henrique Junqueira. **Análise de Limitador de Corrente Supercondutor Resistivo para Inserção de Geradores ao Sistema de Transmissão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Engenharia Elétrica COPPE/UFRJ, 2016.
- [16] VD4 Disjuntores de média tensão a vácuo 12...36 kV - 630...3150 A - 16...50 kA. Catálogo Técnico da ABB. 2012.
- [17] Mamede Filho, João. Manual de Equipamentos Elétricos. Editora LTC – Rio de Janeiro -RJ, 4ª edição, 2013.
- [18] Carvalho, Antonio Carlos Cavalcanti de. **Disjuntores e Chaves: Aplicação em Sistemas de Potência**. Editora EDUFF – Editora da Universidade Federal Fluminense – Niterói - RJ, 1ª edição, 1995.
- [19] IEEE Std. 1584. “IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations”, 2002.
- [20] Monteiro, Andréia Maia. **Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no IPC (Interphase Power Controller)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Março, 2005.
- [21] Is-limiter The World Fastest Limiting and Switching Device. Catálogo Técnico da ABB. 2014.
https://library.e.abb.com/public/e622c5385dcf05adc1257dce00341856/2493%20Is_Limiter_GB_NewBranding.pdf
- [22] Rose-Innes, A. C.; Rhoderick, E H. **Introduction to superconductivity**. 2ª ed. Oxford: Pergamon Press, 2015. 262 p.
- [23] J.-C.H. Llambes, D. Hazelton, J. Duval, M. Albertini, S. Repnoy, V. Selvamanickam, G. Majkic, I. Kesign, J. Langston, M. Steurer, F. Bogdan, J. Hauer, D. Crook, S. Ranner, T. Williams, and M. Coleman. **Performance of 2G HTS Tapes in Sub-Cooled LN2 for Superconducting Fault Current Limiting Applications**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21(3):1206–1208, June 2011. doi:10.1109/TASC.2010.2101572.
- [24] Blair, Steven M. **The analysis and application of resistive superconducting fault current limiters in present and future power**

systems. Glasgow, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, University of Strathclyde, Glasgow, 2013.

[25] SOUSA, W. T. B.; et. al. **Simulation of a superconducting fault current limiter: A case study in the brazilian power system with possible recovery under load.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, New York: IEEE, v. 26, n. 2, p. 1-8, dez. 2015.

[26] B.W. Lee, J. Sim, K.B. Park, and I.S. Oh. **Practical Application Issues of Superconducting Fault Current Limiters for Electric Power Systems.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 18(2):620–623, June 2008. doi:10.1109/TASC.2008.920784. (cited on pages 58, 59, 61

[27] L. Martini, M. Bocchi, M. Levati, and V. Rossi. **Simulations and Electrical Testing of Superconducting Fault Current Limiter Prototypes.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 15(2):2067– 2070, June 2005. doi:10.1109/TASC.2005.849453. (cited on pages 36, 134.

[28] Sousa, W. T. B.; et. al. **Simulations and tests of MCP-BSCCO-2212 superconducting fault current limiters.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, abr. 2012.

[29] Sousa, W. T. B. et al. **Recovery of superconducting state in an R-SFCL MCP-BSCCO-2212 assembly.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, New York: IEEE, v. 23, n. 1, fev. 2013.

[30] R. Dommerque, S. Krämer, A. Hobl, R. Böhm, M. Bludau, J. Bock, D. Klaus, H. Piereder, A. Wilson, T. Krüger, G. Pfeiffer, K. Pfeiffer, and S. Elschner. **First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and installation.** Superconductor Science and Technology, 23(3):034020, March 2010. doi:10.1088/0953-2048/23/3/034020.

[31] L. Kovalsky, X. Yuan, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock, and F. Breuer. **Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 15(2):2130–2133, June 2005. doi:10.1109/TASC.2005. 849471.

[32] Elschner, S. et. al. ENSYSTROB: **Resistive fault current limiter based on coated conductors for medium voltage application.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, New York: IEEE, v. 21, n. 3, p. 1209-1212, jun. 2011.

[33] SUPERPOWER. SuperPower 2G HTS Wire Specifications. Empresa SuperPower, <http://www.superpower-inc.com>.

[34] IEC 60909-0. “Short-circuit current in three-phase a.c. System – Part 0: Calculation of currents”, 2016.

[35] Cabos Afitox – 8,7/15 kV; 3,6/10 kV; 0,6/1 kV. Catalogo técnico fabricante Nexans.

[36] Cabos Wirex Marine - 8,7/15 kV; 3,6/10 kV; 0,6/1 kV. Catalogo técnico fabricante Wirex.

[37] LIM, L. S. et. al. **Turbogenerator short circuits with delayed current zeros**. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Proc. IEEE, Vol. 124, N° 12, Dezembro, 1977.

[38] Type Test Certificate of Short-Circuit Performace. VD4 1731-50. Teste disjuntor a vácuo da ABB realizado pelo Kema High-Power Laboratory, Holanda. 29 de abril de 2008

[39] Final Technical Report. **Transmission Level High Temperature Superconducting Fault Current Limiter**. Award Number:DE-FC36-03GO13033. December, 2010.

[40] CZERWINSKI, D. et. al. **Analysis of alternating overcurrent response of 2G HTS tape for SFCL**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, N°. 3, Junho 2014.

[41] Bonnard, C. H. et. Al. **Multi-scale modelo f resistive-type superconducting fault current limites based on 2G HTS coated conductors**. Article in Superconductor Science and Technology. Novembro, 2016.

[42] HTS Modelling Website 2020. <http://www.htsmodelling.com>

[43] Garcia, W. R. L. et. al. **Technical and economic analysis of the r-type SFCL for HVDC grids protection**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. v.27, n.7, p. 01-09, 2017.

[44] Hong, J.; et. al. **The structure, performance and recovery time of a 10 kV resistive type superconducting fault current limiter**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, jun. 2013.

[45] Sousa, W. S.; et. al. **Thermalelectrical analogy for simulations of superconducting fault current limites**. Cryogenics, vol. 62, pp. 97-109, jul. 2014.

[46] Fenske, S. **Delayed current zeros close to generator terminals. Department of Power Distribution and High-Voltage Technology**. Brandenburg Technical University Cottbus - Germany. Maio 2010.

[47] Baldan, Carlos A. et al. **Development and test of resistive superconducting fault current limiter; acting time and its recovery conditions**. 11th European Conference On Applied Superconductivity (eucas2013), Pts 1-4. Bristol: IOP Publishing Ltd, v. 507, p. 1-4, 2014. Disponíble en: <http://hdl.handle.net/11449/130192>.

[48] S.M. Blair, C.D. Booth, N.K. Singh, G.M. Burt, and C.G. Bright. **Analysis of Energy Dissipation in Resistive Superconducting Fault Current Limiters for Optimal Power System Performance**. IEEE Transactions on Applied

Superconductivity, 21(4):3452–3457, August 2011.
doi:10.1109/TASC.2011.2129518.

9. ANEXOS

9.1. ANEXO A

O código computacional da modelagem do R-SFCL no Models do ATPdraw.

```
MODEL YBCOtri

INPUT It[1..3]
DATA Np,Volt
OUTPUT Rl[1..3],Te[1..5] -- Va[1..5],Va[24],Va[43],Va[34],Va[35]
VAR Rl[1..3],Te[1..15],py[1..3],Va[1..44],Ct[1..7],X[1..50],h
VAR rho[1..15],Rc[1..15],Rcy[1..3]
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]:=1200 -- Css (comprimento do shunt[cm])

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

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])%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  rho[1]:=((-2.082*(10**(-7)))+(6.17*(10**(-9)*Te[X[2]])) -- pst
  (resistividade da prata superior)
  rho[3]:=((1.202*(10**(-4)))+(8.957*(10**(-9)*Te[X[2]+2])) -- ph
  (resistividade Hasteloy)
  rho[4]:=((-2.082*(10**(-7)))+(6.17*(10**(-9)*Te[X[2]+3])) -- psb
  (resistividade prata inferior)
  rho[5]:=((1.193*(10**(-4)))-(7.53*(10**(-5)*exp(-Te[X[2]+4]/647.113))) -
  - pss (resistividade shunt)
  --

  -- R (resistência elétrica[ohm])
  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  Rc[1]:=rho[1]*(Ct[1]/0.00048) -- Rst (Resistência prata superior)
  Rcy[1]:=(py[X[1]]*(Ct[1]/0.00012))+0.0000000000000001 -- Ry
  (Resistência supercondutor)
  Rc[2]:=Rcy[1] -- Ry (Resistência supercondutor)
```

```

Rc[3]:=rho[3]*(Ct[1]/0.012) -- Rh (Resistência Hasteloy)
Rc[4]:=rho[4]*(Ct[1]/0.00012) -- Rsb (Resistência prata inferior)
Rc[5]:=rho[5]*(Ct[2]/0.288) -- Rss (Resistência shunt)
--

-- Cálculo da resistência equivalente do arranjo de fita do r-
lccs%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Va[9]:=1/((1/Rc[1])+(1/Rcy[1])+(1/Rc[3])+(1/Rc[4])) -- Re
(resistência equivalente dos layers[ohm])
Rl[X[1]]:=1/((2/(Va[9]))+(1/Rc[5])) -- Rl (resistência equivalente da
camada)
--

-- determinação das correntes em cada camada da fita
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Va[4]:=(Rl[X[1]]/Rc[1])*Va[X[1]] -- corrente prata superior
Va[5]:=(Rl[X[1]]/Rcy[1])*Va[X[1]] -- Iy (corrente do
supercondutor[A])
Va[10]:=Va[5] -- Variável para método iterativo da corrente no
supercondutor
Va[6]:=(Rl[X[1]]/Rc[3])*Va[X[1]] -- corrente hasteloy
Va[7]:=(Rl[X[1]]/Rc[4])*Va[X[1]] -- corrente prata inferior
Va[8]:=(Rl[X[1]]/Rc[5])*Va[X[1]] -- corrente shunt
--

-- Método iterativo para determinação da resistência no
supercondutor %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
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)/(300*(92-Te[X[2]+1])))*30)
        Va[12]:=Va[12]/(Va[10]/0.00012) -- py1 (flux-creep)

        Va[13]:=0.015*((Va[10]*15)/(300*(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
--

-- Cálculo da nova resistência equivalente da fita do arranjo 1-lccs
Rcy[1]:=(py[X[1]]*(Ct[1]/0.00012))+0.0000000000000001 -- Ry
Rc[2]:=Rcy[1]
Va[9]:=1/((1/Rc[1])+(1/Rcy[1])+(1/Rc[3])+(1/Rc[4])) -- Re
Rl[X[1]]:=1/((2/(Va[9]))+(1/Rc[5])) -- Rl (resistência equivalente
da camada)
--

-- determinação das correntes em cada camada da fita
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Va[4]:=(Rl[X[1]]/Rc[1])*Va[X[1]] -- corrente prata superior
Va[5]:=(Rl[X[1]]/Rcy[1])*Va[X[1]] -- Iy (corrente do
supercondutor[A])
Va[6]:=(Rl[X[1]]/Rc[3])*Va[X[1]] -- corrente hasteloy
Va[7]:=(Rl[X[1]]/Rc[4])*Va[X[1]] -- corrente prata inferior

```

```

Va[8]:=(Rl[X[1]]/Rc[5])*Va[X[1]] -- corrente shunt
--
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

-- Método iterativo para cálculo da corrente no supercondutor
Va[15]:=(Rl[X[1]]/Rcy[1])*Va[X[1]] -- Iyn (nova corrente no
supercondutor)
Va[16]:=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[16] -- Er:=Ern

ENDWHILE

Va[10]:=Va[15]
--
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

----- Analogia eletrotérmica -----
-- %
-- Cálculo da analogia eletrotérmica

-- Cálculo do Calor específico-----
-----
X[24]:=(220.56+(0.046*Te[1]))*0.001 -- Prata Topo
X[25]:=(0.39*((250/Te[2])**2))*((exp(250/Te[2]))/(((exp(250/Te[2]))-
1)**2)) -- YBCO
X[26]:=0.18995+(2*0.1914*(1-(exp(-Te[3]/309.98)))) -- hasteloy
X[27]:=(220.56+(0.046*Te[4]))*0.001 -- prata fundo

-- Cálculo da Capacidade Térmica de cada camada
X[24]:=10.47*X[24]*0.0001*(430*1.2) -- Prata Topo
X[25]:=6.3*X[25]*0.0001*(430*1.2) -- YBCO
X[26]:=8.9*X[26]*0.01*(430*1.2) --Hasteloy
X[27]:=10.47*X[27]*0.0001*(430*1.2) -- Prata fundo

-- Cálculo da Condutividade Térmica
X[28]:=(420.86+(501.78*(0.956**Te[1])))*0.01 -- Prata topo
X[29]:=(3.873+(0.017*Te[3]))*0.01 -- Hasteloy
X[30]:=(420.86+(501.78*(0.956**Te[4])))*0.01 -- Prata fundo
-----
-
-- Cálculos da diferença de temperaturas entre o meio externo
(nitrogênio líquido) e as camadas do YBCO em contato direto com o
nitrogênio
X[5]:=Te[1]-77
X[6]:=Te[4]-77
X[7]:=Te[5]-77

```

```

-- Determinação do coeficiente de convecção para cada camada -----
---
-- Prata de topo
IF (X[5]<2) THEN
  X[8]:=0.18
ELSE
  IF (X[5]>26.5) THEN
    X[8]:=0.03
  ELSE
    X[8]:=3.815-(2.821*X[5])+(0.723*(X[5]**2))-
(0.049*(X[5]**3))+(0.001+(X[5]**4))-(0.00001*(X[5]**5))
  ENDIF
ENDIF

-- Prata de fundo
IF (X[6]<2) THEN
  X[9]:=0.18
ELSE
  IF (X[6]>26.5) THEN
    X[9]:=0.03
  ELSE
    X[9]:=3.815-(2.821*X[6])+(0.723*(X[6]**2))-
(0.049*(X[6]**3))+(0.001+(X[6]**4))-(0.00001*(X[6]**5))
  ENDIF
ENDIF

-- Aço Shunt
IF (X[7]<2) THEN
  X[10]:=0.18
ELSE
  IF (X[7]>26.5) THEN
    X[10]:=0.03
  ELSE
    X[10]:=3.815-(2.821*X[7])+(0.723*(X[7]**2))-
(0.049*(X[7]**3))+(0.001+(X[7]**4))-(0.00001*(X[7]**5))
  ENDIF
ENDIF

-----
-

-- Cálculo da Resistência Térmica por Convecção -----
-----
X[11]:=1/(X[8]*430*1.2)*0.001 -- PRATA TOPO
X[12]:=1/(X[9]*430*1.2)*0.001 -- PRATA FUNDO
X[13]:=1/(X[10]*430*1.2)*0.001 -- AÇO SHUNT
-----

---

-- Cálculo da Resistência Térmica por Condução
X[14]:=0.0004/(X[28]*(430*1.2)) -- Prata Topo
X[15]:=0.01/(X[29]*(430*1.2)) -- hasteloy
X[16]:=0.0001/(X[30]*(430*1.2)) -- Prata fundo
X[17]:=0.24/(0.15*600*1.2) -- AÇO SHUNT
--

-- Cálculo da Condutância -----
--X[14]/2)+X[11]) -- Prata topo + nitrogênio
X[19]:=1/((0.0000039+X[14])/2) -- supercondutor + prata topo
X[20]:=1/((X[15]+0.0000039)/2) -- hasteloy + supercondutor
X[21]:=1/((X[16]+X[15])/2) -- Prata fundo + hasteloy
X[22]:=1/(X[12]+(X[16]/2)) -- nitrogênio + prata fundo

```

```

X[23]:=1/(0.00222+(2*X[13])) -- AÇO SHUNT
-----

-- 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]:=0.0050256*Va[20]*Ct[1] --Casb --
Va[24]:=0.0012564*Va[20]*Ct[1]
Ct[4]:=0.85504*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 --
Va[30]:=0.0001/(Va[27]*(Ct[1]*1.2))
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[31]:=1/((Va[28]/2)+(4.167/Ct[1]))
Va[32]:=1/((Va[28]+Ct[5])/2) -- G2
Va[33]:=1/((Ct[5]+Va[29])/2) -- G3
Va[34]:=1/((Va[29]+Va[30])/2) -- G4
Va[35]:=1/((Va[30]/2)+(4.167/Ct[1])) -- G5
Va[35]:=1/((Va[30]/2)+(4.167/Ct[1]))
Ct[7]:=1/(Ct[6]+(4.167/Ct[2])) -- G6

-- I (correntes nos layers[a])
Va[36]:=(Rl[X[1]]/Rc[1])*Va[X[1]] -- Ist
Va[37]:=(Rl[X[1]]/Rc[3])*Va[X[1]] -- Ih
Va[38]:=(Rl[X[1]]/Rc[4])*Va[X[1]] -- Isb
Va[39]:=(Rl[X[1]]/Rc[5])*Va[X[1]] -- Iss

```



```

Va[40]:=h*( (Rc[1]*(Va[36]**2))+(77*Va[31])+(Va[32]*Te[X[2]+1]))
Va[41]:=h*( (Rc[2]*(Va[10]**2))+(Va[33]*Te[X[2]+2])+(Va[32]*Te[X[2]]))

Va[42]:=h*( (Rc[3]*(Va[37]**2))+(Va[34]*Te[X[2]+3])+(Va[33]*Te[X[2]+1])
)
Va[43]:=h*( (Rc[4]*(Va[38]**2))+(77*Va[35])+(Va[34]*Te[X[2]+2]))
Va[44]:=h*( (Rc[5]*(Va[39]**2))+(77*X[23]))

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*X[23])) -- Tss

Rl[X[1]]:=6.5*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

```

9.2. ANEXO B

O modelo matemático ilustrado abaixo apresenta as equações da dependência do coeficiente de transferência de calor por convecção com a temperatura.

$$h_c(\Delta T) = 0,18 \quad \rightarrow \quad (\Delta T < 2) \quad (B.1)$$

$$h_c(\Delta T) = a_0 + \sum_{n=1}^5 a_n \Delta T^n \quad \rightarrow \quad (2 < \Delta T < 26,5) \quad (B.2)$$

$$h_c(\Delta T) = 0,03 \quad \rightarrow \quad (\Delta T > 26,5) \quad (B.3)$$

Onde os coeficientes da equação B.2 são apresentados a seguir:

$$a_0 = 3,8147 \quad (B.4)$$

$$a_1 = -2,8209 \quad (B.5)$$

$$a_2 = 0,7233 \quad (B.6)$$

$$a_3 = -0,04944 \quad (B.7)$$

$$a_4 = 1,325 \cdot 10^{-3} \quad (B.8)$$

$$a_5 = -12,773 \cdot 10^{-6} \quad (B.9)$$

9.3. ANEXO C – MODELAGEM DOS COMPONENTES DO ATPDRAW

Os parâmetros elétricos implementados no modelo de motor de indução “UM3 – Induction Machine. UM Type 3” utilizado na simulação deste trabalho no ATPdraw são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados Motores Elétricos 13,8 kV.

Dados dos Motores Elétricos 13,8 KV						
Potência	Par de polos	L_{M_d} (p.u.) L_{M_q} (p.u.)	$R_0; R_d; R_q$ (Ω)	$L_0; L_d; L_q$ (H)	$R_{R_1}; R_{R_2}$ (Ω)	$L_{R_1}; L_{R_2}$ (Ω)
11 MW	2	0,2706	0,092	0,00639	0,117	0,006273
5,7 MW	1	0,5252	0,163	0,01468	0,22	0.01269
3,4 MW	2	0,5457	0,0349	0,0115	0.14955	0.016525
1,1 MW	1	2,1401	1,546	0,062467	0,446	0,02629
1,2 MW	3	1,07969	1,0929	0,03494	0,73578	0,082874

Na barra A do painel de 13,8 kV estão conectados quatro motores de potência de 11 MW, um motor de potência de 5,7 MW, um motor de 3,4 MW e um motor de 1,1 MW de potência nominal. Na barra B do painel de 13,8 kV estão conectados três motores de 11 MW, um motor de potência de 5,7 MW, um motor de 3,4 MW e um motor de 1,2 MW de potência nominal.

No painel de 4,16 kV foi dimensionado um motor equivalente, cuja potência é similar à potência nominal do painel em operação em regime permanente. A tabela 7 apresenta os parâmetros elétricos para a modelagem deste motor equivalente.

Tabela 14 - Dados dos parâmetros elétricos dos motores de 4,16 kV.

Dados dos Motores Elétricos 4,16 KV						
Potência	Par de polos	L_{M_d} (p.u.) L_{M_q} (p.u.)	$R_0; R_d; R_q$ (Ω)	$L_0; L_d; L_q$ (H)	$R_{R_1}; R_{R_2}$ (Ω)	$L_{R_1}; L_{R_2}$ (Ω)
4,3 MW	2	0,23389	0,072986	0,00695	0,083459	0,00695
3,3 MW	2	0,035226	0,068523	0,002443	0,061757	0,001052

A figura apresenta a interface do motor de indução no ATPdraw e a caixa de dialogo com para preenchimento dos parâmetros elétricos do motor.

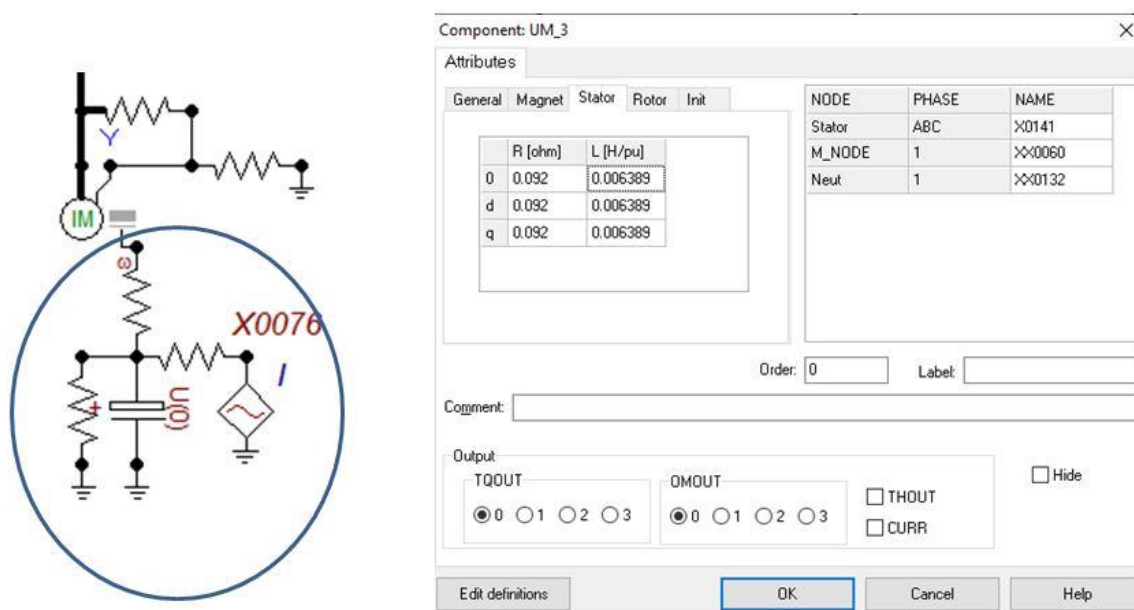


Figura 77 - Modelagem do motor de indução no ATPdraw.

Para preenchimento dos dados elétricos devem ser selecionadas as respectivas abas na aba principal "Attributes".

Os dados mecânicos da carga acionada pelo motor é representada no ATPdraw pelo circuito elétrico equivalente conectado no "M_NODE" destacado pelo círculo azul na Figura 77.

A capacitância representa o momento de inércia da carga acionada em que 1 Farad equivale a 1 kg/m^2 , no capacitor também podemos definir os valores de tensão inicial que corresponde a velocidade inicial do eixo em que 1 Volt é igual a 1 rad/s .

A fonte de corrente representa o torque mecânico aplicado no eixo do motor de indução em que 1 Nm equivale a 1 A .

A resistência representa a fricção do eixo na rotação onde 1 Nm/(rad/s) é equivalente a 1Ω .

A modelagem do regulador de tensão no ATPdraw utilizou componentes da biblioteca TACs que simula a operação do AVR dos geradores do FPSO. O modelo do AVR é o adaptado do tipo AC8B apresentado em [3]. A figura apresenta o regulador de tensão implementado neste trabalho.

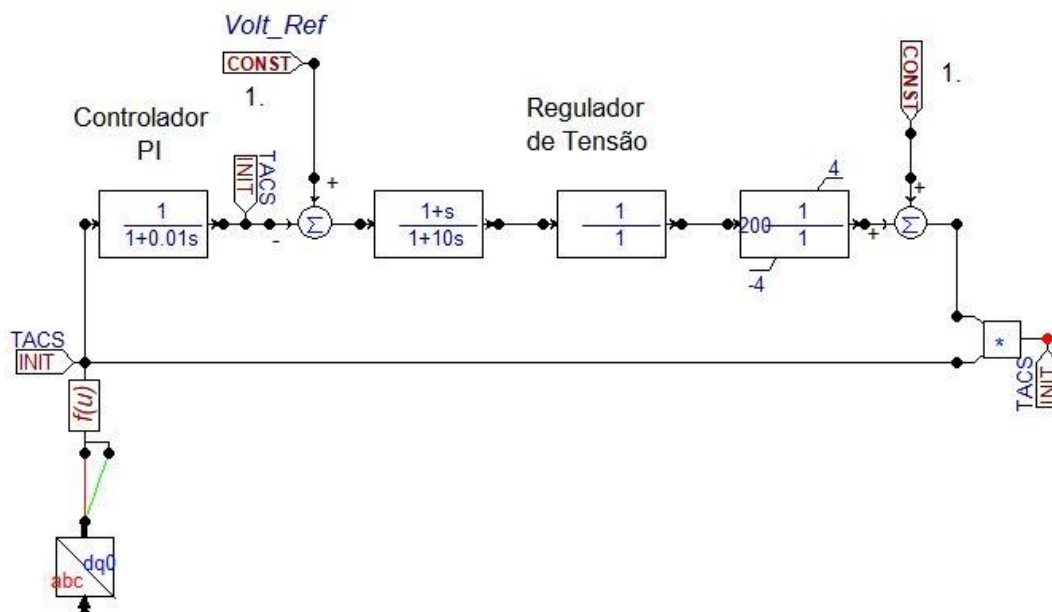


Figura 78 - Regulador de tensão implementado na simulação.

Na entrada do componente *abc/dq* são aplicadas as tensões do terminal do gerador. A saída da figura 53 destacado pelo ponto vermelho é a tensão de campo em p.u.

O controle de velocidade da turbina é modelado baseado em [3], no qual o modelo é constituído pelo governador tipo *droop* e três funções de transferência de 1º ordem que representam o controle PID, a resposta do combustível e a resposta da turbina. A figura apresenta o modelo do controle da turbina baseado em componentes da biblioteca *TACS* do *ATPdraw*.

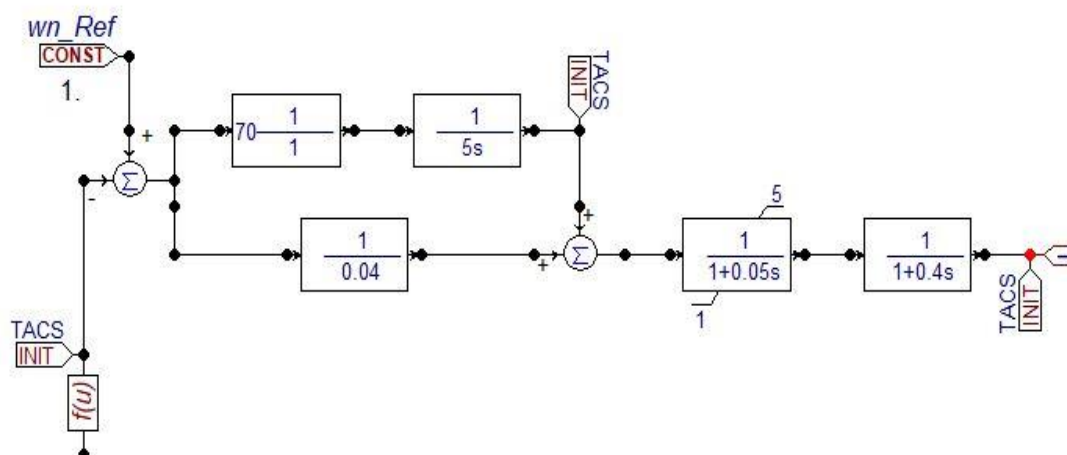


Figura 79 - Modelo do controle de velocidade.