



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**Influência do Compensador Estático de
Reativos no Localizador de
Afundamentos Momentâneos de Tensão
baseado em Fluxo de Potência**

Wanderley Dias Xavier Filho

Itajubá, setembro de 2021

Wanderley Dias Xavier Filho

Influência do Compensador Estático de Reativos no Localizador de Afundamentos Momentâneos de Tensão baseado em Fluxo de Potência

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Instituto de Sistemas Elétricos e Energia

Programa de Pós-Graduação

Orientador: José Maria de Carvalho Filho

Coorientador: Frederico Oliveira Passos

Itajubá, setembro de 2021

Dedico essa Dissertação primeiramente a Deus pela oportunidade concedida, agradeço a minha mãe Maria Abadia e a meu pai Wanderley Dias pelo apoio, ao meu grande e eterno amigo falecido, Rogério Ferreira Maciel e a todos que me apoiaram nessa jornada de desafios.

Agradecimentos

A toda minha família, especialmente, a minha mãe Maria Abadia de Rezende e ao meu pai Wanderley Dias Xavier, pelo apoio, carinho, ensinamentos e companheirismo.

O meu grande amigo e companheiro falecido, Rogério Ferreira Maciel, por todos esses anos ao meu lado, pelo carinho e amor concedido.

A todos os meus familiares, irmã, avós, tios, tias, madrasta, primos e primas.

Aos meus amigos, que mesmo longe, estiveram todos ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Aos professores José Maria de Carvalho Filho e Frederico Oliveira Passos pelo trabalho de orientação, apoio e ensinamentos oferecidos.

A Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade e estrutura concedida para que pudesse integrar o corpo de discentes.

As novas amizades que fiz na cidade de Itajubá, principalmente daqueles da república qual morei.

Resumo

No atual cenário de sistemas elétricos de potência, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) recebe cada vez mais notoriedade. Dentre os problemas de QEE, os Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMTs) causam prejuízos financeiros consideráveis e localizar as fontes de AMTs são um dos maiores desafios das concessionárias de energia elétrica. Nesse contexto, a tese que aborda um localizador o qual identifica o lado da origem da fonte do AMT é abordado. Contudo, como os sistemas elétricos de grande porte, além de malhados, são mais complexos, esse trabalho tem o encargo de avaliar o desempenho de tal localizador, através da modelagem de um sistema elétrico real considerando a inserção de compensadores estáticos de reativos. No estudo, a plataforma RTDS® (*Real Time Digital Simulator*) será utilizada tanto na modelagem do sistema, como na implementação do localizador e na avaliação do seu desempenho.

Palavras Chaves: Localizador de AMTs. Compensador estático de reativos. QEE. AMTs. RTDS. Fluxo de potência.

Abstract

The current scenario of electrical power systems, the Electrical Power System Quality (EPSQ) earns more notoriety. Among the EPSQ problems, Voltage Sags cause considerable financial losses and locating Voltage Sags sources is one of the biggest challenges for electric power utilities. In this context, the thesis that addresses a locator which identifies the source side of the Voltage Sag font is approached. However, as large electrical systems, in addition to meshed ones, are more complex, this work is responsible for evaluating the performance of such a locator, through the modeling of a real electrical system considering the insertion of Static Var Compensators. In the study, an RTDS® (Real Time Digital Simulator) platform will be used both in the modeling of the system, as in the implementation of the locator and in the evaluation of its performance.

Keywords: Fault location, SVC, Power quality, Voltage sag, RTDS, Power flow.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Agregação por União de Fases	22
Figura 2 - Agregação por Parâmetros Críticos	23
Figura 3 - Agregação pela Fase Crítica.....	23
Figura 4 - Agregação temporal para AMTs consecutivos ocorrendo dentro do intervalo de 3 minutos	24
Figura 5 - Principais Agentes Causadores de Faltas	25
Figura 6 - Porcentagem de Ocorrência de cada Tipo de Falta.....	26
Figura 7 - Fluxograma do método de localização da fonte do AMT	34
Figura 8 - Lugar geométrico da potência complexa - Regiões de Operação	35
Figura 9 - Comportamento esperado para faltas a jusante da fronteira	36
Figura 10 - Comportamento esperado para faltas a montante da fronteira	37
Figura 11 - Capacitor shunt localizado entre a fronteira e a falta	38
Figura 12 - Sistema elétrico 2 barras	40
Figura 13 - Diagrama vetorial do sistema elétrico de 2 barras	41
Figura 14 - Variação da tensão no transmissor para tensão constante no receptor .	42
Figura 15 - Características elétricas de um Compensador Síncrono	43
Figura 16 - Conexão delta dos bancos de capacitores	45
Figura 17 - Associação da tensão remanescente do capacitor com a de pico da rede	48
Figura 18 - Comportamento da corrente para diferentes ângulos de disparo	49
Figura 19 - Variação da amplitude da corrente em relação a α	50
Figura 20 - Amplitude das componentes harmônicas da corrente no TCR em relação ao ângulo de disparo	51
Figura 21 - Soma dos fasores de 5° harmônico de um arranjo 12 pulsos.....	52
Figura 22 - Soma dos fasores de 7° harmônico de um arranjo 12 pulsos.....	52
Figura 23 - Característica V_{xl} do SVC	54
Figura 24 - Controle básico de um SVC.....	55
Figura 25 - Operação do SVC durante uma falta	55
Figura 26 - Fonte de tensão trifásica.....	58
Figura 27 - Transformador trifásico de três enrolamentos.....	59
Figura 28 - Configurações do transformador trifásico de 3 enrolamentos.....	60

Figura 29 - Equivalente PI das linhas de transmissão.....	61
Figura 30 - Linhas de transmissão representadas pelo modelo <i>T-line</i>	61
Figura 31 - Parâmetros Padrões de uma Máquina Síncrona	62
Figura 32 - Máquina síncrona representada no RTDS.....	63
Figura 33 - Lógica <i>Booleana</i> do localizador de fontes de AMTs	65
Figura 34 - Regulador do SVC	67
Figura 35 - Bloco de controle do TSC	68
Figura 36 - Bloco de controle do TCR	68
Figura 37 - Bloco de geração de pulso.....	69
Figura 38 - Níveis de carga do subsistema Sudeste / Centro-Oeste.....	71
Figura 39 - Variação da carga mensal	72
Figura 40 - Potência complexa durante F2 para M1	74
Figura 41 - Relatório individual gerado no RUNTIME	75
Figura 42 - Círculo complexo durante F2 para M1	76
Figura 43 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas subcarregados com SVCs	89
Figura 44 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas subcarregados sem SVCs	90
Figura 45 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas subcarregados com SVCs	91
Figura 46 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas subcarregados sem SVCs	91
Figura 47 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas subcarregados sem SVCs	92
Figura 48 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas subcarregados com SVCs	93
Figura 49 - Potência complexa para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas subcarregados com SVCs	93
Figura 50 - Localização para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas subcarregados com SVCs	94
Figura 51 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas com carga nominal e SVCs.....	95
Figura 52 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas com carga nominal e SVCs.....	95

Figura 53 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas com carga nominal e sem SVCs.....	96
Figura 54 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e sem SVCs.....	96
Figura 55 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e SVCs.....	97
Figura 56 - Localização para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e sem SVCs	97
Figura 57 - Potência complexa para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e sem SVCs.....	98
Figura 58 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas sobrecarregados com SVCs	98
Figura 59 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas sobrecarregados com SVCs	99
Figura 60 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas sobrecarregados sem SVCs	99
Figura 61 - Potência complexa para faltas FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs	100
Figura 62 - Potência complexa para faltas FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados com SVCs	100
Figura 63 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs.....	101
Figura 64 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados com SVCs.....	101
Figura 65 - Localização para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs	102
Figura 66 - Potência complexa para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs.....	102
Figura 67 - Porcentagem de acerto dos localizadores de AMTs	103

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração	21
Tabela 2 - Local de monitoramento dos localizadores	64
Tabela 3 - Localização dos SVCs	66
Tabela 4 - local de ocorrência das faltas	70
Tabela 5 - Média e Percentil obtidos da variação de carga mensal	72
Tabela 6 - Localização exata das fontes de AMTs frente aos medidores	73
Tabela 7 - Resultados para faltas FT em sistemas subcarregados sem SVC	77
Tabela 8 - Resultados para faltas FTT em sistemas subcarregados sem SVC	78
Tabela 9 - Resultados para faltas 3FT em sistemas subcarregados sem SVC.....	78
Tabela 10 - Resultados para faltas FT em sistemas com cargas nominais e sem SVC	79
Tabela 11 - Resultados para faltas FFT em sistemas com cargas nominais e sem SVC.....	80
Tabela 12 - Resultados para faltas 3FT em sistemas com cargas nominais e sem SVC.....	80
Tabela 13 - Resultados para faltas FT em sistemas sobrecarregados sem SVC	81
Tabela 14 - Resultados para faltas FFT em sistemas sobrecarregados sem SVC ...	82
Tabela 15 - Resultados para faltas 3FT em sistemas sobrecarregados sem SVC ...	82
Tabela 16 - Resultados para faltas FT em sistemas subcarregados com SVC.....	83
Tabela 17 - Resultados para faltas FFT em sistemas subcarregados com SVC	84
Tabela 18 - Resultados para faltas 3FT em sistemas subcarregados com SVC.....	84
Tabela 19 - Resultados para faltas FT em sistemas com cargas nominais e SVC ...	85
Tabela 20 - Resultados para faltas FFT em sistemas com cargas nominais e SVC ..	86
Tabela 21 - Resultados para faltas 3FT em sistemas com cargas nominais e SVC ..	86
Tabela 22 - Resultados para faltas FT em sistemas sobrecarregados com SVC	87
Tabela 23 - Resultados para faltas FFT em sistemas sobrecarregados com SVC ...	88
Tabela 24 - Resultados para faltas 3FT em sistemas sobrecarregados com SVC ...	88
Tabela 25 - Taxa de acerto dos Localizadores de AMTs	103
Tabela 26 - Variação da taxa de acerto na presença de SVCs.....	103
Tabela 27 - Ocorrência de AMTs por casos simulados	104

Lista De Abreviações e Siglas

QEE	Qualidade da Energia Elétrica
EP	Eletrônica de Potência
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SVC	<i>Static VAR Compensator</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
TSC	<i>Thyristor-switched Capacitor</i>
TCR	<i>Thyristor-controlled Reactor</i>

Lista de Símbolos

V_{PU}	Tensão por unidade
Ω	Unidade de resistência elétrica (ohm)
Φ	Unidade que representa fase
Yy	Ligação estrela-estrela
Dy	Ligação delta-estrela
kV	Unidade de tensão (quilovolt)
kWh	Unidade de energia (quilowatts-hora)
$S_{3\phi}$	Potência aparente trifásica
I_e	Corrente de Excitação
X_C, X_L	Impedância capacitiva e reativa
C	Capacitância
L	Reatância
ω	Unidade de velocidade angular (radianos por segundo)
MVA	Unidade de potência aparente (mega volt-ampere)
A	Unidade de corrente (ampere)
Hz	Unidade de frequência (Hertz)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2	MOTIVAÇÃO.....	18
1.3	OBJETIVOS	18
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
2	CONCEITOS TÉCNICOS.....	20
2.1	ESTUDO DOS AMTs	20
2.1.1	Normalização dos AMTs.....	20
2.1.2	Caracterização dos AMTs	21
2.1.3	Origem dos AMTs.....	24
2.1.4	Prejuízos Causados por AMTs	26
2.2	LOCALIZADOR DE AMTs	27
2.2.1	Conceitos de Localização de AMTs.....	29
2.2.2	Modelos de Localização de AMTs	29
2.2.3	O Método de Localização de AMTs.....	32
2.2.4	Estudo do comportamento da potência complexa	35
2.2.5	Conjunto de Lógicas Condicionais.....	38
2.3	INTRODUÇÃO A COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA	39
2.3.1	Introdução a potência reativa em linhas	40
2.3.2	Compensadores Síncronos de Reativos	42
2.3.3	Compensação Estática de Reativos	43
2.3.3.1	Banco de capacitores fixos e com chaveamentos mecanizados	43
2.3.3.2	Reatores fixos e com chaveamento mecanizado.....	46
2.3.3.3	Capacitor Chaveado por Tiristor	46
2.3.3.4	Reator Controlado por Tiristor.....	48
2.3.3.5	Compensador Estático de Reativos	52
3	MODELAGEM.....	57
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	57
3.2	SISTEMA ELÉTRICO DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO.....	57
3.2.1	Modelo de Fonte de Tensão	58
3.2.2	Modelo do Transformador de Potência Trifásico	59
3.2.3	Modelo do Equivalente PI.....	59

3.2.4	Modelo de Linhas <i>T-line</i>	61
3.2.5	Modelo de Gerador Síncrono com Transformador de Acoplamento.....	62
3.3	MODELAGEM DO LOCALIZADOR DE FONTES DE AMTs.....	64
3.4	MODELAGEM DO SVC	65
4	RESULTADOS	70
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	70
4.2	SISTEMA ELÉTRICO SEM SVC	72
4.2.1	Sistema Elétrico Subcarregado	76
4.2.1.1	Caso para faltas Fase-terra.....	76
4.2.1.2	Caso para faltas Fase-fase-terra.....	77
4.2.1.3	Caso para faltas Trifásicas à terra	78
4.2.2	Sistema Elétrico com Carga Nominal	79
4.2.2.1	Caso para faltas Fase-terra.....	79
4.2.2.2	Caso para faltas Fase-fase-terra.....	79
4.2.2.3	Caso para faltas Trifásicas à terra	80
4.2.3	Sistema Elétrico com Sobrecarga.....	81
4.2.3.1	Caso para faltas Fase-terra.....	81
4.2.3.2	Casos para faltas Fase-fase-terra.....	81
4.2.3.3	Casos para faltas Trifásicas à terra.....	82
4.3	SISTEMA ELÉTRICO COM SVC.....	83
4.3.1	Sistema Elétrico Subcarregado	83
4.3.1.1	Casos para faltas Fase-terra.....	83
4.3.1.2	Casos para faltas Fase-fase-terra.....	83
4.3.1.3	Casos para faltas Trifásicas à terra.....	84
4.3.2	Sistema Elétrico com Carga Nominal	85
4.3.2.1	Casos para faltas Fase-terra.....	85
4.3.2.2	Casos para faltas Fase-fase-terra.....	85
4.3.2.3	Casos para faltas Trifásicas à terra.....	86
4.3.3	Sistema Elétrico Sobrecarregado	87
4.3.3.1	Casos para faltas Fase-terra.....	87
4.3.3.2	Casos para faltas Fase-fase-terra.....	87
4.3.3.3	Casos para faltas Trifásicas à terra.....	88
4.4	CASOS PARTICULARES	89
4.4.1	Sistema elétrico subcarregado	89
4.4.1.1	Casos para faltas Fase-terra.....	89

4.4.1.2	Caso para faltas Fase-fase-terra.....	92
4.4.1.3	Caso para faltas Trifásicas à terra	93
4.4.2	Sistema elétrico com carga nominal	94
4.4.2.1	Casos para faltas Fase-terra.....	94
4.4.2.2	Caso para faltas Fase-fase-terra.....	96
4.4.2.3	Caso para faltas Trifásicas à terra	97
4.4.3	Sistema elétrico sobrecarregado	98
4.4.3.1	Casos para faltas Fase-terra.....	98
4.4.3.2	Caso para faltas Fase-fase-terra.....	100
4.4.3.3	Caso para faltas Trifásicas à terra	101
4.5	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	102
5	CONCLUSÕES	105
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
5.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS.....	108
	A N E X O.....	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas elétricos de potência são fundamentais e suas contínuas modernizações são imprescindíveis na condução do desenvolvimento da sociedade e no crescimento econômico da nação. Sistemas de geração, transmissão e distribuição estão em constante expansão para atender a demanda e quanto mais complexos, adversidades relacionadas à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) são cada vez mais frequentes [1].

Diversos equipamentos instalados no sistema elétrico são dependentes da boa qualidade da energia, pois são sensíveis a mudanças abruptas e de grande magnitude nos níveis de tensão aos quais foram projetados. Incluídos no contexto, estão os sistemas compostos por Eletrônica de Potência (EP), geração eólica e fotovoltaica, compensadores estáticos, acionadores de motores de indução, transmissão HVDC e os demais sistemas não lineares são extremamente sensíveis a distúrbios na tensão e eles compõem ou estão presentes na maioria dos sistemas elétricos [2]. De acordo com [2], aproximadamente 70% de toda potência que flui pelo sistema elétrico norte americano está relacionada aos sistemas com eletrônica de potência.

Com o atual cenário, a QEE ganha notoriedade no que tange a operação contínua de sistemas elétricos e disponibilidade da energia elétrica. Desta forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece os requisitos mínimos da qualidade do produto e de fornecimento, os quais são divididos e tratados em 7 seções no módulo 8 do PRODIST [3], segregados por distúrbios transitórios e em regime permanente [1]. A recorrente regulação da falta de qualidade em sistemas elétricos é a primeira etapa na estruturação de duas áreas de elevado impacto econômico: mitigação e compartilhamento de responsabilidades.

No que compreende o contexto desse trabalho, dentre outros distúrbios de QEE, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são os grandes responsáveis por distúrbios transitórios e dentre todos os seus segmentos, os Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMTs) são aqueles mais passíveis de ocorrência em Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) [4]. Os AMTs são caracterizados por se propagarem pela rede elétrica, devido a diversidade de seus

causadores e pela complexidade de localização das fontes. Tal fato é um impasse tanto às concessionárias de energia elétrica, que são responsáveis pela operação da rede, quanto aos consumidores, devido a responsabilização dos agentes causadores de prejuízos relacionados a AMTs.

No cenário exposto, o âmbito de localização de fontes de AMTs está em constante desenvolvimento e diversas pesquisas trazem alternativas práticas com o intuito de aprimorar as regulações vigentes. Dentre elas, o localizador de AMTs proposto em [5] é uma ótima alternativa a ser empregada em SEPs, pois trata de uma implementação simples que utiliza a variação do fluxo de potência pela fronteira monitorada como recurso para a localização de AMTs originados de curtos-circuitos.

Por serem consideradas os principais agentes causadores de distúrbios na rede, inclusive como fontes de afundamentos de tensão, as faltas são tratadas nesse trabalho e protagonistas na tese exposta em [5]. Elas são contingências e dependem diretamente das características do sistema elétrico, que, por sua vez, os distúrbios em sistemas de transmissão são originados frequentemente por intempéries, enquanto em sistemas industriais, a falha humana é o principal causador de faltas (procedimentos de operação, manutenção e segurança) [5].

Em decorrência aos diversos meios causadores de faltas que propagam para AMTs, maneiras de mitigação dos afundamentos na tensão são complexas de implementarem, entretanto, algumas configurações de rede com equipamentos elétricos previamente instalados para a correção de outras imperfeições, podem contribuir de maneira positiva com manutenção dos níveis de tensão durante os distúrbios. O *Static VAR Compensator* (SVC), ou simplesmente Compensador Estático de Reativos, é um desses equipamentos e outro assunto desta dissertação. Ele trabalha na correção dos níveis de tensão através do controle da potência reativa que flui pelo barramento no qual está instalado e durante as faltas [6], podem contribuir com a injeção da energia reativa armazenada em seus elementos passivos.

Assim, a validação do localizador de fontes de AMTs exposto em [5] nos diversos meios e configurações de redes elétricas é de extrema importância, principalmente naqueles onde o fluxo de potência, que é o recurso utilizado na localização de faltas, é modificado devido à presença de compensadores estáticos.

1.2 MOTIVAÇÃO

A localização de AMTs é um tema em construção no atual cenário e regulamentos quanto a este assunto, ainda são embrionários. A ANEEL estabelece mediante ao Módulo 8 do PRODIST, termos técnicos quanto a definição e mensuração de AMTs, todavia, as condições quanto a penalização e restituição financeira dos agentes causadores de afundamentos de tensão não são estabelecidas em norma, ao contrário do que ocorre para variações de tensão em regime permanente, onde esses termos são bem definidos.

Tal cenário viabiliza uma gama de novos estudos com o intuito de solucionar as consequências causadas por AMTs. Dentre elas, enquadra-se o localizador de fontes de AMTs desenvolvido em [5], o qual visa aprimorar a regulação vigente quanto ao compartilhamento de responsabilidades devido aos agentes causadores de distúrbios nos SEPs. Tais eventos causam prejuízos financeiros consideráveis aos consumidores finais, devido a composição das atuais cargas elétricas, que são sensíveis a variações de tensão [7].

1.3 OBJETIVOS

Com o objetivo de validar o localizador de AMTs desenvolvido em [5], esse trabalho testa a funcionalidade e robustez do dispositivo aplicado em um sistema elétrico real. A plataforma RTDS, ferramenta de simulação utilizada, obtém maior fidelidade dos resultados, pois o sistema é simulado em tempo real e perturbações transitórias causadas por curtos-circuitos são introduzidas na análise.

Na sequência da dissertação, são simuladas as instalações de SVCs, equipamentos importantes na manutenção da tensão de sistemas elétricos e possuem uma dinâmica na qual, através de injeção de energia reativa, incrementam ou decrementam os níveis de tensão do barramento onde se encontra instalado, além dos barramentos adjacentes. Os SVCs são importantes na análise do localizador de fontes de AMTs, porque influenciam diretamente no fluxo de potência. A velocidade de chaveamento dos tiristores do compensador permite que no momento de distúrbio, seu estado altere para suprir a energia reativa requerida pela falta.

Assim, as simulações com a presença de dispositivos como o SVC, que possuem Eletrônica de Potência em sua composição, são importantes na validação

do localizador de AMTs, pois os sistemas elétricos atuais, não possuem apenas elementos passivos e geração síncrona.

A presente dissertação é a continuação do desenvolvimento e implementação do localizador de AMTs desenvolvido em [5], porém, tendo agora como objetivo principal avaliar o desempenho do localizador utilizando como caso teste um sistema elétrico de grande porte também composto por SVCs. Serão avaliados vários cenários, os quais são definidos por conjuntos com e sem a presença de SVCs, e com diferentes níveis de carregamento.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do atual capítulo, a dissertação é composta por outros quatro, os quais foram segregados desde a base teórica até a apresentação dos resultados.

O capítulo 2 inicia com a introdução do conceito técnico de AMTs. É apresentado um levantamento de informações presentes em outros materiais, com reforço dos termos presentes na atual norma redigida pelos órgãos reguladores. Em seguida, é apresentada a concepção do localizador de AMTs inserido no estudo e por fim, uma introdução de SVCs é apresentada.

No capítulo 3 é apresentado a modelagem do sistema elétrico na plataforma RTDS. São apresentados os componentes elétricos utilizados na estruturação do SEP como, linhas de transmissão e geradores síncronos. Posteriormente, são apresentadas a lógica de funcionamento tanto do localizador de AMTs quanto do SVC.

No capítulo 4 os resultados são apresentados. Foram analisadas diferentes configurações de sistemas elétricos, com diferentes níveis de carregamento para que ao final do estudo, os resultados validassem a implementação do localizador de AMTs frente a diversos eventos de faltas aplicadas.

No capítulo 5 a conclusão do trabalho é apresentada, juntamente com sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas e em seguida um único anexo.

2 CONCEITOS TÉCNICOS

2.1 ESTUDO DOS AMTs

2.1.1 Normalização dos AMTs

Os AMTs são definidos como um tipo específico de Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) e são determinados pela magnitude da tensão remanescente e sua duração. Vários agentes reguladores nacionais e internacionais estabelecem padrões para medirem o evento, além de diversos estudos publicados em meio científico, o qual mostram a relevância dos distúrbios causados pelos AMTs no atual cenário do setor elétrico.

A norma IEEE 1159-2019 [8] caracteriza que os AMTs ou Voltage Sags, da literatura inglesa, são eventos com duração de 0,5 ciclos a 1 segundo, no qual tensão remanescente encontra-se entre 0,1 e 0,9 pu da tensão nominal durante esse período.

A norma IEC 61000-4-11 [9] os AMTs ou Voltage Dips são estabelecidos de forma distinta nas frequências de 50 e 60 Hz, referidos ao número de ciclos, onde o ponto de monitoramento é dividido em 4 classes e para cada qual existe um limite de acordo com a magnitude e a duração, que não será especificado neste trabalho.

A regulação vigente no Brasil estabelecida pelo Módulo 8 do PRODIST [3] caracteriza de forma semelhante os AMTs, em relação a [8], onde a duração da variação será maior ou igual a um ciclo e menor ou igual a 3 segundos, com a magnitude da tensão remanescente entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz da tensão.

Através dos Procedimentos de Rede concebido pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), que opera a rede básica de transmissão e consumidores de classe igual ou superior a 230 kV, no Submódulo 9.7 [10] há uma regulação que define os AMTs analogamente ao PRODIST em [3].

A Tabela 1 define como são regulamentadas as VTCDs pelo PRODIST em [3], destacando os AMTs, as quais serão tratadas neste trabalho.

Tabela 1 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Valor Eficaz da Tensão
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
	Elevação	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
	Elevação	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Adaptado de [3]

2.1.2 Caracterização dos AMTs

A caracterização dos AMTs deve utilizar o menor número de parâmetros possíveis, sem comprometer o seu estudo, para que os medidores não sejam sobrecarregados com informações pouco relevantes. Basicamente a essência do AMT encontra-se na magnitude do afundamento e sua duração, apesar de haver outras maneiras de mensurar seu comportamento, como “salto de ângulo” e o ponto de início do evento em relação a tensão senoidal.

Os eventos registrados em uma única fase não necessitam de um tratamento diferenciado, pois apenas o valor da tensão durante o distúrbio é necessário para a definição da severidade do AMT [11]. A equação (2.1) demonstra o cálculo da magnitude da tensão residual em p.u (V_{pu}) quando ela passa pelo seu menor valor eficaz.

$$V_{pu} = \frac{V_{remanescente}}{V_{ref}} \quad 2.1$$

Onde:

$V_{remanescente}$ é o nível de tensão remanescente durante o AMT

V_{ref} é a tensão nominal de referência

Desta maneira, conforme o PRODIST em [3], se V_{pu} possuir valor entre 0,9 e 0,1 durante o intervalo de tempo já estabelecido, tal evento caracteriza-se como um AMT.

Contudo, para eventos em sistemas trifásicos, a caracterização do AMT é mais elaborada, pois mais de uma fase pode se comportar de maneira anômala.

O primeiro procedimento para caracterização dos AMTs é feito pela agregação de fases. Esse procedimento tem o objetivo de agregar todos os parâmetros obtidos nas três fases do sistema e sintetizá-los em apenas um par de parâmetros (magnitude e duração). A magnitude do afundamento será considerada o valor que mais se distanciou da referência, ou o menor valor residual da tensão obtido. A duração é obtida aplicando um dos três critérios de agregação demonstrados a seguir [3].

- 1) *Agregação por União de Fases*: A duração do AMT começa a contabilizar a partir do momento em que o primeiro dos eventos transcende o limite inferior (0,9 p.u) e finaliza quando o último dos eventos retorna para determinado limite (0,9 p.u), conforme a Figura 1.

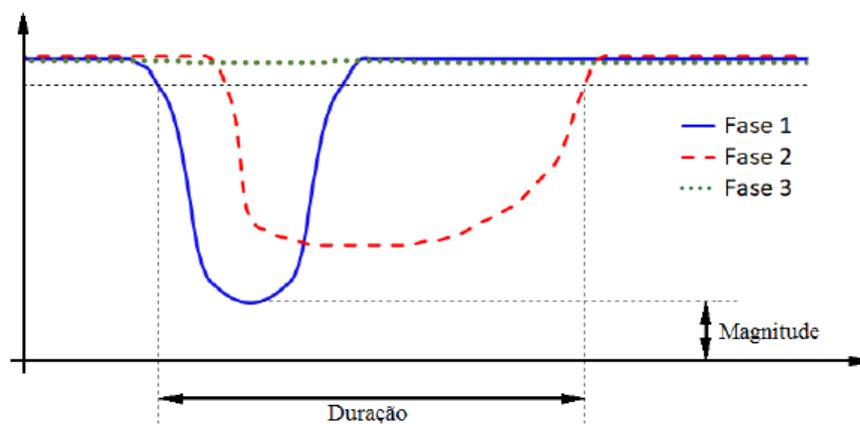


Figura 1 - Agregação por União de Fases

Fonte: Adaptado de [11]

- 2) *Agregação por parâmetros críticos*: A duração é definida como a maior entre os três eventos e o valor da magnitude que mais se distanciou do valor da tensão de referência. A Figura 2 exemplifica essa situação.

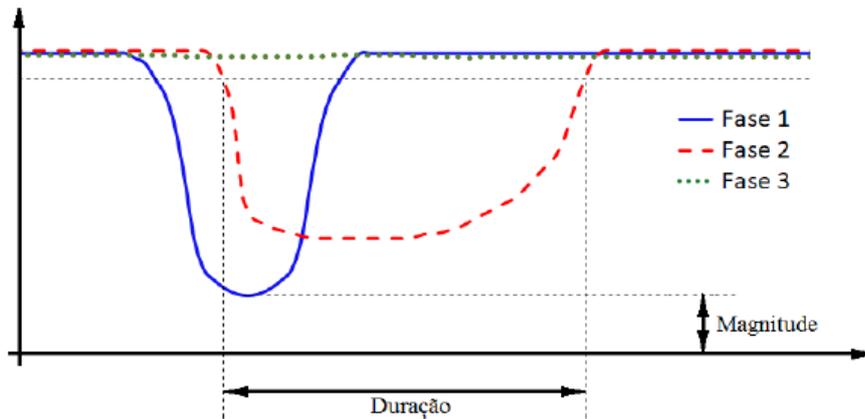


Figura 2 - Agregação por Parâmetros Críticos

Fonte: Adaptado de [11]

3) *Agregação pela Fase Crítica*: A duração é definida para o evento de amplitude crítica, o qual possui o menor valor eficaz em relação a tensão nominal durante o AMT. A Figura 3 exemplifica esse procedimento.

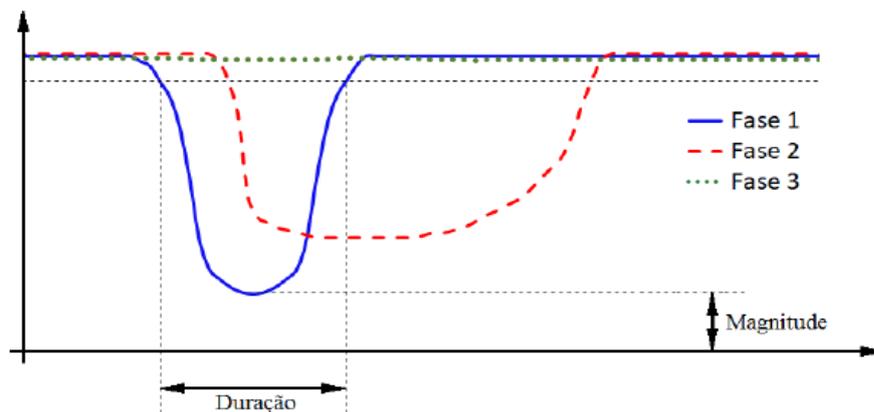


Figura 3 - Agregação pela Fase Crítica

Fonte: Adaptado de [11]

O PRODIST aconselha o uso do primeiro procedimento, contudo os outros dois critérios podem ser utilizados de forma alternativa no estudo de AMTs.

O segundo procedimento utilizado para a caracterização dos AMTs é conhecido como agregação temporal. Nele os eventos consecutivos ocorridos dentro do intervalo de três minutos são agregados compondo um único evento, para um mesmo ponto de monitoramento [3] [12]. Esse método é relevante devido a religamentos na rede proporcionados pelo sistema de proteção.

A agregação temporal será feita através dos parâmetros críticos dos eventos consecutivos analisados. Assim, a amplitude crítica é considerada como o valor eficaz

que mais se distanciou do valor nominal ou, no mesmo conceito, o menor valor residual da tensão registrado. Além disso, a duração crítica é considerada como a de maior período entre todas registradas dentro do intervalo de três minutos. A Figura 4 demonstra como é realizada a agregação temporal.

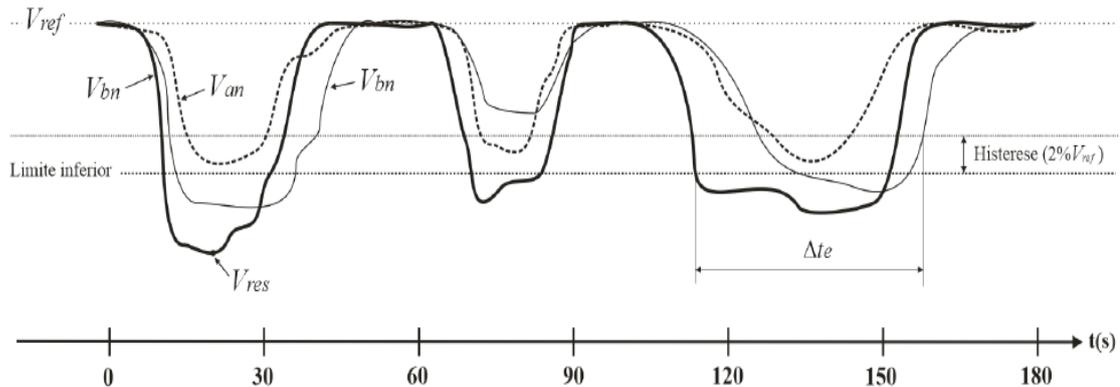


Figura 4 - Agregação temporal para AMTs consecutivos ocorrendo dentro do intervalo de 3 minutos

Fonte: Adaptado de [13]

Onde:

V_{res} é o valor da tensão crítica;

Δt_e é o valor da duração crítica;

Com o intuito de evitar subjetividade, em [12] sugere-se que quando a duração crítica de um evento extrapola o intervalo de análise de três minutos, sua duração deve continuar sendo calculada até que o valor eficaz da tensão afetada volte aos padrões estabelecidos.

2.1.3 Origem dos AMTs

Os AMTs são comumente vivenciados em SEP, isso devido a dinâmica do sistema elétrico, como a necessidade de manobras, energização de equipamentos e subsistemas, acionamento de cargas, mas são primordialmente ocasionados por curtos-circuitos na rede [14]. Esses são decorrentes de faltas no sistema elétrico, quando uma ou mais fases do circuito possui uma conexão de baixa impedância entre si, com o neutro ou à terra, acarretando elevados níveis de corrente [15].

Contudo, como os principais causadores de faltas são agentes externos, o estudo feito em [16] analisa dados oferecidos por 13 concessionárias de distribuição dos Estados Unidos com características particulares, como os perfis de cargas,

condições climáticas de suas localidades, configuração da rede e dos sistemas de proteção elétrica. Como demonstra a Figura 5, as descargas atmosféricas e o contato das redes aéreas com árvores são os principais responsáveis pelas faltas no sistema de distribuição elétrico, constatando as adversidades das intempéries na QEE.

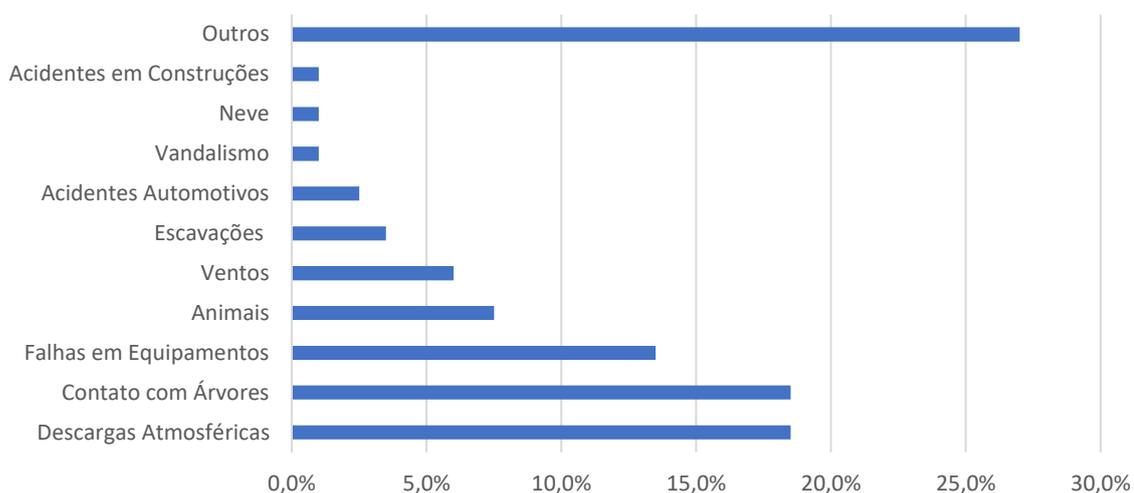


Figura 5 - Principais Agentes Causadores de Faltas

Fonte: Adaptado de [16]

Um estudo analisando uma linha de transmissão de 500 kV em [17] demonstra que para níveis de tensão mais elevados e com infraestrutura distinta dos sistemas de distribuição, as descargas atmosféricas também são os principais causadores de faltas no SEP.

Ao analisar os tipos de faltas em uma rede de distribuição elétrica, fica evidente que as faltas monofásicas à terra são as mais susceptíveis de ocorrência, principalmente por envolver apenas uma fase [16]. A Figura 6 indica que nas regiões das 13 distribuidoras as faltas fase-terra representam cerca de 79% das ocorrências.

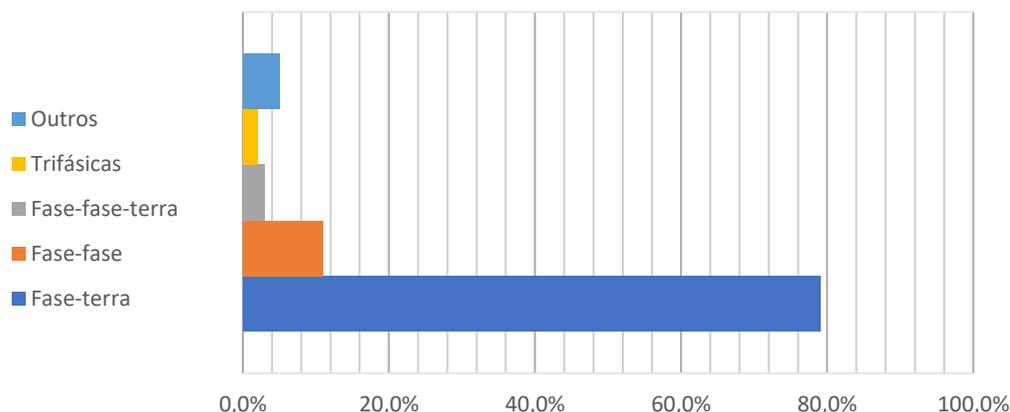


Figura 6 - Porcentagem de Ocorrência de cada Tipo de Falta

Fonte: Adaptado de [16]

Percebe-se que excluindo as faltas monofásicas à terra, os outros tipos de distúrbios possuem o número de ocorrências próximas, o qual podem variar de acordo com a configuração da rede e os níveis de tensão dela.

2.1.4 Prejuízos Causados por AMTs

Com o aumento da relevância dos AMTs frente aos distúrbios que causam perturbações no sistema elétrico e problemas com a QEE, estudos referentes a prejuízos oriundos desse fenômeno ganham notoriedade no atual cenário elétrico.

Em geral os consumidores são afetados pelos AMTs, desde os residenciais com o desconforto pelo mau funcionamento de seus equipamentos eletrodomésticos durante o distúrbio, até os casos mais relevantes com os consumidores de grande porte e industriais, onde um AMT pode acarretar na interrupção parcial ou total da produção industrial. Desta forma, nos prejuízos oriundos a AMTs devem ser contabilizados a perda de matéria prima, o conserto e substituição de equipamentos danificados, a perda da produção quando a ocorrência do evento, somada a perda da produção durante o período até a restauração plena do processo produtivo, estabelecida pelo patamar de produção no momento pré-AMT [18].

Uma análise do prejuízo financeiro causado por AMTs foi trabalhado em [19], onde os eventos nas redes básica e de distribuição de 138 kV de uma concessionária foram monitorados. O valor médio considerado de perdas foi de 2,80 US\$/kWh, o qual representou no total de quatro anos de análise um prejuízo de US\$ 21,1 milhões para os consumidores finais.

Para enfatizar o tema, um sistema malhado de transmissão e distribuição do Reino Unido de 295 barras foi utilizado como base para a análise de prejuízos oriundos das interrupções de energia acrescidos de AMTs [20]. Assim, foram explorados vários cenários e divididos os clientes em alguns níveis de relevância, no qual o prejuízo de um grande consumidor de carga por dia pode chegar a 531.000,00 €. Ao examinar detalhadamente as cargas instaladas nos barramentos, como o seu perfil e o período de utilização, constatou-se que o prejuízo financeiro aos consumidores instalados em um dos barramentos pode chegar a 87.700,00 € ao ano, proveniente de AMTs.

2.2 LOCALIZADOR DE AMTS

A legislação frente ao compartilhamento de responsabilidades no Brasil ainda é embrionária e está em fase de aprimoramento. Tal tema é de extrema importância pois, as atuais instalações do setor elétrico sofrem constantes mudanças, onde os sistemas de geração que estavam centralizadas em grandes usinas e eram definidas por convenção como a montante do sistema, migram gradativamente para centros distribuídos, com a disseminação da geração fotovoltaica e eólica. Somando-se a isto, observa-se que há uma grande inserção de cargas não lineares na rede.

O incremento da geração distribuída no setor elétrico auxilia os sistemas de distribuição e transmissão, sobretudo nos momentos de sobre carregamento e controle de tensão [21]. Entretanto, essa gama de fontes de geração dificulta a atribuição de responsabilidades àqueles que transgredirem os limites dos indicadores de QEE.

Os dispositivos controlados por eletrônica de potência também têm grande relevância na modificação da dinâmica dos sistemas elétricos. Dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*), por exemplo, controlam em tempo real o fluxo de potência e a regulação da tensão [6], e são determinantes no comportamento dos distúrbios na rede, interferindo diretamente na atribuição de responsabilidades.

Com a diversificação do SEP brasileiro, estudos de análises de ocorrências e perturbações tornam-se mais complexos. e o submódulo 9.7 dos Procedimentos de Rede [10] tratam desse tema quando ocorrido na rede básica, o módulo 8 do PRODIST [3] especifica os requisitos para a não transgressão dos níveis de qualidade de energia elétrica, além de outras normas internacionais, como a IEC 61000-4-30,

que tratam do mesmo assunto. Entretanto, quando o tema está relacionado com a atribuição de responsabilidades advindas de AMTs e sua propagação na rede elétrica, o assunto é totalmente recente e está em fase de desenvolvimento.

Para tal estudo, os localizadores de AMTs são essenciais pois, basicamente possuem a função de identificar qual agente do setor elétrico é o real causador do distúrbio.

Vários trabalhos sobre localizadores de AMTs são desenvolvidos na literatura técnica e alguns estão sendo aplicados em laboratórios. A título de exemplo tem-se [22], o qual baseou informações em um banco de dados de um complexo elétrico real, e por meio de uma rede neural obteve o causador do distúrbio. Outros estudos como em [23], analisam o salto do ângulo de tensão após o AMT para detectar qual lado da fronteira está ocasionando a perturbação.

Nesse contexto, alguns métodos de localização são apresentados em [5] através de uma revisão bibliográfica, todavia, cada um com suas limitações e complexidade de aplicações. Uma das estratégias desenvolvidas é a localização de AMTs baseado em medições sistêmicas, a qual se enquadra em medições pontuais de grandezas elétricas da rede que são processadas através de algoritmos e uma localização exata da ocorrência é estabelecida. A localização baseada em medições pontuais de tensão analisa basicamente a intensidade do AMT por meio de sinais de tensão obtidos nos barramentos. A localização baseada em medições pontuais de corrente pode ser realizada pela decomposição dos sinais de corrente em sequência positiva e a comparação aos mesmos pré-AMT e durante o distúrbio, por exemplo. A localização baseada em medições de sinais de alta frequência avalia amostras de sinais de tensão e corrente e verifica a compatibilidade desses com os de frequências elevadas, característicos de faltas. Por fim, a localização baseada em medição pontual de corrente e tensão foi vista com a maior amplitude de trabalhos publicados e é baseada fundamentalmente na utilização de sinais de tensão e corrente para agregação de outras grandezas elétricas, como o fluxo de potência e impedância das linhas.

Conclui-se que os localizadores podem ser configurados para vários tipos de sistemas elétricos, no qual alguns permitem a tomada de decisão se os causadores

de distúrbios estão situados a montante ou a jusante da região monitorada até aqueles que localizam propriamente a origem da perturbação.

2.2.1 Conceitos de Localização de AMTs

O método exposto nesse trabalho tem a finalidade de detectar qualitativamente a origem do distúrbio, se o mesmo está a montante ou a jusante da fronteira monitorada, independente das características e topologias dos sistemas elétricos monitorados, conforme proposto em [5].

Com o intuito de elucidar melhor alguns conceitos da maneira de atuação do localizador de AMTs desenvolvido em [5], é conveniente estabelecer a definição de “fronteira”. Essa é determinada como o limite entre duas regiões com níveis de tensões diferentes, no qual pelo menos um transformador de potência realiza tal função. Subestações onde concessionárias de distribuição têm acesso a rede básica, subestações de compartilhamento entre duas ou mais concessionárias de transmissão ou distribuição e subestações onde a geração de energia elétrica é integrada ao sistema elétrico, todas com pelo menos dois níveis de tensões, são exemplos de regiões de fronteiras.

Outra definição importante são os sistemas a montante e a jusante. Anteriormente, pela singularidade do fluxo de potência de grandes centros de geração para regiões de consumo de carga, esses eram definidos como sistemas a montante e jusante, respectivamente. Entretanto, com a acentuada inserção de geração distribuída e difusão de dispositivos controlados por eletrônica de potência, o SEP fica gradativamente mais diversificado e conseqüentemente a complexidade dos estudos de fluxo de potência aumentam. Assim, sistemas a montante são definidos como aqueles com o maior nível de tensão e, por conseguinte, os sistemas a jusante são aqueles com o menor nível de tensão.

2.2.2 Modelos de Localização de AMTs

A importância imposta pela localização de AMTs exige uma maior abordagem do assunto em estudos e publicações de artigos. A seguir, são demonstradas algumas revisões bibliográficas recentes, com o objetivo de apresentar os diferentes métodos de localização.

O modelo de [24] propõe um aprimoramento de localizadores de AMTs, no que tange a localização a montante ou jusante do objeto monitorado. Ele determina que em sistemas de distribuição, apenas a diferença de potencial entre dois medidores de qualidade, pode determinar em qual região da fronteira ocorre o curto-circuito.

O método utiliza medições de sequência positiva da tensão, precedentes e durante ao distúrbio, de dois pontos adjacentes do sistema e em seguida determina a região de ocorrência da falta. Considerando o medidor a montante na barra A e o medidor a jusante na barra B, é possível determinar a magnitude da componente positiva da tensão V_{AB} .

Assim, as faltas a montante são representadas pela equação (2.2):

$$V_{AB_{Faula}} \gg V_{AB_{Pré-Faula}} \quad 2.2$$

Em consequência, faltas a jusantes são representadas pela equação (2.3):

$$V_{AB_{Faula}} \ll V_{AB_{Pré-Faula}} \quad 2.3$$

Esse método dispensa mensuração da corrente e possui vantagem sobre outros métodos, como aqueles que empregam valores da potência aparente na localização de AMTs.

O método apresentado por [25], utiliza os mesmos princípios da função direcional de sobrecorrente, presente nos IEDs de proteção (ANSI 67), para determinar a região da falta. A técnica processa valores de sequência positiva da corrente, a qual está presente em todos os tipos de faltas, antecedente e durante o distúrbio e posteriormente, através de uma regra matemática, é tomada a decisão. O método dispensa informações da magnitude da tensão durante a falta, a qual é uma particularidade da função 67, responsável pela polarização da direcionalidade.

Assim, os valores da magnitude da corrente e o salto vetorial $\Delta\delta$ entre elas são utilizados. Para faltas a jusante, a equação (2.4) é tomada como base:

$$|I_{falta}| > |I_{pré-falta}| \text{ e } \Delta\delta < 0 \quad 2.4$$

Consequentemente, para faltas a montante, é utilizada a equação (2.5):

$$|I_{falta}| \leq |I_{pré-falta}| \text{ ou } \Delta\delta > 0 \quad 2.5$$

Tal método reduz falhas na localização, pois faltas severas e próximas ao localizador afundam a tensão de tal modo que o método direcional de sobrecorrente perde a referência de direcionalidade. Entretanto, os IEDs atuais possuem tecnologias que minimizam esses erros.

Em [26], a técnica é fundada no cálculo da impedância equivalente de um circuito radial na localização de afundamento originados de faltas. A mensurações das tensões e correntes trifásicas de dois medidores em série do circuito, normalmente localizados em barramentos distintos é necessária, para o cálculo das impedâncias antecedentes e durante a falta. A equação (2.6) demonstra o procedimento:

$$Z_{emi}(t) = \Delta u_{mi}(t) / \Delta i_{mi}(t) = R_{emi}(t) + jX_{emi}(t) \quad 2.6$$

Onde, as equações (2.7) e (2.8) apresentam a diferença de medidas de corrente e tensão:

$$\Delta u_{mi}(t) = u_{dmi}(t) - u_{pmi}(t) \quad 2.7$$

$$\Delta i_{mi}(t) = i_{dmi}(t) - i_{pmi}(t) \quad 2.8$$

Por fim, a direcionalidade da potência ativa, representada pela resistência equivalente, era utilizada como referência, na localização de faltas a montante, pela equação (2.9), e a jusante, pela equação (2.10).

$$R_{emi} > 0, \text{ eventos a montante} \quad 2.9$$

$$R_{emi} < 0, \text{ eventos a jusante} \quad 2.10$$

Em [27] é introduzido uma ideologia distinta de localização de AMTs. Inicialmente, é necessário elaborar um banco de dados com os valores de curto-circuito da rede em análise, estabelecidos por meios de estudos. Esses dados serão confrontados posteriormente com os mensurados pelos medidores instalados no sistema elétrico.

Tal método é aplicado em sistemas elétricos radiais, semelhantes a sistemas de distribuição e possuem uma vantagem sobre outros processos, pois após a localização da falta, é estabelecido a distância do distúrbio na linha, em relação ao medidor.

A técnica utilizada em [28] emprega métodos analíticos para determinar a região (montante ou jusante) do AMT. Previamente, é utilizado a Máquina de Vetores de Suporte e métodos de combinação com intuito de extrair os benefícios das duas metodologias e criar um algoritmo ideal da localização de faltas. Posteriormente, foram realizadas simulações com esse e demais métodos analíticos e apresentados os resultados ao final do estudo, que comprovam a eficácia da localização.

Por fim, é apresentado por [29] o estudo que compara as diversas técnicas de localização de AMTs e são definidas por localizações a montante ou a jusante. Eles são segregados em cinco grupos principais, definidos pelo/a:

- Variação da potência aparente ou energia;
- Variação da corrente;
- Variação da impedância equivalente;
- Mensuração da tensão;
- e Mensuração da corrente;

Após as simulações, duas metodologias propostas pelos autores de [30], quais ambas são fundamentadas na variação da potência complexa, e outra proposta por [31], qual fundamenta-se na variação da impedância equivalente foram as quais obtiveram a maior porcentagem de sucesso, com uma taxa de 88% após a realização de todos os testes.

A apresentação desses métodos de localização demonstra que há uma crescente pela compreensão do assunto, com diversas técnicas, onde foram apontadas suas essências.

2.2.3 O Método de Localização de AMTs

A premissa básica do localizador de AMT ora proposto, está na análise da potência que flui pelos terminais dos transformadores de fronteira. Para tal, foi feito um amplo estudo do comportamento da potência complexa em diversas configurações de sistemas elétricos em [5], e de fato concluiu que existem diferentes padrões. Entretanto, uma análise intrínseca dos valores da potência não é necessária, exigindo apenas o estudo do comportamento dela no plano complexo. A avaliação qualitativa do fluxo de potência simplifica a implementação do localizador.

As faltas em sistemas elétricos (curtos-circuitos), que pela predominância reativa das linhas como uma das únicas impedâncias observadas pela corrente, resultam em bruscas alterações do fluxo de potência reativa na rede. Essas correntes de curto-circuito geram elevadas quedas de tensões no sistema e conseqüentemente resultam em AMTs na região monitorada, além de uma alteração dos valores das tensões nas fases não afetadas (faltas assimétricas). Uma vez ocorrida a falta e o AMT associado, o localizador tem a função de registrar o estado do fluxo de potência complexa pré-AMT e durante a falta, que através de uma lógica condicional, analisará a trajetória da potência e identificará a origem da perturbação.

No localizador exposto em [5], os dados obtidos são apenas dos transformadores de potencial (TPs) instalados nos barramentos nos quais os terminais dos transformadores estão acoplados. Assim, a potência complexa é estimada a cada meio ciclo com base nos dados de placa do transformador. Esse método gera alguns atrasos no processamento, pois é necessária a decomposição das tensões de fase em componentes simétricas para o cálculo das correntes e posteriormente determinar a potência.

Com o intuito de otimizar esse processo, além dos dados das tensões obtidas nos TPs instalados nos barramentos, os valores medidos pelos transformadores de correntes (TCs) inseridos junto aos terminais dos transformadores serão utilizados, pois esses instrumentos são inerentes ao sistema de proteção das subestações. A partir dos dados obtidos, a potência complexa trifásica é calculada como ilustra a equação (2.11), reduzindo o tempo de apuração dos resultados.

$$S_{3\phi} = \dot{V}_{an} \times \dot{I}_{an}^* + \dot{V}_{bn} \times \dot{I}_{bn}^* + \dot{V}_{cn} \times \dot{I}_{cn}^* \quad 2.11$$

Como especificado anteriormente, apenas o estudo qualitativo da potência complexa é necessário. Assim, independente das perdas internas dos transformadores de potência, que no caso também são ínfimas, a potência terá o mesmo comportamento. Portanto, apenas os dados obtidos pelos transformadores de instrumento (TIs) do lado de alta tensão serão utilizados no cálculo do fluxo, pois isso caracterizará um localizador robusto e de rápido processamento.

Quanto ao monitoramento dos níveis de tensão, ele é realizado continuamente pelos TPs tanto no lado de baixa quanto no de alta tensão, a fim de que um possível

AMT em ambos os circuitos seja detectável. Os sinais obtidos são processados através de filtros digitais, onde a Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) é utilizada para obter as componentes fundamentais de módulo e ângulo da tensão. Em condições normais de operação, não havendo distúrbios, a potência complexa instantânea é calculada continuamente e armazenada por aproximadamente 38 milissegundos. Quando um AMT é detectado devido a uma falta, aquele valor pré-AMT memorizado é utilizado na comparação com os valores durante o distúrbio, para uma conseqüente tomada de decisão do localizador.

O fluxograma da Figura 7 apresenta de forma simplificada todo o método aqui exposto. Ele é executado a cada amostra dos sinais de tensão e corrente, utilizando o conceito de janelas deslizantes.

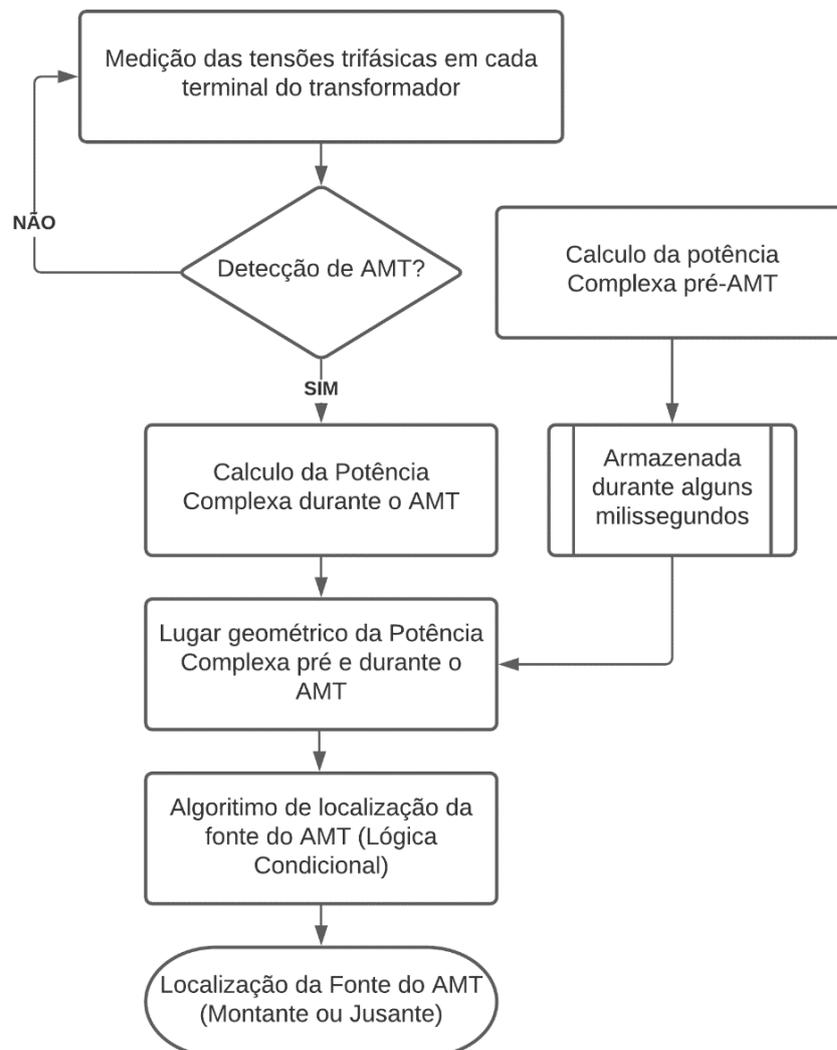


Figura 7 - Fluxograma do método de localização da fonte do AMT

A Figura 8 ilustra os possíveis lugares geométricos da potência no plano complexo. Ela possui qualquer valor em módulo e ângulo e pode ocupar qualquer um dos quatro quadrantes, representado pelos fluxos ativos e reativos, importados e exportados. A potência ativa será considerada como exportada (sentido jusante) quando ela estiver localizada no 1º e 4º quadrantes e conseqüentemente será considerada como importada (sentido montante) quando estiver no 2º e 3º quadrantes. A potência reativa indutiva será considerada como exportada se estiver no 1º e 2º quadrantes e como importada se estiver no 3º e 4º quadrantes. Essas localizações são convencionadas para permitir um estudo padronizado da potência complexa.

A região delimitada pelo círculo na Figura 8 representa a potência nominal do transformador de potência, referida como 1 p.u., e normalmente é a região de operação do equipamento. Caso a potência encontre-se fora desse círculo, o transformador estará sobrecarregado.

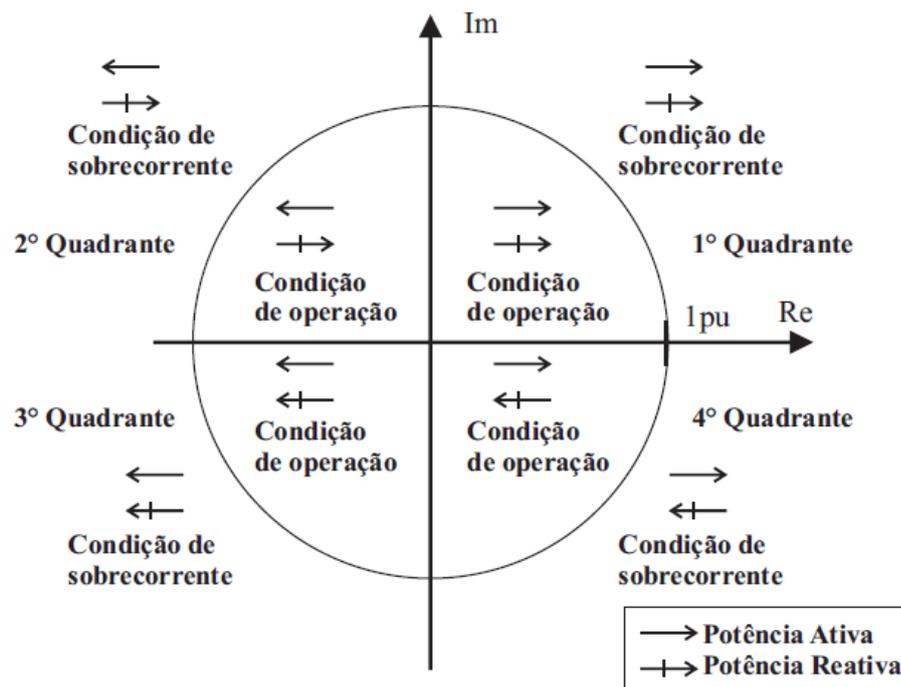


Figura 8 - Lugar geométrico da potência complexa - Regiões de Operação

Fonte: Adaptado de [5]

2.2.4 Estudo do comportamento da potência complexa

Primeiramente, considera-se sistemas radiais, onde a fronteira está entre a fonte de AMT e o SEP a montante. Nesses sistemas, independente da presença de geradores em ambos os lados ou em apenas um, o fluxo de potência reativa no

transformador de fronteira irá aumentar no 1º e 2º quadrantes, caso a fonte de AMT encontre-se a jusante da rede, como ilustra a Figura 9, e de modo divergente, ele aumentará no 3º e 4º quadrantes, caso a fonte de AMT encontre-se a montante, como ilustra a Figura 10. A potência reativa irá aumentar em módulo, pois haverá a predominância indutiva do curto-circuito, entretanto a potência ativa não possui um comportamento padrão, o qual dependerá da configuração e da demanda do sistema. Vale ressaltar que sistemas com geradores em ambos os lados, aquela que estiver no lado oposto ao distúrbio, irá contribuir com a falta, podendo ou não inverter o fluxo de potência que era verificado pré-AMT.

Os SEP radiais com apenas uma geração, nos quais a origem do AMT encontra-se entre a geração e o transformador de fronteira, o fluxo de potência terá um comportamento diferente. Nesses casos, as potências, tanto reativa quanto ativa, irão progredir para a origem do círculo trigonométrico, pois principalmente aquelas cargas representadas por impedância constante, terão sua potência consumida proporcional ao quadrado da tensão, que estará inferior a nominal, durante o AMT. A Figura 9 representa a geração a jusante e a Figura 10, geração a montante.

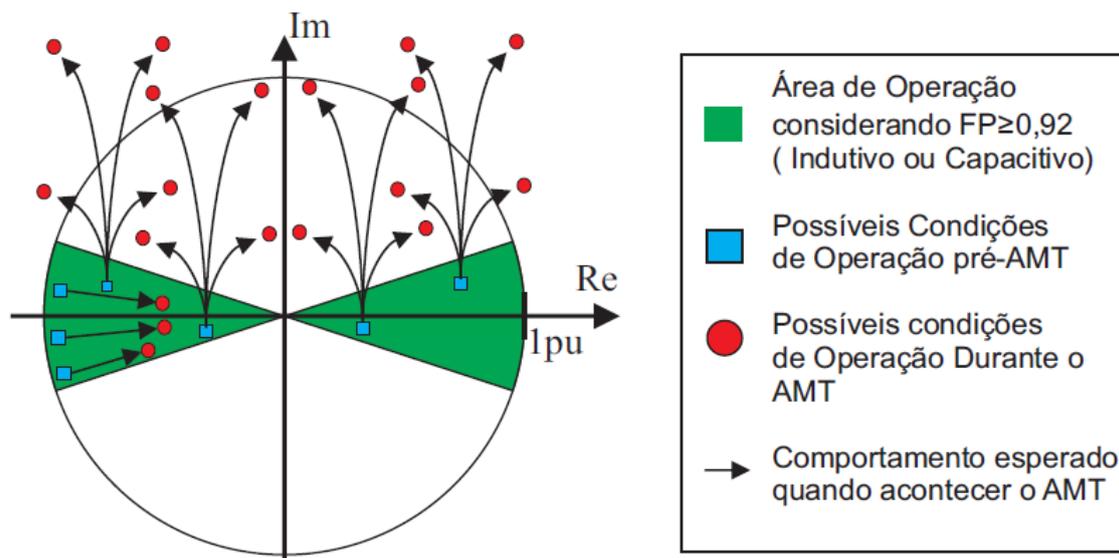


Figura 9 - Comportamento esperado para faltas a jusante da fronteira

Fonte: Adaptado de [5]

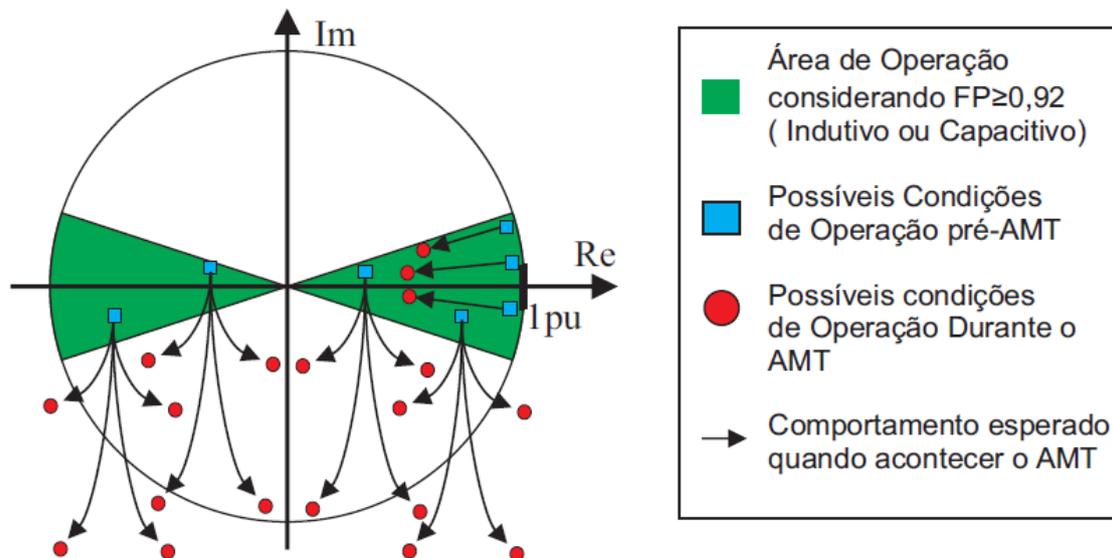


Figura 10 - Comportamento esperado para faltas a montante da fronteira

Fonte: Adaptado de [5]

Sistemas de distribuição e subtransmissão possuem majoritariamente as configurações ilustradas anteriormente. Todavia, sistemas de transmissão são normalmente malhados, ou seja, a potência requisitada pelas cargas pode fluir por vários caminhos. Além disso, esses sistemas possuem elevadas potências de curto-circuito, devido aos altos níveis de tensões e linhas em paralelo, que diminuem a impedância equivalente dos circuitos, regiões que na presença de perturbações podem causar AMTs menos severos. Assim, nesse caso atípico, o estudo do comportamento de dois ou mais localizadores de AMT pode ser necessário, para melhor averiguar o distúrbio.

Outro ponto a destacar são os compensadores de energia reativa que armazenam energia reativa em seus componentes elétricos, que podem contribuir para o curto-circuito. Um capacitor *shunt* de grande porte, por exemplo, instalado em uma subestação situada entre a fronteira monitorada e o ponto de distúrbio, como ilustra a Figura 11, pode contribuir com potência reativa da falta por um intervalo de tempo no qual o fluxo de potência no transformador de fronteira não se alterará bruscamente. Isso pode alterar a apuração dos resultados do localizador de AMTs proposto em [5].

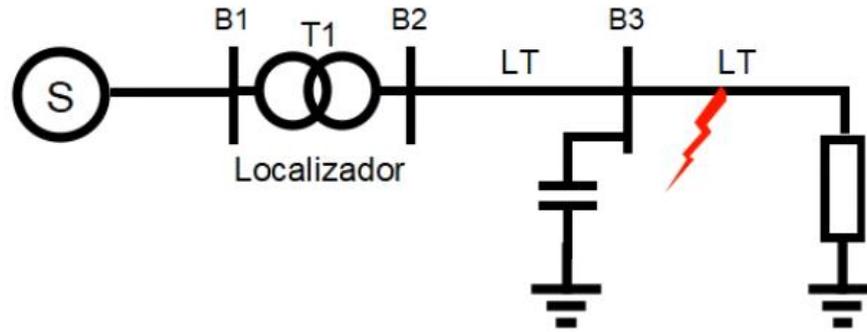


Figura 11 - Capacitor shunt localizado entre a fronteira e a falta

2.2.5 Conjunto de Lógicas Condicionais

O conjunto de lógica condicional é a essência do localizador de AMTs e foi proposto para analisar o comportamento do fluxo de potência para os casos típicos analisados anteriormente, assim como àqueles casos particulares, no qual o caminho da potência complexa não é trivial. As equações (2.12) a (2.18) representam o conjunto de lógicas consideradas.

$$QD = [(Q > 0) \cdot (QP \geq 0)] + [(Q < 0) \cdot (QP \leq 0)] \quad 2.12$$

$$M1 = (PP \geq 0) \cdot (|Q| < |QP|) \cdot QD \quad 2.13$$

$$J1 = (PP \leq 0) \cdot (|Q| < |QP|) \cdot QD \quad 2.14$$

$$M2 = \bar{J1} \cdot (\Delta Q < 0) \quad 2.15$$

$$J2 = \bar{M1} \cdot (\Delta Q > 0) \quad 2.16$$

$$M = M1 + M2 \quad 2.17$$

$$J = J1 + J2 \quad 2.18$$

Onde:

- (Q) é a parte imaginária da potência complexa durante o AMT;
- (PP, QP) são as partes real e imaginária da potência complexa na condição pré-AMT, respectivamente;
- (ΔQ) é a variação da parte imaginária da potência complexa da condição de pré-AMT para a condição AMT;

- (QD) é a variável *booleana* que indica não transição da potência reativa;
- ($M1$) é a variável *booleana* que indica fonte de AMT a montante. Nesse caso há apenas uma fonte no sistema e a potência ativa é exportada à jusante. A potência reativa diminui em módulo e não ocorre inversão de sentido;
- ($J1$) é a variável *booleana* que indica fonte de AMT a jusante. Nesse caso há apenas fonte no sistema e a potência ativa é exportada à montante. A potência reativa diminui em módulo e não ocorre a inversão de sentido;
- ($M2$) é a variável *booleana* que indica a fonte de AMT a montante, onde a potência reativa aumenta o seu valor negativo e garante que a condição prevista por $J1$ não ocorra;
- ($J2$) é a variável *booleana* que indica a fonte de AMT a jusante, onde a potência reativa aumenta o seu valor positivo e garante que a condição prevista por $M1$ não ocorra;
- (M, J) são as variáveis *booleanas* que indicam a localização da fonte de AMT a montante e a jusante, respectivamente.

O algoritmo necessita dos valores da potência complexa pré-AMT para compreender a dinâmica do SEP em regime permanente e estabelecer um ponto de partida para atuação do localizador de AMT. Todavia, o comportamento da potência ativa durante o AMT é imprevisível pois, apenas os valores da potência reativa durante o distúrbio serão utilizados. O valor em módulo da potência reativa durante o AMT é um dos princípios básicos da verificação do local da falta, como demonstram as equações (2.13) e (2.14), onde a fonte (apenas uma) e o distúrbio localizam-se no mesmo lado da fronteira, com a redução modular do valor reativo. Para outros casos, como as equações (2.15) e (2.16), a potência reativa sofre um grande incremento em seu valor, seja ele negativo ou positivo.

2.3 INTRODUÇÃO A COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

Os compensadores exercem um papel fundamental em sistemas elétricos de corrente alternada, pois basicamente alteram as características naturais das linhas de transmissão e distribuição, e otimizam as suas capacidades transferência do fluxo de potência reativa [6]. A energia reativa pode ser armazenada em elementos passivos,

como capacitores e indutores de potência, ou através da geração por compensadores síncronos.

2.3.1 Introdução a potência reativa em linhas

A magnitude da tensão está diretamente relacionada com os níveis de potência reativa na rede [32]. Com o intuito de exemplificar essa consideração, a Figura 12 ilustra um sistema elétrico simples, com duas barras, uma linha de transmissão e um ponto de geração. Considerando que a potência complexa flui da barra 1 para a barra 2 é possível extrair as equações (2.19) e (2.20).

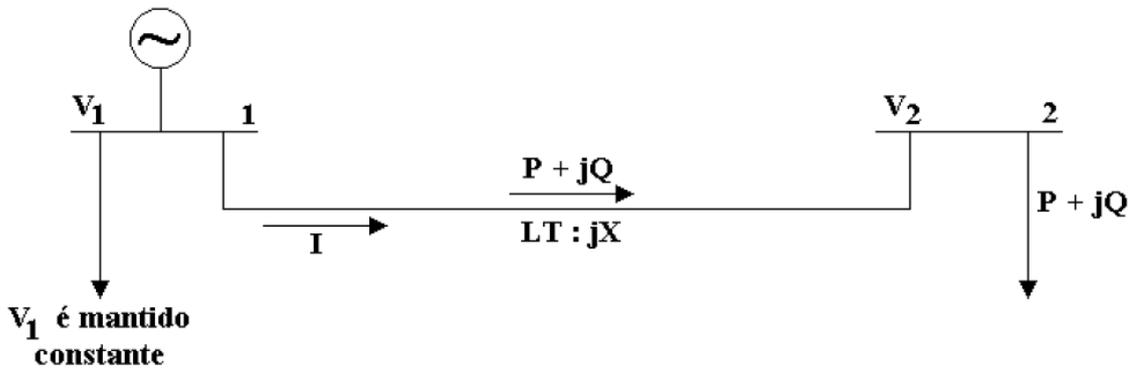


Figura 12 - Sistema elétrico 2 barras

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - \dot{I} \times \dot{Z} \quad 2.19$$

$$S_1 = \dot{V}_1 \times \dot{I}^* = P + jQ \quad 2.20$$

Explicitando (\dot{I}) em (2.23), e considerando (\dot{V}_1) como referência, tem-se (2.21).

$$\dot{I} = \frac{P - jQ}{\dot{V}_1^*} = \frac{P - jQ}{V_1} \quad 2.21$$

Por fim, substituindo o valor de (\dot{I}) na equação (2.19) e considerando a linha de transmissão como puramente indutiva (jX), tem-se (2.22).

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - \left(\frac{P - jQ}{V_1} \right) \times jX = V_1 - \frac{Q}{V_1} X - j \frac{P}{V_1} X \quad 2.22$$

Assim, o diagrama vetorial da Figura 13 representa a soma dos vetores após a análise e é possível afirmar pela equação $(-X/V_1) \times Q$ que: a potência reativa indutiva é a responsável pelo decremento dos níveis de tensões nos barramentos.

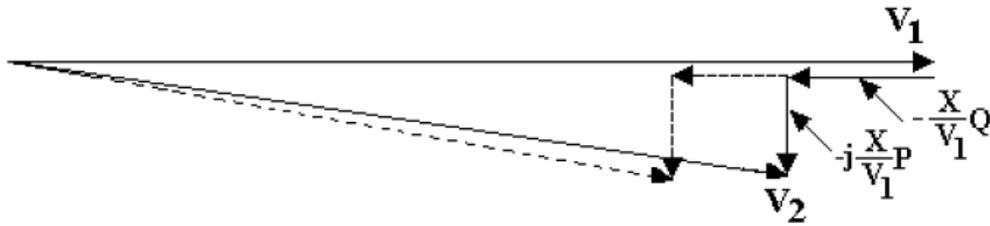


Figura 13 - Diagrama vetorial do sistema elétrico de 2 barras

É importante salientar que a quantidade de potência ativa transmitida pelas linhas não está apenas relacionada com a demanda das cargas, mas dentre outros fatores, está diretamente atrelada ao fator de potência do sistema. A Figura 14 demonstra um exemplo de uma linha de 138 kV e potência base de 670 MW [33]. Os níveis de tensão no terminal transmissor variam de acordo com o fator de potência das linhas, para suprir determinada demanda de potência ativa. Com um fator de potência 0,8 indutivo e uma queda de tensão de 5%, a potência ativa entregue é de $0,05 \cdot 670 = 33,5$ (MW), enquanto uma linha com o fator de potência 0,9 capacitivo e mesma queda de 5% da tensão, consegue transmitir $0,57 \cdot 670 = 382$ (MW).

Por fim, é importante concluir que SEPs requerem reativos para suprir a demanda do sistema alimentado e das linhas, necessários para manterem os níveis de tensão no terminal receptor dentro dos limites. Na falta de potência reativa (indutivo), a tensão do sistema irá decrementar, enquanto em seu excesso (capacitivo), os níveis de tensão irão aumentar.

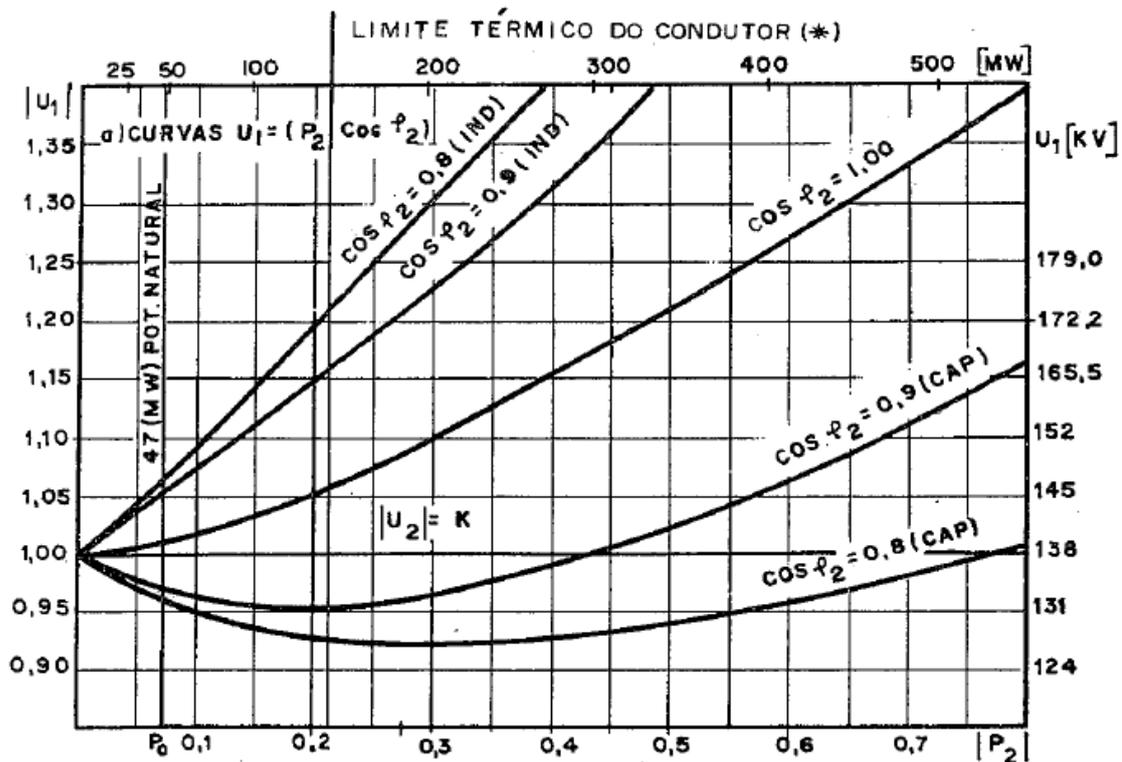


Figura 14 - Variação da tensão no transmissor para tensão constante no receptor

Fonte: Adaptado de [33]

2.3.2 Compensadores Síncronos de Reativos

Os Compensadores Síncronos de Reativos são motores síncronos os quais não fornecem potência mecânica em seu eixo. Desta forma, eles injetam ou consomem potência reativa na rede dependendo do grau de excitação em seu campo [33]. A Figura 15 ilustra o seu funcionamento.

No gráfico da Figura 15 têm-se três situações possíveis.

- $I_e = \overline{OA}$, nesse cenário o compensador síncrono opera a vazio absorvendo apenas potência ativa para cobrir as perdas internas;
- $I_e > \overline{OA}$, onde a máquina aumenta sua excitação e passa a produzir um excesso de energia reativa em seu campo. Assim, ela injeta potência reativa na rede e comporta-se semelhantemente a um capacitor;
- $I_e < \overline{OA}$, onde a máquina diminui sua excitação e passa a consumir energia reativa. Assim, ela absorve potência reativa da rede e comporta-se semelhantemente a um reator indutivo;

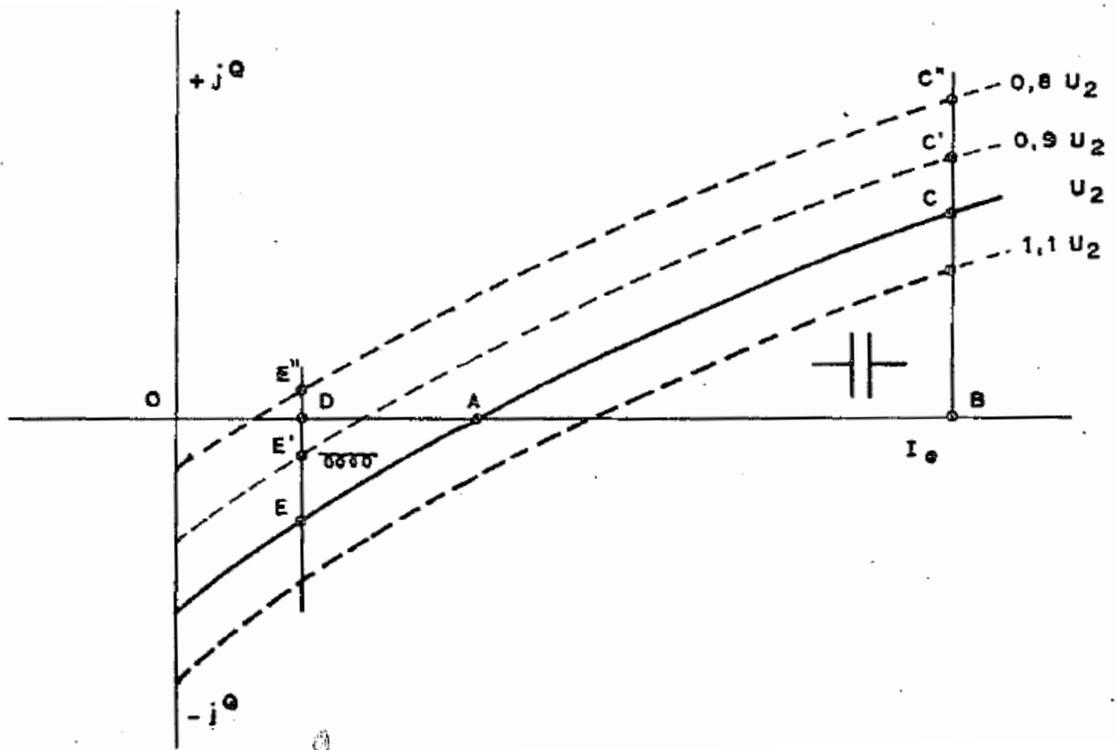


Figura 15 - Características elétricas de um Compensador Síncrono

Fonte: Adaptado de [33]

Contudo, os Compensadores Síncronos possuem algumas desvantagens como, seu alto valor agregado e seu atraso de resposta quando há distúrbios na rede, devido a inércia no eixo mecânico.

2.3.3 Compensação Estática de Reativos

Os compensadores estáticos são compostos por elementos passivos que são alocados em paralelo ao sistema elétrico. Eles são fixos ou possuem alguma dinâmica de chaveamento (disjuntores ou tiristores), e suas configurações são projetadas de acordo com os níveis de confiabilidade e do tempo de resposta necessário para a aplicação [34].

2.3.3.1 Banco de capacitores fixos e com chaveamentos mecanizados

Em sua forma mais simples, o banco de capacitores *shunt* é integrado ao sistema de forma fixa e contínua. Normalmente eles possuem capacidade reduzida e são instalados em redes de média ou baixa tensão, protegidos algumas vezes por elementos fusíveis. Possuem essa topologia pois, o local em qual estão inseridos, possui problemas em regime permanente com os níveis de tensão.

Em outras ocasiões, os capacitores *shunt* possuem chaveamento mecanizado, realizado por disjuntores ou chave a vácuo. Essa é uma forma muito mais prática e dinâmica de chavear os bancos, além de permitirem a instalação de IEDs de proteção contra curtos-circuitos e desequilíbrios de fases, por exemplo. Todavia, os capacitores possuem um ponto ótimo de chaveamento, o qual ocorre basicamente quando a tensão senoidal do sistema passa pelo seu pico. Chaveamentos dessincronizados geram grandes transitórios eletromagnéticos na rede.

Normalmente, em sistemas de alta tensão, os bancos de capacitores são acoplados a transformadores abaixadores de tensão, pois nestes casos os custos com o isolamento do banco são inviáveis economicamente. Essa configuração (capacitores em série com o transformador) diminui a impedância equivalente do sistema de compensação, como demonstra a equação (2.23), e conseqüentemente auxilia na implantação do projeto. Bancos com capacitâncias menores, em relação àqueles sem transformadores de acoplamento, serão projetados para entregar uma mesma potência ao sistema.

$$X_{eq} = X_T - X_C \quad 2.23$$

Portanto, a impedância equivalente (X_{eq}) é menor do que (X_C) e a potência do conjunto é dada pela equação (2.24).

$$Q_{eq} = \frac{U_f^2}{X_{eq}} > Q_C = \frac{U_f^2}{X_C} \quad 2.24$$

Outro aspecto importante está no tipo de ligação dos bancos de capacitores trifásicos. A ligação delta (Δ) é corriqueiramente empregada devido aos seus benefícios. Primeiramente, o investimento financeiro do conjunto está diretamente relacionado à capacidade dos bancos, e a ligação delta permite que os capacitores com a mesma capacitância de um banco ligado em estrela (Y), tenha a potência triplicada. Isso deve-se a tensão submetida a eles, onde $U_Y = U_\Delta/\sqrt{3}$. As equações (2.25) e (2.26) demonstram a relação de potência nos dois casos [35].

$$Q_Y = \frac{(U_{\Delta}/\sqrt{3})^2}{X_C} \rightarrow Q_Y = \frac{U_{\Delta}^2}{3X_C} \quad 2.25$$

$$\therefore 3 \cdot Q_Y = Q_{\Delta} \quad 2.26$$

O segundo ponto está na disseminação da componente de 3º harmônico e múltiplas dessa. Em um sistema elétrico onde a componente de 3ª ordem da tensão está presente, com a conexão dos bancos em (Y), aquela ocasionará uma geração de componentes harmônicas de mesma ordem da corrente. Já os bancos de capacitores conectados em (Δ), como ilustra a Figura 16 e as equações (2.27) e (2.30), isso não ocorre.

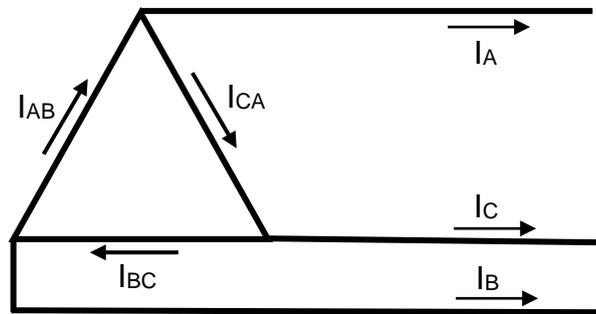


Figura 16 - Conexão delta dos bancos de capacitores

$$i_{3AB}(t) = I_{3MAX} \cdot \sin[3 \cdot (\omega t - \theta_1)] \quad 2.27$$

$$i_{3AB}(t) = I_{3MAX} \cdot \sin(3\omega t - 3\theta_1) \quad 2.28$$

$$i_{3CA}(t) = I_{3MAX} \cdot \sin[3 \cdot (\omega t - 120^\circ - \theta_1)] \quad 2.29$$

$$i_{3CA}(t) = I_{3MAX} \cdot \sin(3\omega t - 360^\circ - 3\theta_1) \quad 2.30$$

Como 360° representa uma volta completa no círculo complexo, em um sistema equilibrado, $i_{3AB}(t)$ está em fase e possui o mesmo módulo que $i_{3CA}(t)$. Assim, tem-se as equações (2.31) e (2.32).

$$i_{3A} = i_{3AB} - i_{3CA} = I_{3MAX} \cdot [\sin(3\omega t - 3\theta_1) - \sin(3\omega t - 3\theta_1)] \quad 2.31$$

$$\therefore i_{3A}(t) = 0 \quad 2.32$$

Para as outras duas correntes de fase, o processo repete-se, o que demonstra a não circulação de correntes de 3ª ordem em componentes elétricos conectados em (Δ).

2.3.3.2 Reatores fixos e com chaveamento mecanizado

Os reatores *shunt* fixos, assim como o banco de capacitores fixos, são a forma mais simples de integrar os elementos à rede. Os reatores alocados em paralelo ao sistema consomem o excesso de reativos do sistema e dessa forma decrementam a tensão em módulo, onde são instalados. São normalmente empregados em longas linhas de transmissão, onde o efeito *Ferranti* predomina [33].

O chaveamento mecânico em reatores *shunt*, é realizado normalmente por disjuntores. Essa configuração possui a facilidade de instalação de IEDs de proteção e é adequada para conjuntos de maior capacidade. Como são limitadores de corrente, pois atrasam eletricamente a corrente da tensão, os reatores não causam muitos transitórios eletromagnéticos quando chaveados.

As mesmas propriedades valem à conexão (Δ) dos bancos de reatores, quanto a sua potência (conforme a conexão) e absorção da 3ª e múltiplas componentes harmônicas. Entretanto, quando acoplados a transformadores abaixadores de tensão, possuem uma particularidade, porque consonante a equação (2.33), a impedância equivalente do sistema irá aumentar e conseqüentemente, de acordo com a equação (2.34), um reator entregará uma maior potência do que aquele com a mesma indutância quando acoplado a um transformador.

$$X_{eq} = X_T + X_L \quad 2.33$$

$$Q_{eq} = \frac{U_f^2}{X_{eq}} < Q_L = \frac{U_f^2}{X_L} \quad 2.34$$

2.3.3.3 Capacitor Chaveado por Tiristor

Primeiramente é importante entender a funcionalidade básica dos tiristores de potência nesses tipos de configurações. Eles são basicamente empregados para fornecer uma maior capacidade de resposta, no máximo meio ciclo da frequência fundamental, quando demandados, além de possuírem baixas perdas e suportarem altos níveis de tensão e corrente [6].

O capacitor chaveado por tiristor ou TSC (*Thyristor-switched Capacitor*) é projetado para injetar a potência reativa integral do conjunto na rede, pois devido a transitórios eletromagnéticos, sua corrente não pode ser controlada. Ainda, na análise

dos distúrbios causados pelo seu chaveamento, indutores com capacidade bem reduzida, para não interferirem no desempenho do TSC, são instalados em série com o intuito de minimizar as correntes *inrush* de chaveamento do elemento capacitivo [6]. Em regime permanente, a equação (2.35) representa a corrente no ramo do TSC, com $v(t) = V \cdot \sin(\omega t)$.

$$i(t) = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos(\omega t) \quad 2.35$$

Onde (n) é igual a equação (2.36).

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad 2.36$$

Por fim, a amplitude da tensão sobre o capacitor é dada pela equação (2.37).

$$V_c = \frac{n^2}{n^2 - 1} V \quad 2.37$$

Quando a válvula do tiristor for desligada (“off”), a tensão de pico sobre seus terminais (V_{sw}) chega a ser o dobro da apresentada pelo sistema elétrico. Há um instante em que a tensão remanescente do capacitor (V_c) somada com a tensão de pico da rede (V) são de valores opostos, o qual ilustra a Figura 17, e ocasiona em uma magnitude com valor dobrado. Assim, os tiristores devem ser projetados para suportar essa tensão de pico a pico.

A Figura 17 demonstra que o TSC foi desconectado eletricamente do sistema quando a tensão de pico do sistema estava em seu valor máximo negativo, com intuito de minimizar transitórios. Isso ocorre devido a equação (2.38), e no instante que a tensão sobre o capacitor passa pelos seus valores de pico, a corrente é nula, pois a derivada é igual a zero.

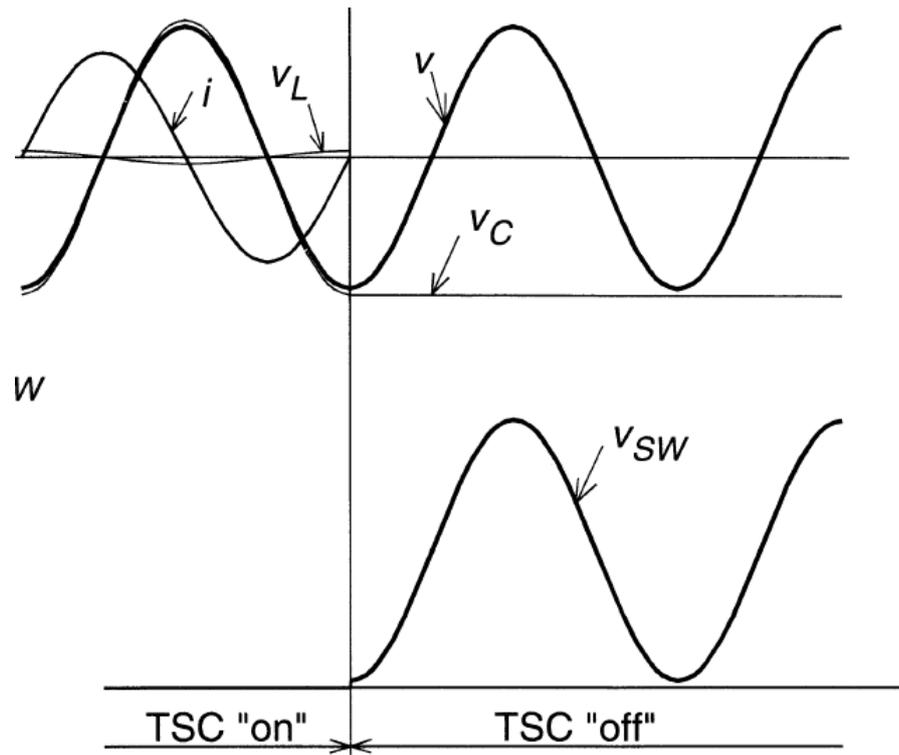


Figura 17 - Associação da tensão remanescente do capacitor com a de pico da rede

$$i_c = C \cdot \frac{dv_c}{dt} \quad 2.38$$

O acionamento do TSC, devido à velocidade de resposta dos tiristores, é realizado em dois momentos. O primeiro caso ocorre quando a tensão residual no capacitor é menor do que a de pico da rede ($V_C < V$) e o chaveamento é realizado quando as duas tensões se igualam em magnitude, com os transientes minimizados pelo reator limitador de corrente. O segundo caso ocorre quando a tensão residual no capacitor é maior ou igual a de pico da rede ($V_C \geq V$) e o chaveamento é realizado quando a tensão do sistema atinge seu valor máximo em módulo [6].

2.3.3.4 Reator Controlado por Tiristor

O Reator Controlado por Tiristor ou TCR (*Thyristor-controlled Reactor*) é projetado para consumir a potência reativa em excesso da rede e possui uma faixa de controle, a qual é regulada pelo ângulo de disparo dos tiristores. Como o indutor é um elemento que atrasa a corrente em relação a tensão, transitórios eletromagnéticos ocasionados pelo chaveamento são mais suaves.

O ângulo de disparo do tiristor que controla o TCR é referenciado pela componente fundamental da tensão senoidal do sistema, com início em 90° , quando

o reator está com sua capacidade máxima, e término em 180° , quando o reator não consome nenhum reativo do sistema. Desta forma, as equações de (2.39) a (2.41) determinam os níveis de corrente em relação ao ângulo de disparo ($\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$).

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha}^{\omega t} V \cdot \sin(\omega t) \cdot dt \quad 2.39$$

$$i_L(t) = \frac{V}{\omega L} \cdot [\cos \alpha - \cos(\omega t)] \quad 2.40$$

$$i_L(t) = \frac{V}{\omega L} \cdot \left[\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad 2.41$$

De fato, isso ocorre visto que a corrente no reator é máxima, conforme a equação (2.42), quando $\alpha = \pi/2$.

$$i_L(t) = \frac{V}{\omega L} \cdot \left[\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + 0 \right] \quad 2.42$$

O oposto ocorre quando $\alpha = \pi$, pois a corrente no reator será nula, conforme a equação (2.43).

$$i_L(t) = \frac{V}{\omega L} \cdot \left[\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right] \quad 2.43$$

A Figura 18 mostra o comportamento da corrente para diferentes ângulos de disparo. O ângulo de condução é representado por σ .

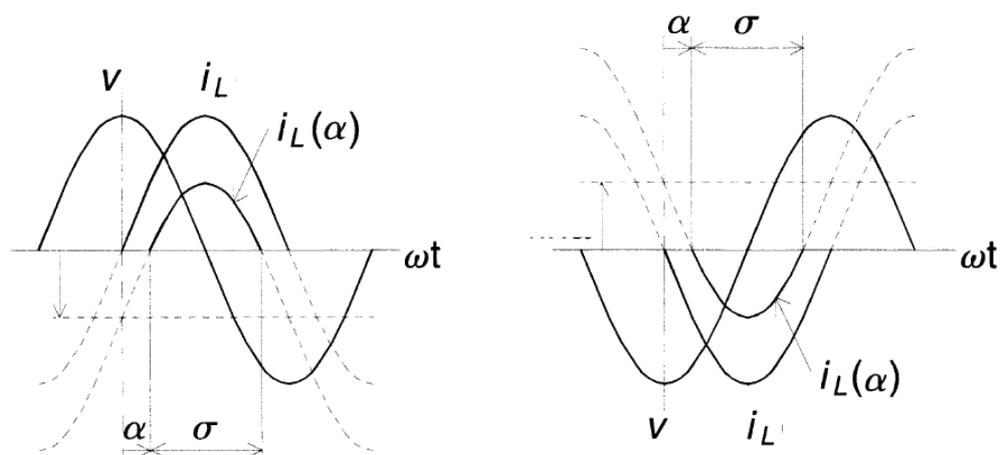


Figura 18 - Comportamento da corrente para diferentes ângulos de disparo

O valor da magnitude da corrente e o da susceptância do TCR também podem ser representados em função de α . Para tal, as equações (2.44) e (2.45) são apresentadas, respectivamente.

$$I_L(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{\pi} \cdot \sin 2 \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad 2.44$$

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{\pi} \cdot \sin 2 \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad 2.45$$

A variação da amplitude da corrente, em p.u., em função do ângulo de disparo é apresentada na Figura 19.

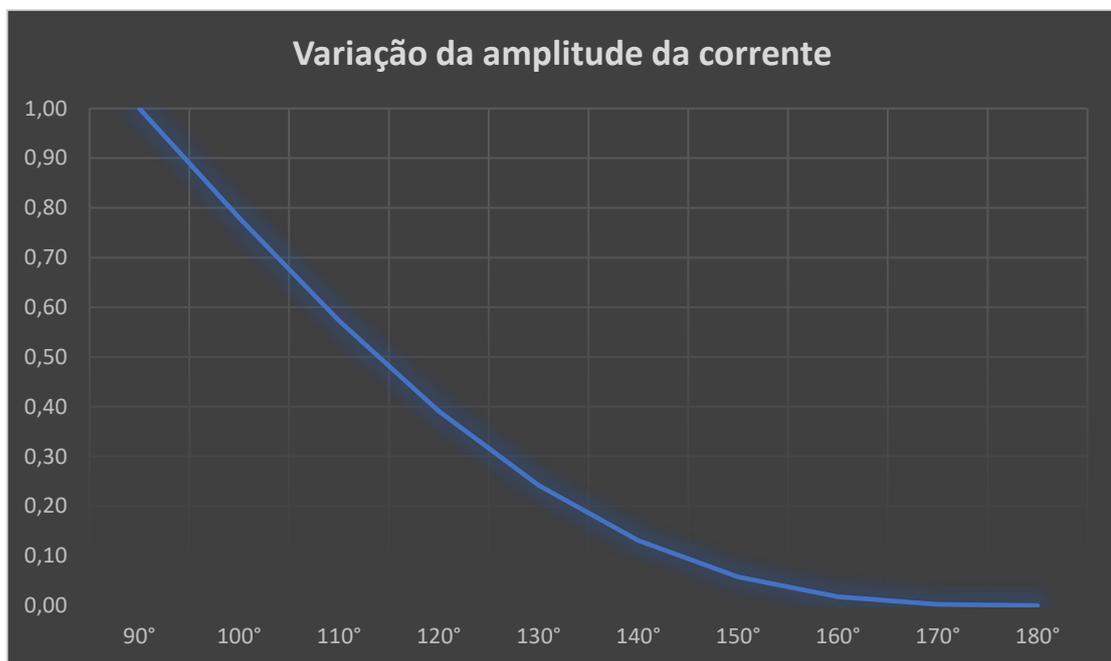


Figura 19 - Variação da amplitude da corrente em relação a α

A facilidade de controle da potência reativa que proporciona o TCR, gera uma desvantagem, a produção de correntes harmônicas de ordem ímpar quando o ângulo α está na faixa de controle ($\pi/2 < \alpha < \pi$). A Figura 20 exemplifica a intensidade dessas correntes de acordo com atraso no disparo das válvulas tiristorizadas. Fica claro que as primeiras componentes harmônicas são as de maior intensidade e para a mitigação delas, alguns métodos consolidados são apresentados.

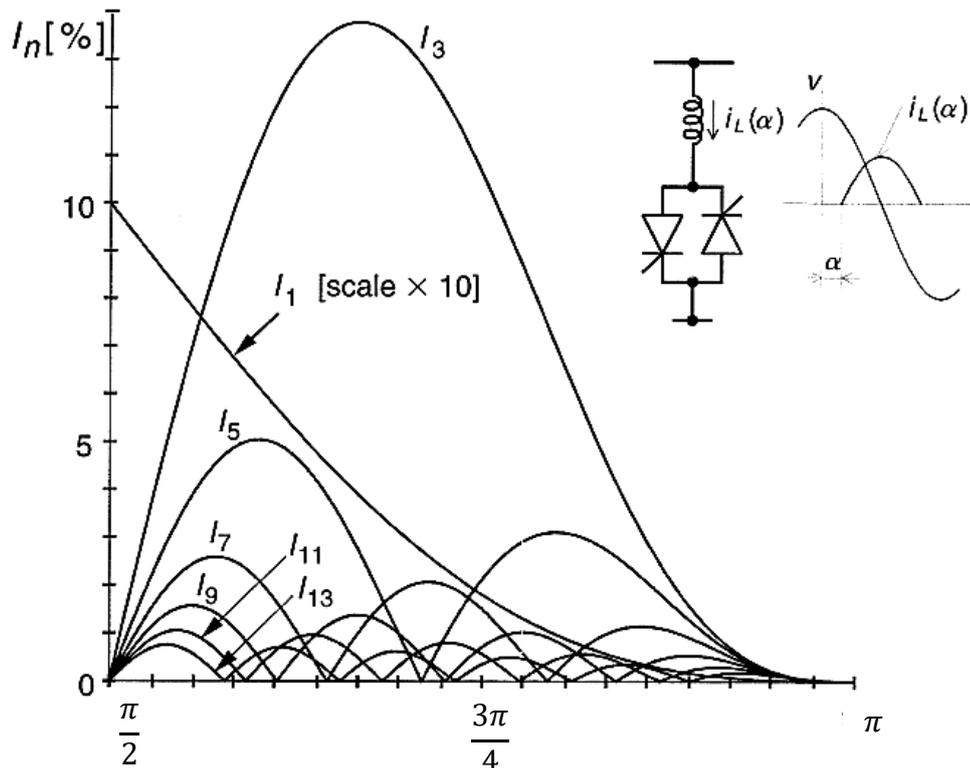


Figura 20 - Amplitude das componentes harmônicas da corrente no TCR em relação ao ângulo de disparo

Fonte: Adaptado de [6]

A componente de 3ª ordem é a de maior impacto e como apresentado anteriormente na equação (2.32), ela e suas múltiplas podem ser filtradas efetivamente ao conectar o TCR em delta.

A dissipação das componentes de 5ª e 7ª ordem (além de outras como a 17ª e 19ª, que são de menor expressão) é comumente realizada pelo arranjo de 12 pulsos, onde um banco de reatores com a metade da potência integral do TCR é conectado ao secundário de um transformador estrela-delta (Y-Δ), enquanto o outro banco complementar é conectado ao secundário de um transformador estrela-estrela (Y-Y). A corrente de linha de 5ª ordem sofre um deslocamento natural de 30° no secundário do transformador (Y-Δ), a qual por ser uma componente negativa, deslocará de 150° (5X30°) no sentido horário, quando referenciada ao primário. Essa estará 180° em relação ao fasor resultante do primário do transformador (Y-Y), que não sofre nenhum deslocamento, e resultará em um valor nulo. A Figura 21 ilustra a soma dos fasores de 5º harmônico no lado primário.

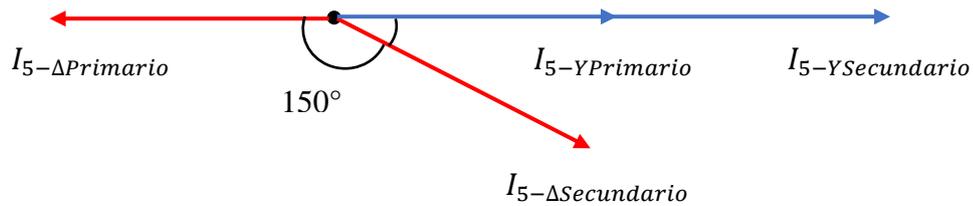


Figura 21 - Soma dos fasores de 5º harmônico de um arranjo 12 pulsos

O mesmo ocorre para a componente de 7º harmônico, entretanto, por ser positiva, deslocará em sentido anti-horário. A corrente de linha no secundário do transformador (Y-Δ) sofre um atraso de 30º, a qual referenciada ao primário sofrerá um deslocamento de 210º (7x30º), que finalmente estará adiantada de 180º em relação a referência. Esse e o fasor do primário do transformador (Y-Y), estarão em sentidos opostos e se anularão. A Figura 22 ilustra a mitigação da componente de 7º harmônico.

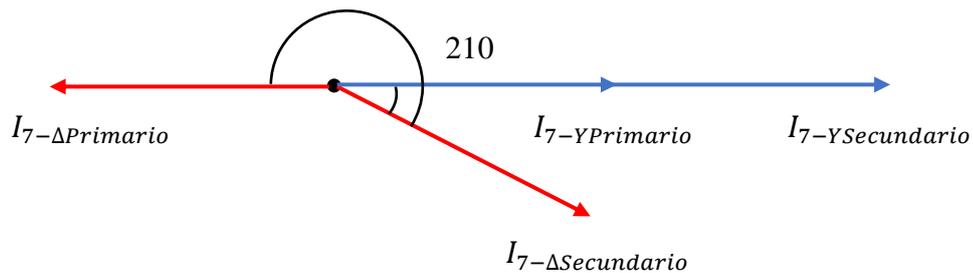


Figura 22 - Soma dos fasores de 7º harmônico de um arranjo 12 pulsos

Por fim, o capacitor do TSC juntamente com o indutor limitador de corrente, quando instalado em conjunto com o TRC, podem ser projetados para sintonizarem em uma determinada componente harmônica, que frequentemente é a de 5ª ordem.

2.3.3.5 Compensador Estático de Reativos

O Compensador Estático de Reativos ou SVC é composto por um conjunto de TSC e outro de TCR, os quais complementam-se na função de manter os níveis de tensão nos barramentos onde são instalados, dentro dos limites estabelecidos. A coordenação entre os dois componentes é feita por controle para ora estarem consumindo ora injetando reativos na rede, com o intuito de acompanhar a dinâmica do sistema elétrico.

Os SVCs são de grande importância na otimização de linhas de transmissão. Quando alocados em um ponto intermediário entre duas barras distantes, o

compensador adequadamente projetado, consegue dobrar a capacidade de transmissão das linhas. Quando alocados em barramentos receptores, os SVCs auxiliam na estabilidade transitória do sistema elétrico e no amortecimento do ângulo de potência na presença de distúrbios [6].

Em um SVC, o banco de reatores do TCR normalmente possui maior capacidade nominal, pois ele realiza o ajuste fino do compensador e deve ser capaz de consumir toda energia gerada pelo TSC e da rede, quando os dois estiverem operando simultaneamente e for requisitado [36]. Além disso, eles são normalmente conectados ao sistema por um transformador de acoplamento, e como apresentado anteriormente pela equação (2.34), sua potência é decrementada quando inserida uma reatância indutiva em série.

O SVC possui basicamente 3 regiões, onde o ponto de operação está de acordo com a demanda. A primeira ocorre apenas quando o conjunto de TSC está operante e em plena capacidade, definido pelo ponto ($I_{Cmáx}$). A segunda é compreendida como região de controle e é definida quando TSC está operante e o TCR realiza o ajuste fino do SVC, até uma capacidade definida em ($I_{Lmáx}$), na qual a potência do banco de reatores é maior do que a de capacitores. Na terceira e última região, o TCR atua isoladamente até atingir sua capacidade total. A Figura 23 demonstra a curva de atuação do SVC [6].

Com o intuito de exemplificar a operação do SVC foram inseridas três linhas com carregamentos diferentes na Figura 23. A linha 1 não necessitará de auxílio do compensador, pois toda a sua potência reativa gerada é consumida, então a tensão na barra será a nominal do sistema e é definida pelo ponto 1. A linha 2 representa uma linha sobrecarregada e o SVC auxiliará com a corrente (I_{C1}). Sua operação muda para o ponto 2 com o acréscimo de (ΔV_{C1}) na tensão no barramento. A linha 3 representa uma linha subcarregada e o SVC auxiliará com a corrente (I_{L1}). Sua operação muda para o ponto 3 com o decréscimo de (ΔV_{L1}) na tensão do barramento.

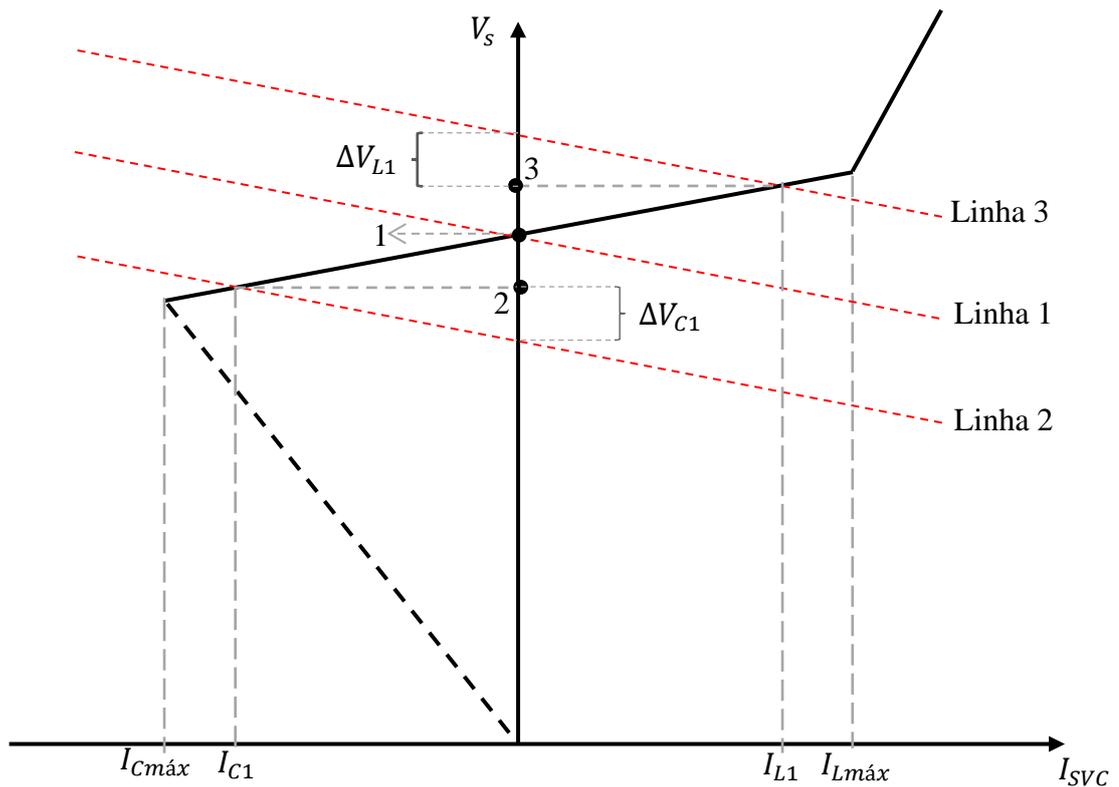


Figura 23 - Característica V_{xI} do SVC

O controle básico do SVC é apresentado na Figura 24 [6]. Os sinais de tensão trifásicos são obtidos por transformadores de potencial e convertidos em um único valor em p.u., o qual é refinado por filtros e um sinal correspondente a componente fundamental é extraído. Esse sinal é comparado com a tensão referência e o valor residual é processado por um controlador proporcional integral, o qual gera uma susceptância equivalente do sistema elétrico, processo fundamental no chaveamento do TSC e na obtenção do ângulo de disparo do TCR. Desta forma, o SVC supre o sistema elétrico com uma potência reativa ideal para estabelecer níveis de tensões adequados.

O SVC auxilia na manutenção das tensões em sua vizinhança durante curtos-circuitos. A Figura 25 exemplifica um caso no qual a região de operação do compensador é representada pelo ponto A e a tensão no barramento é dada pelo ponto 1. Nos primeiros milissegundos durante a falta, a região de operação muda para o ponto B, com a desativação do SVC. Posteriormente, o TSC é chaveado, em um intervalo de no máximo meio ciclo da frequência fundamental, e a operação muda para o ponto C (região instável). Finalmente, o TCR é ativado para realizar o ajuste fino e a região final de operação é definida pelo ponto D, com a tensão no barramento

igual ao ponto 2 [34]. Após a eliminação da falta, a linha de carga pode voltar a ser a de regime permanente, ou caso tenha perdido alguma linha devido a atuação da proteção, haverá outra região de operação.

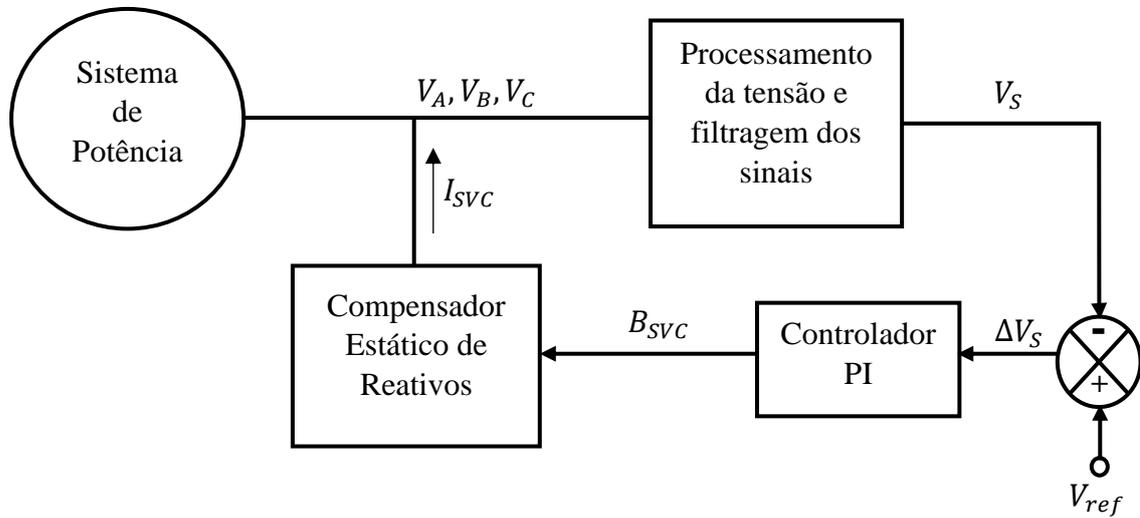


Figura 24 - Controle básico de um SVC

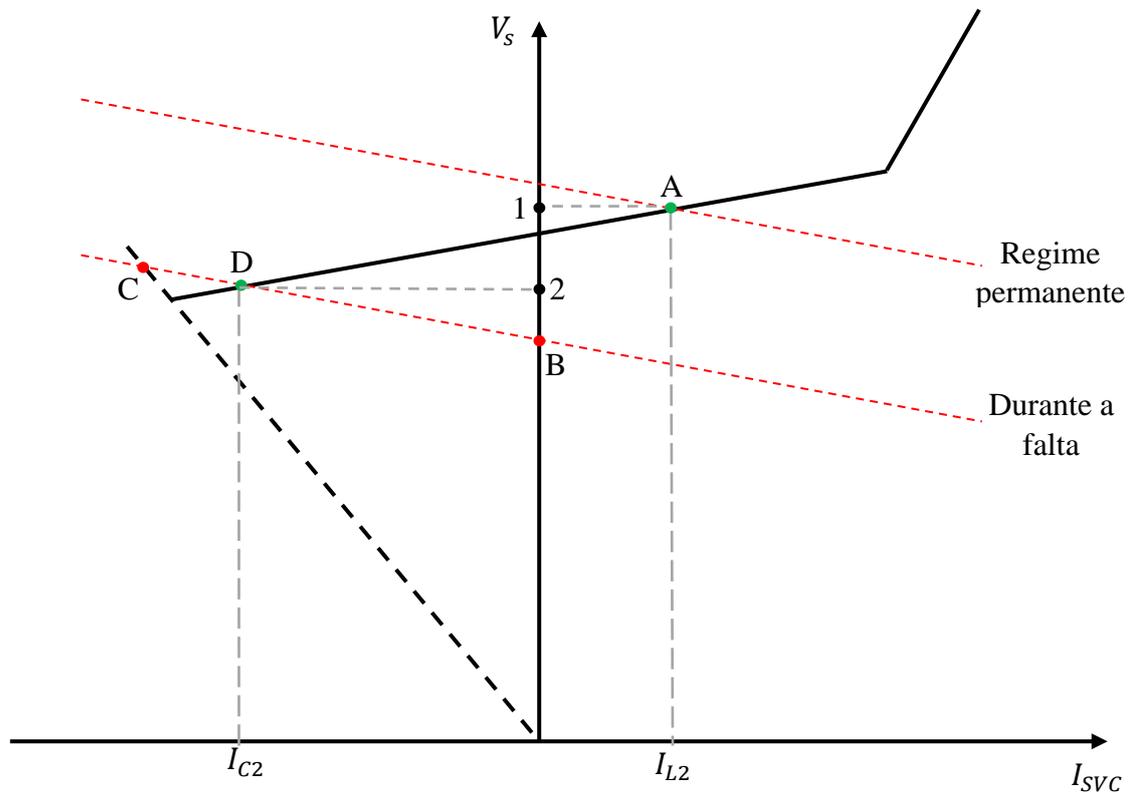


Figura 25 - Operação do SVC durante uma falta

Neste contexto, o comportamento do SVC pode ou não influenciar no desempenho do localizador de AMT proposto em [5], sendo esta avaliação um dos principais objetivos deste trabalho.

3 MODELAGEM

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a apresentação de toda a base teórica necessária à compreensão do trabalho, as simulações são imprescindíveis no processo de avaliação do localizador de fontes de AMTs em sistemas elétricos reais com a presença de SVCs. Assim, neste capítulo, serão apresentadas as modelagens dos principais componentes elétricos.

Um dos princípios desse trabalho é utilizar uma plataforma que ofereça alta confiabilidade nas simulações, com dados de transitórios eletromagnéticos acessíveis e com um *layout* de simples operacionalização. Baseado nessa premissa, foi utilizada a plataforma RTDS® (*Real Time Digital Simulator*) na modelagem do sistema elétrico, do localizador de fonte de AMTs e do compensador estático de reativos. O SEP modelado é o sistema de suprimento do estado de Mato Grosso, o qual em 2003 possuía concessões da CEMAT, ELETRONORTE e FURNAS e suas características elétricas serão descritas neste capítulo.

Os SVCs foram alocados em pontos específicos, com o intuito de otimizar o fluxo de potência em regime permanente do sistema, além de manter os níveis de tensão de todos os barramentos, dentro dos limites estabelecidos em [3, 10]. As alocações das faltas, da mesma forma, foram definidas em pontos específicos, com o objetivo de extrair informações mais relevantes do comportamento do sistema elétrico durante os transitórios decorrentes da aplicação de faltas no sistema.

3.2 SISTEMA ELÉTRICO DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

O sistema elétrico proposto está instalado no estado de Mato Grosso e possui majoritariamente linhas de 230 kV e 138 kV, algumas com distâncias consideráveis entre os centros de gerações e as cargas, que conforme os níveis de carregamento das linhas, podem levar a subcompensação. Basicamente, o sistema possui uma demanda de 690 MW, representados por cargas de impedância constante, com uma capacidade de geração próxima de 1643 MVA, composta por diversas concessionárias e autoprodutores, além de aproximadamente 6.600 quilômetros em linhas de transmissão e distribuição [37].

Devido a dimensão do sistema, alguns subsistemas sofreram pequenas simplificações, principalmente aqueles com baixa demanda e transformadores com a mesma capacidade em paralelo, e seus equivalentes elétricos foram extraídos. O sistema elétrico final é composto por 92 barramentos, com alguns pontos de interligação com SIN (Sistema Interligado Nacional), representados por fontes equivalentes.

Para uma melhor compreensão, os principais componentes elétricos utilizados no RTDS para a composição do SEP, serão abordados a seguir.

3.2.1 Modelo de Fonte de Tensão

As fontes de tensões trifásicas são normalmente utilizadas para representar uma geração de sinais senoidais balanceados da tensão fundamental, com a opção de alocação de impedâncias de curto-circuito em seus terminais para caracterizar uma fonte equivalente [38].

A impedância de sequência positiva selecionada foi a R-R//L (R_S série, R_P em paralelo com L_P), pois possibilita um ajuste mais adequado das fontes e uma maior estabilidade numérica durante transitórios devido à resistência, e a impedância de sequência zero é representada por R//L (R_0 em paralelo com L_0).

Por fim, o valor inicial da magnitude da tensão é necessário, assim como o ângulo de potência em relação à referência, com o intuito de determinar o fluxo de potência. Alguns valores durante as simulações são amostrados, de acordo com as necessidades do usuário, como os sinais da potência complexa e correntes de linha. A Figura 26 demonstra o circuito representativo da fonte AC.

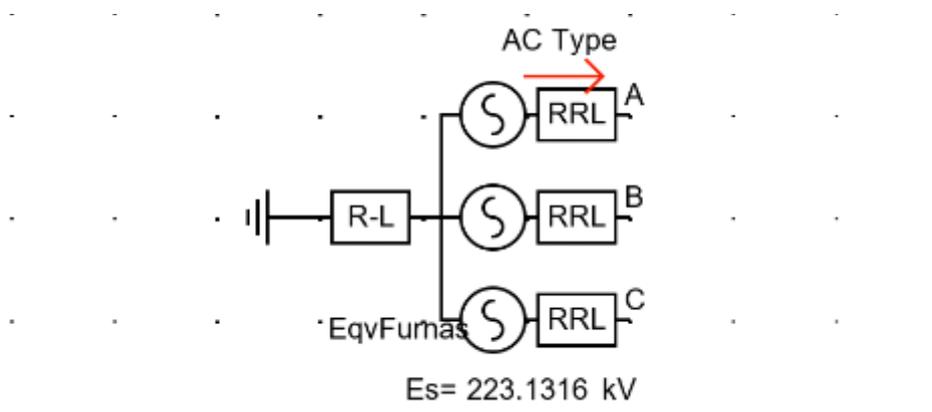


Figura 26 - Fonte de tensão trifásica

3.2.2 Modelo do Transformador de Potência Trifásico

Primeiramente, serão abordados os transformadores de dois enrolamentos, os quais requerem informações da conexão, delta ou estrela (aterrado ou não), e do defasamento angular. Os modelos ideais foram utilizados devido à ausência de informações para a composição da curva de saturação e histerese.

A potência do transformador é dada em MVA e as tensões de linhas de cada enrolamento são registradas em kV. Inclusive, essas informações são utilizadas como base de cálculo das perdas internas do equipamento, pois as impedâncias dos enrolamentos são fixadas em p.u. A corrente de magnetização em cada nível é dada em porcentagem [39].

Com o transformador configurado para operação, informações imprescindíveis na realização dos estudos podem ser obtidas, como os valores de corrente de linha. A Figura 27 exemplifica o circuito representativo do equipamento no RTDS.

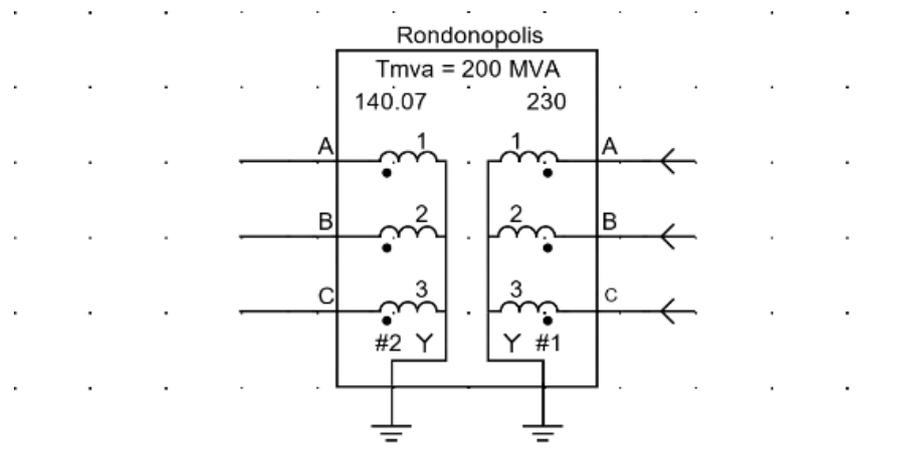


Figura 27 - Transformador trifásico de três enrolamentos

Nos transformadores de três enrolamentos, as impedâncias de sequência positiva são transformadas em equivalentes e assim são obtidas $Z_{12}(pu)$, $Z_{13}(pu)$ e $Z_{23}(pu)$. Após essa análise, os valores reais são separados dos imaginários e inseridos nas configurações do equipamento no RTDS, como exemplifica a tela de configuração apresentada na Figura 28.

3.2.3 Modelo do Equivalente PI

Esse modelo é adequado para linhas curtas e médias de até aproximadamente 200 km, com níveis de tensão de até 400 kV. Entretanto, o modelo pode ser utilizado em linhas longas, caso a impedância e susceptância das mesmas sejam corrigidas

[33]. Assim, a maioria das linhas respeitou esse padrão e o modelo PI é o mais empregado neste estudo.

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Name	Transformer Name	Coxipo		0	0
type	Include Saturation and Hysteresis	No		0	2
n3w	Enable 3rd Winding External Connections	Yes		0	1
tapCh	Tap Changer	No		0	2
edge	Tap Trigger on	Rising Edge		0	1
inps	Tap Changer Input Source	RunTime			
Tmva	3 Phase Transformer MVA	100	MVA	0	
f	Base Operating Frequency	50	Hz	0.0001	300
Xl12	Pos. seq. leakage reactance(#1-#2)	0.0830	p.u.	0.001	1.0
Xl13	Pos. seq. leakage reactance(#1-#3)	0.2290	p.u.	0.0001	1.0
Xl23	Pos. seq. leakage reactance(#2-#3)	0.1400	p.u.	0.0001	1.0
r12	Copper loss for winding(#1-#2)	0.0022	p.u.	0.0	0.5
r13	Copper loss for winding(#1-#3)	0.0058	p.u.	0.0	0.5
r23	Copper loss for winding(#2-#3)	0.0036	p.u.	0.0	0.5
nll	No Load Losses	0.0	p.u.	0.0	1

Figura 28 - Configurações do transformador trifásico de 3 enrolamentos

A resistência série, indutância série e capacitância *shunt*, as três grandezas de sequência positiva e zero, são necessárias na configuração do modelo PI e relacionam-se com as impedâncias próprias e mútuas da linha de acordo com as equações (3.1) e (3.2) [39].

$$r_S = \frac{R_Z + 2R_P}{3}, \quad l_S = \frac{L_Z + 2L_P}{3}, \quad c_S = \frac{C_Z + 2C_P}{3} \quad 3.1$$

$$r_M = \frac{R_Z - R_P}{3}, \quad l_M = \frac{L_Z - L_P}{3}, \quad c_M = \frac{C_Z - C_P}{3} \quad 3.2$$

Desta forma, as matrizes de resistência, indutância e capacitância das linhas são dadas pela equação (3.3), assumindo que são simétricas.

$$[R] = \begin{bmatrix} r_M & r_S & r_S \\ r_S & r_M & r_S \\ r_S & r_S & r_M \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} l_M & l_S & l_S \\ l_S & l_M & l_S \\ l_S & l_S & l_M \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c_M & c_S & c_S \\ c_S & c_M & c_S \\ c_S & c_S & c_M \end{bmatrix} \quad 3.3$$

O equivalente PI é exemplificado pela Figura 29.

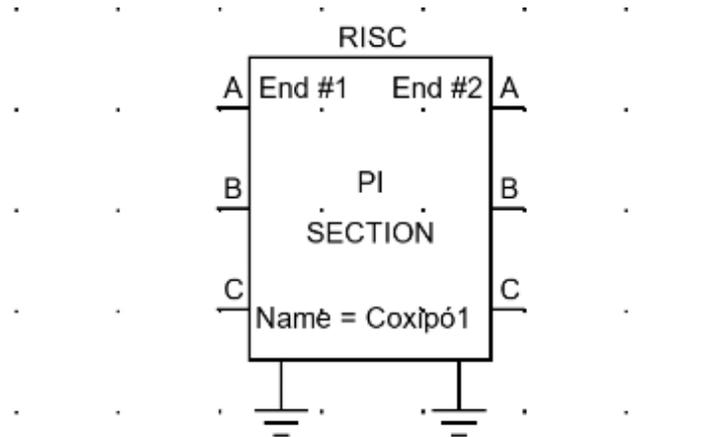


Figura 29 - Equivalente PI das linhas de transmissão

3.2.4 Modelo de Linhas *T-line*

O modelo *T-line* é usualmente utilizado para representar longas linhas de transmissão, onde o atraso inerente de um modelo de ondas viajantes é segregado em simulações menores que são realizadas de forma independentes e em paralelo [39]. Em outros casos, são frequentemente empregados na conectividade elétrica entre dois ou mais sistemas. Em decorrência das limitações computacionais e extensos cálculos numéricos, grandes SEPs podem ser divididos em vários *racks* através do modelo *T-line*.

O modelo utilizado possui basicamente um terminal transmissor e outro receptor, onde os parâmetros das linhas (resistência, indutância, capacitância *shunt* e comprimento da linha) são alocados em um arquivo *.tli*, próprio do RTDS. Um bloco nomeado *Tline calculation block* intermedeia a comunicação entre o sistema elétrico e o arquivo, onde o cálculo numérico é realizado. A Figura 30 ilustra os componentes do modelo *T-line*.

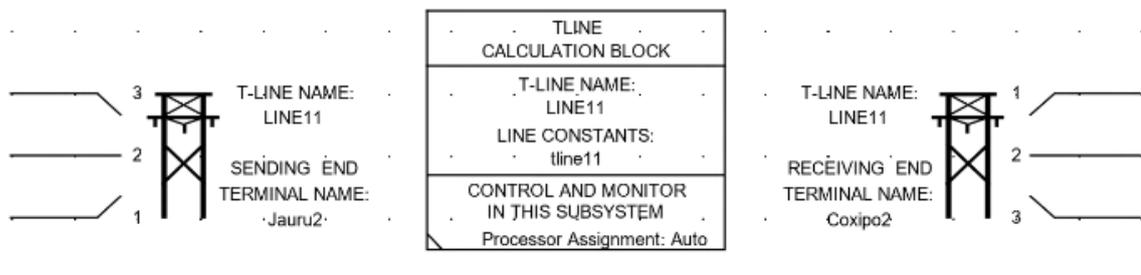


Figura 30 - Linhas de transmissão representadas pelo modelo *T-line*

3.2.5 Modelo de Gerador Síncrono com Transformador de Acoplamento

O modelo de gerador síncrono utilizado nas simulações é baseado na teoria geral de máquinas síncronas, com a excitação e o torque mecânico controlados por elementos externos. Os dados base do gerador são sua capacidade nominal, tensão de linha e frequência fundamental [39].

A máquina síncrona, por ser um equipamento complexo, necessita de variáveis essenciais em sua estabilidade dinâmica. Uma das características mecânicas requisitada do gerador é a constante de inércia H ($MW - seg./MVA$), extraída do momento de inércia do rotor. Quanto a magnitude e o ângulo de fase da tensão em relação a referência, esses são dados fundamentais.

As referências elétricas são exemplificadas na Figura 31 e são particulares para cada tipo de gerador.

If_rtds_sharc_sld_MACV31					
SIGNAL NAMES FOR RUNTIME : TRF		INTERNAL BUS PARAMETERS			
SIGNAL MONITORING IN RT AND CC: TRF		SIGNAL NAMES FOR RUNTIME: MAC			
OUTPUT OPTIONS		SIGNAL MONITORING IN RT AND CC: MAC			
MACHINE ZERO SEQUENCE IMPEDANCES			TRANSFORMER PARAMETERS		
MACHINE ELECT DATA: GENERATOR FORMAT					
MECHANICAL DATA AND CONFIGURATION			MACHINE INITIAL LOAD FLOW DATA		
GENERAL MODEL CONFIGURATION			PROCESSOR ASSIGNMENT		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Xa	Stator Leakage Reactance	0.145	p.u.	0.01	
Xd	D-axis: Unsaturated Reactance	0.95	p.u.	0.1	
Xd'	D: Unsaturated Transient Reactance	0.3	p.u.	0.05	
Xd''	D: Unsaturated Sub-Trans. Reactance	0.21	p.u.	0.02	
Gfd	D: Real Component of Transfer Admit.	100.0	p.u.	0.0	100.0
Bfd	D: Imag Component of Transfer Admit.	100.0	p.u.	0.0	100.0
Xq	Q-axis Unsaturated Reactance	0.57	p.u.	0.1	
Xq'	Q: Unsaturated Transient Reactance	0.29	p.u.	0.05	1.0e6
Xq''	Q: Unsaturated Sub-Trans. Reactance	0.2	p.u.	0.02	
Ra	Stator Resistance	0.0005	p.u.	0.000125	
Tdo'	D: Unsat. Transient Open T Const.	4.5	sec	0.001	
Tdo''	D: Unsat. Sub-Trans. Open T Const.	0.055	sec	0.001	
Tqo'	Q: Unsat. Transient Open T Const.	1.42	sec	0.001	4.0
Tqo''	Q: Unsat. Sub-Trans. Open T Const.	0.1	sec	0.001	

Figura 31 - Parâmetros Padrões de uma Máquina Síncrona

Onde:

- X_a é a reatância de dispersão do estator em p.u.;
- X_d é a reatância insaturada do eixo direto em p.u.;
- X'_d é a reatância insaturada transitória do eixo direto em p.u.;
- X''_d é a reatância insaturada subtransitória do eixo direto em p.u.;
- X_q é a reatância insaturada do eixo em quadratura em p.u.;
- X'_q é a reatância insaturada transitória do eixo em quadratura em p.u.;
- X''_q é a reatância insaturada subtransitória do eixo em quadratura em p.u.;
- R_a é a resistência do estator em p.u.;
- T'_{do} é a constante de tempo transitória do eixo direto, armadura em aberto (s);
- T''_{do} é a constante de tempo subtransitória do eixo direto, armadura em aberto (s);
- T'_{qo} é a constante de tempo transitória do eixo em quadratura, armadura em aberto (s);
- T''_{qo} é a constante de tempo subtransitória do eixo em quadratura, armadura em aberto (s);

Os parâmetros da impedância de sequência zero e do neutro podem ser configurados e quando presentes, são alocados em série. Quanto ao transformador de acoplamento da máquina síncrona com o sistema, ele possui configuração semelhante ao equipamento descrito no item 3.2.2. A Figura 32 ilustra o modelo utilizado, onde os blocos de controle possuem configurações à parte.

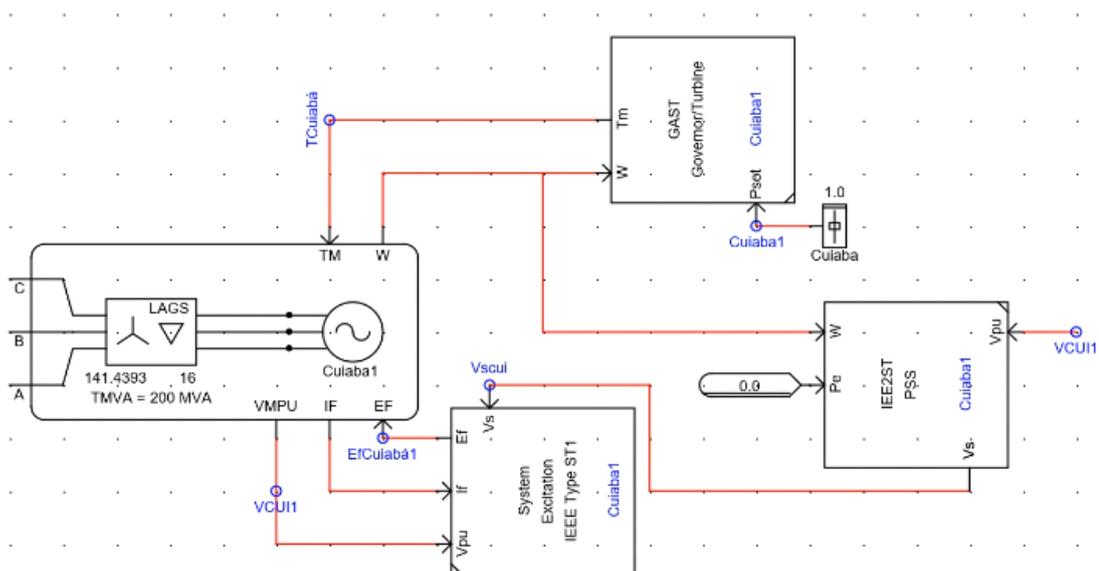


Figura 32 - Máquina síncrona representada no RTDS

3.3 MODELAGEM DO LOCALIZADOR DE FONTES DE AMTs

O localizador de fontes de AMTs fundamentado no item 2.2.2 foi desenvolvido integralmente da plataforma RTDS, onde os sinais necessários à composição da potência complexa trifásica, exigida no método de localização, serão extraídos do lado de alta tensão dos transformadores das subestações. As correntes de linha são extraídas diretamente dos transformadores modelados no RTDS, enquanto os valores das tensões trifásicas são obtidos junto aos barramentos.

Estão configuradas 7 regiões de monitoramento, as quais foram selecionadas de acordo com a localização estratégica dos transformadores e a capacidade de transformação das SEs, com o intuito de otimizar o processo. As subestações e os níveis de tensão das mesmas, que foram contempladas com o localizador, são apresentados na Tabela 2 e indicadas em Anexo.

Tabela 2 - Local de monitoramento dos localizadores

Localizador	Subestações	Níveis de tensão
M1	B. Peixe 2	230/138 kV
M2	Rondonópolis 230	230/138 kV
M3	Coxipó 230	230/138 kV
M4	Sinop 230	230/138 kV
M5	Alto Jauru	230/138 kV
M6	Sinop 138	138/69 kV
M7	Coxipó 138	138/13,8 kV

No primeiro momento, dois níveis de potência complexa são extraídos continuamente da fronteira monitorada, um nomeado como pré-AMT e o outro de durante o AMT, e ambos são a todo momento atualizados, enquanto não houver distúrbios na rede. As tensões nos terminais do transformador são averiguadas paralelamente, com o intuito de identificar um AMT. No momento em que o afundamento ocorre, um *trigger* libera os valores da potência complexa, segregados em parte ativa e reativa, para que a lógica do localizador possa identificar a origem da falta.

A Figura 33 ilustra a lógica *booleana* modelada no RTDS que segue os princípios básicos apresentados no item 2.2.4. A variável (*mxH*) refere-se a faltas a montante e (*mxL*) a faltas a jusante.

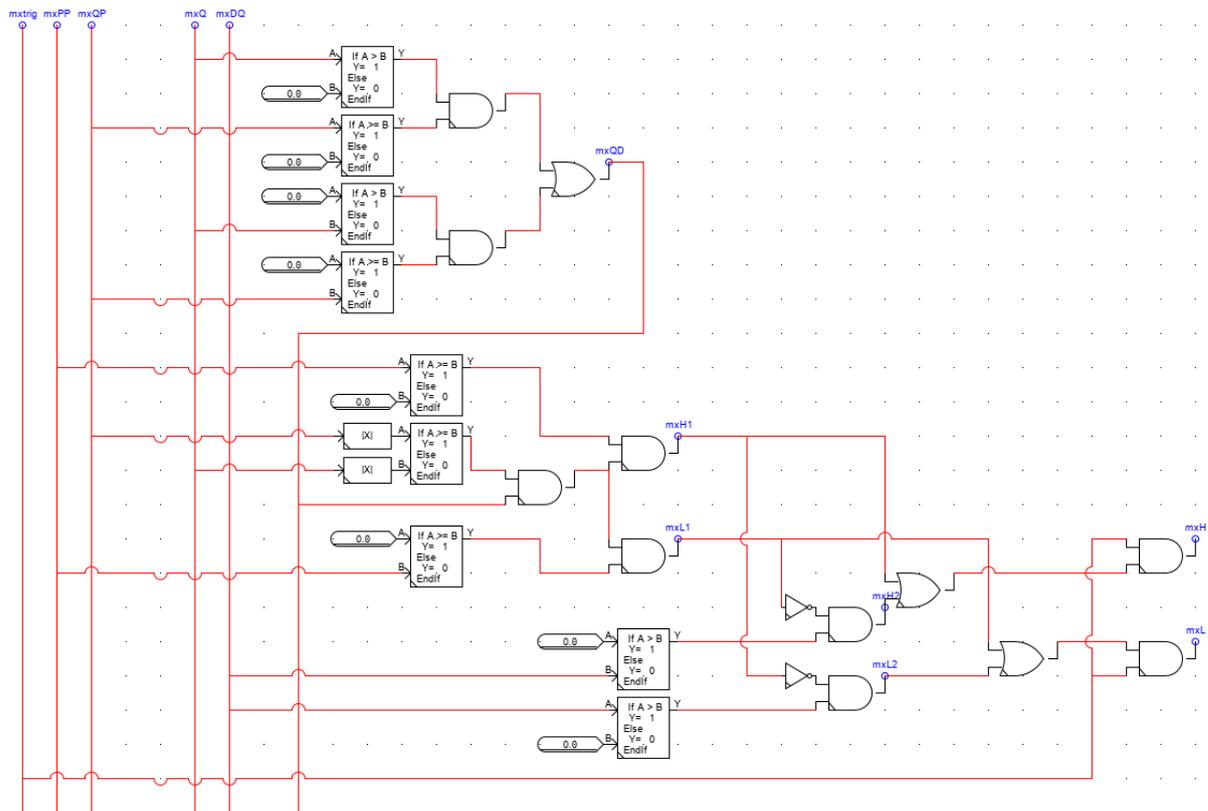


Figura 33 - Lógica *Booleana* do localizador de fontes de AMTs

Onde:

- (*mxtrig*) é o gatilho do AMT;
- (*mxPP*) é a potência ativa pré-AMT;
- (*mxQP*) é a potência reativa pré-AMT
- (*mxQ*) é a potência reativa durante o AMT
- (*mxDQ*) é a diferença entre a potência reativa pré-AMT e durante o AMT;

3.4 MODELAGEM DO SVC

Em relação ao sistema elétrico original, os compensadores estáticos de reativos são elementos inseridos no SEP e estão instalados em locais estratégicos, onde as tensões em regime permanente não estavam enquadradas dentro dos limites

estabelecidos em norma. Desta forma, três SVCs, com capacidades especificadas de acordo com a demanda dos barramentos alocados, foram configurados e a Tabela 3 demonstra essas regiões. É importante salientar que a parte positiva da capacidade do SVC representa a potência injetada na rede, ou seja, potência reativa capacitiva e por consequência, a parte negativa caracteriza a potência consumida ou reativa indutiva.

Tabela 3 - Localização dos SVCs

SVC	Barramento	Potência (MVar)
SVC1	Xavantina	+15/-20
SVC2	IV Marcos	+30/-40
SVC3	D. Cláudia	+15/-20

A configuração elétrica elementar do dispositivo é composta por um TSC e um TCR, ambos conectados em delta, devido aos benefícios descritos no item 2.3.3.1. Os elementos passivos do TSC são parametrizados de tal forma que estão sintonizados na frequência de 300Hz e filtram a componente de 5^o harmônico. Por fim, a parte indutiva do SVC possui maior capacidade nominal devido a região de controle, como explicitado no item 2.3.3.5.

O princípio básico do SVC é medir e posteriormente adequar os níveis de tensão no local instalado dentro de padrões estabelecidos em norma. Assim, a primeira ação do dispositivo modelado no RTDS é extrair continuamente os valores da tensão trifásica do barramento onde está alocado e posteriormente convertê-los em valores eficazes da tensão referenciados em p.u. (V_{NPU}). Todavia, esses valores primários possuem várias interferências e ruídos, os quais podem comprometer o desempenho do SVC, e desta forma o sinal é tratado por filtros, que dentre outras funções, elimina a componente de sequência negativa.

A Figura 34 ilustra o regulador do SVC, onde o sinal de entrada é o valor residual obtido da diferença entre: o valor de referência ajustado pelo operador do dispositivo (V_{SET}), o qual normalmente é de 1 p.u., e V_{NPU} . A essência do regulador é o controlador Proporcional-Integral, pois ele traduz o sinal de entrada em uma susceptância ($B_{PUHIORD}$) compatível com a operação do compensador, como fundamentado no item 2.3.3.5. Esse tipo de controlador é ideal nesse processo pois a parte integral induz um erro em regime permanente próximo de zero, sem interferir na

resposta transitória do sistema, enquanto a parte proporcional induz uma maior velocidade na resposta [40]. Outros componentes estão inclusos no regulador, como o limitador de valores e alguns blocos de acionamento (D_{BLOCK} e $B_{SETMODE}$), que são essenciais em outros processos do controle do SVC.

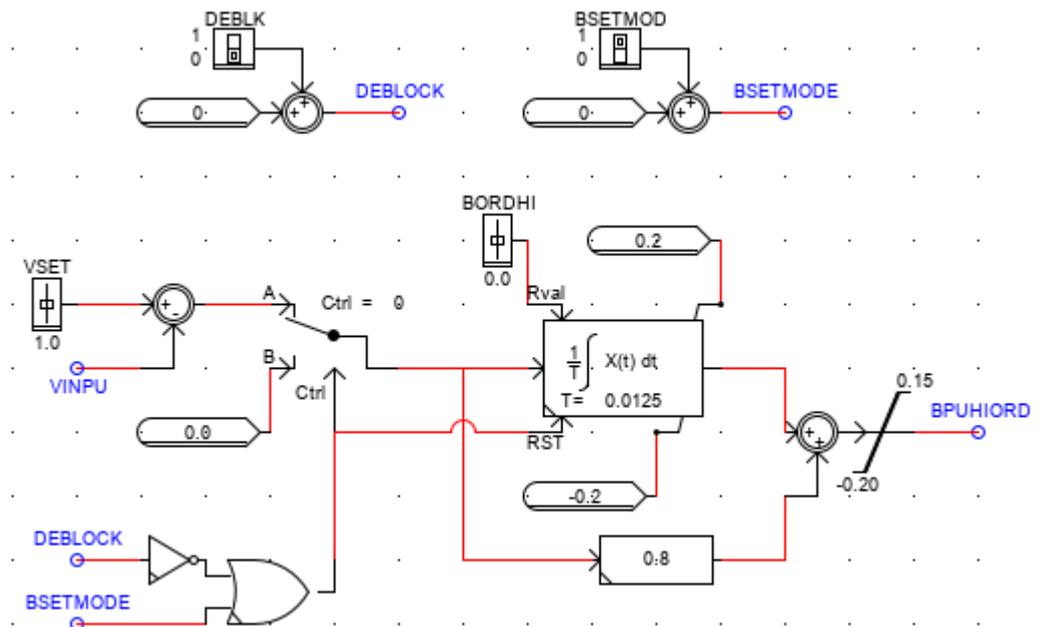


Figura 34 - Regulador do SVC

A susceptância $B_{PUHIORD}$ está referenciada ao lado de AT e como a impedância do transformador de acoplamento (X_T) é relevante, a equação (3.4) indica como a grandeza é corrigida para o lado de BT (B_{PULOW}).

$$B_{PULOW} = \frac{B_{PUHIORD}}{1 + X_T \times B_{PUHIORD}} \quad 3.4$$

Em posse de B_{PULOW} , o status do TSC pode ser definido (ativado/desativado) e isso é essencial para definir posteriormente o ângulo de disparo do TCR. Primeiramente, é necessário estabelecer um bloco de histerese para controlar o acionamento do TSC, como ilustra a Figura 35, o qual possui uma região de inércia, pois valores transitórios de B_{PULOW} muito próximos dos limites, podem exercer chaveamentos incessantes do capacitor.

O bloco *TSC Firing* necessita de outras variáveis complementares para definir o ângulo de disparo, como o ângulo ($PHASE$) que é um sinal gerado pelo PLL (*Phase-locked Loop*) para permitir o sincronismo correto com o sistema AC, e as tensões no

barramento do SVC e nos terminais dos capacitores. Na Figura 35, $BK1FP$ é a variável de disparo do TSC.

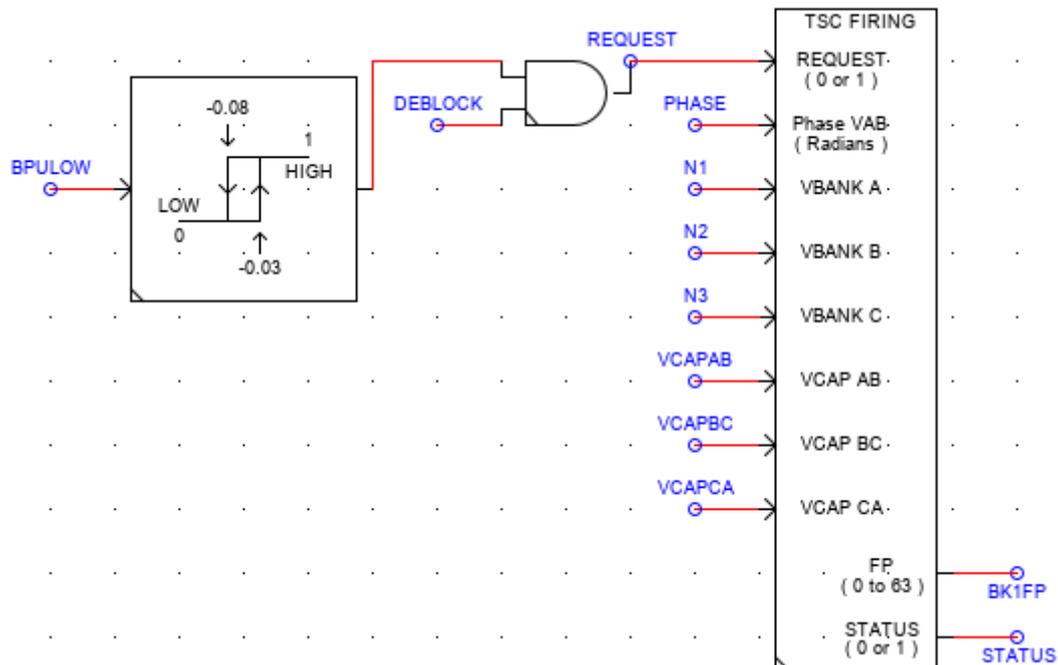


Figura 35 - Bloco de controle do TSC

A variável $STATUS$ é imprescindível na determinação do ângulo de disparo do TCR, pois ela informa ao controle do SVC o acionamento ou não do TSC. Ela é utilizada no diagrama como ilustra a Figura 36 e quando igual a um, o bloco *if/else* libera um valor que será subtraído de B_{PULOW} e gerará a variável B_{TCR} , a qual será a verdadeira susceptância do TCR. Na ocasião de $STATUS$ igual a zero, nenhum valor será subtraído de B_{PULOW} que será idêntico a B_{TCR} .

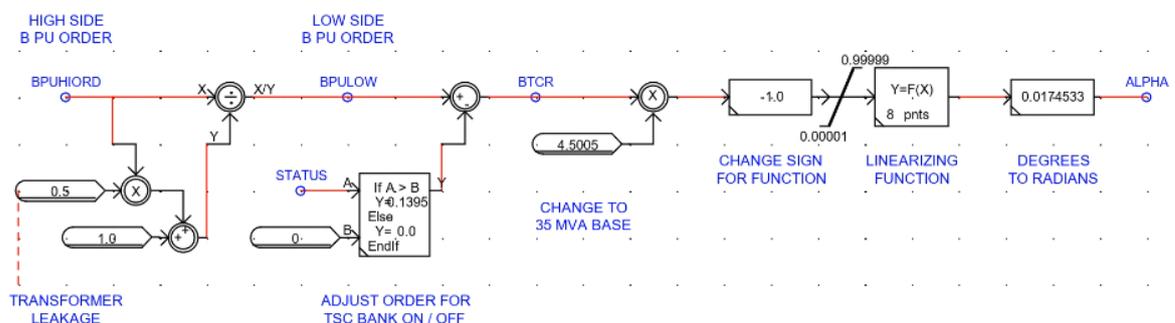


Figura 36 - Bloco de controle do TCR

Posteriormente, a base B_{TCR} , que é igual a potência do TCR, é modificada para a base de 100 MVA e finalmente o ângulo de disparo dos tiristores ($ALPHA$) é definido, como demonstrado no item 2.3.3.4.

Com o ângulo $ALPHA$ estabelecido, o disparo de TCR através do bloco *Firing Pulse Generator* é executado e ocorre quando ele for igual ao ângulo de sincronismo ($PHASE$). A Figura 37 exemplifica a geração de pulso, onde a variável de disparo (FP) aciona os tiristores, e $FLAST$ e $FRAC$ fazem o ajuste fino do gatilho.

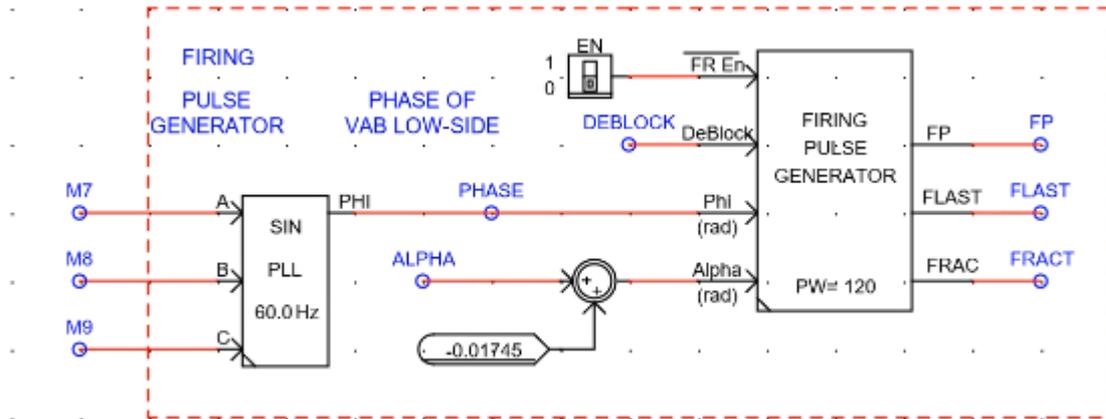


Figura 37 - Bloco de geração de pulso

Todo esse processo é contínuo pois, a resposta do SVC deve ser rápida e precisa acompanhar a dinâmica do sistema elétrico.

4 RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O capítulo apresentará os resultados obtidos nas simulações computacionais desenvolvidas no RTDS, com o intuito de consolidar a compreensão do estudo em concordância com as premissas e bases teóricas apresentadas nos capítulos anteriores. Os casos mais complexos serão tratados em particular ao longo do capítulo.

Foram selecionados 12 nós em todo o sistema elétrico para a aplicação das faltas, contemplando a maioria dos níveis de tensões do sistema, alocadas em lugares estratégicos para melhor avaliar o desempenho do localizador de faltas. Os tipos de curtos-circuitos aplicados foram: fase-terra, fase-fase-terra e trifásico. Eles representam, na ordem que foram listados, as categorias de faltas mais recorrentes em um SEP. Os barramentos onde foram aplicadas as faltas estão listados na Tabela 4 e indicados em Anexo.

Tabela 4 - local de ocorrência das faltas

FALTA	LOCALIDADE	NÍVEL DE TENSÃO
F1	Canarana	138 kV
F2	BGA13	13,8 kV
F3	F. Natal	69 kV
F4	Colider	138 kV
F5	Rio Verde	230 kV
F6	Sorriso	230 kV
F7	V. Grande	138 kV
F8	N. Mutum 2	13,8 kV
F9	CBA 138	138 kV
F10	CPA 138	138 kV
F11	Nobres 2	138 kV
F12	COX 13B	13,8 kV

As faltas localizadas no nível de tensão de 13,8 kV foram alocadas em regiões nas quais os transformadores de potência possuem conexão delta-estrela, com o intuito principal de analisar a propagação do AMT.

Quanto a simulação das demais faltas, estão predominantemente alocadas em regiões malhadas. Desta forma, múltiplos localizadores podem ser sensibilizados pelos AMTs gerados, cenário o qual cabe ao operador identificar a zona de ocorrência do distúrbio.

Com o sistema elétrico real parametrizado, foram criados mais dois cenários derivados da configuração original, os quais representem respectivamente um sistema subcarregado e outro sobrecarregado. Para tal análise, os dados de carga utilizados como base foram obtidos do ONS, subsistema Sudeste / Centro-Oeste, ano de 2019. A Figura 38 apresenta os dados mensais obtidos durante o período analisado, no qual a carga média sofre uma variação inferior (subcarregado) e outra superior (sobrecarregado).

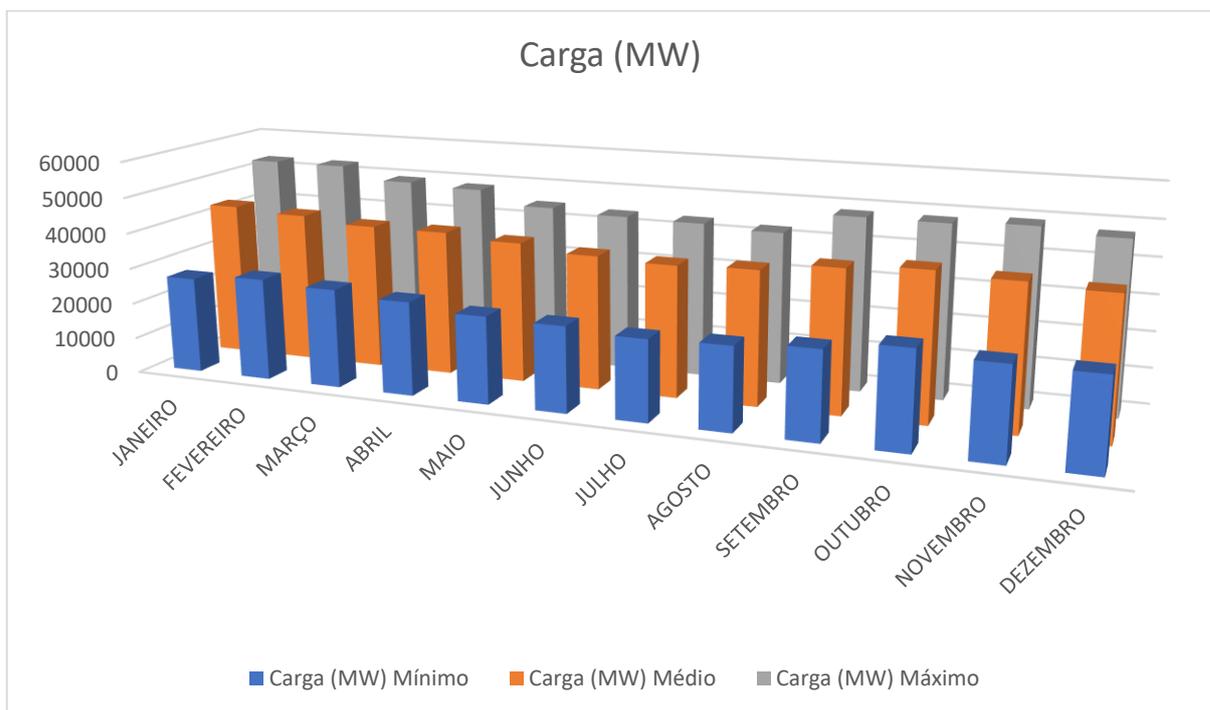


Figura 38 - Níveis de carga do subsistema Sudeste / Centro-Oeste

Como ilustra a Figura 38, a carga total do sistema sofre variações mensais e sazonais, e por esse motivo é essencial configurar os demais sistemas elétricos.

A Figura 39 apresenta a variação da carga, no qual os resultados apresentados são a porcentagem em relação ao valor médio.

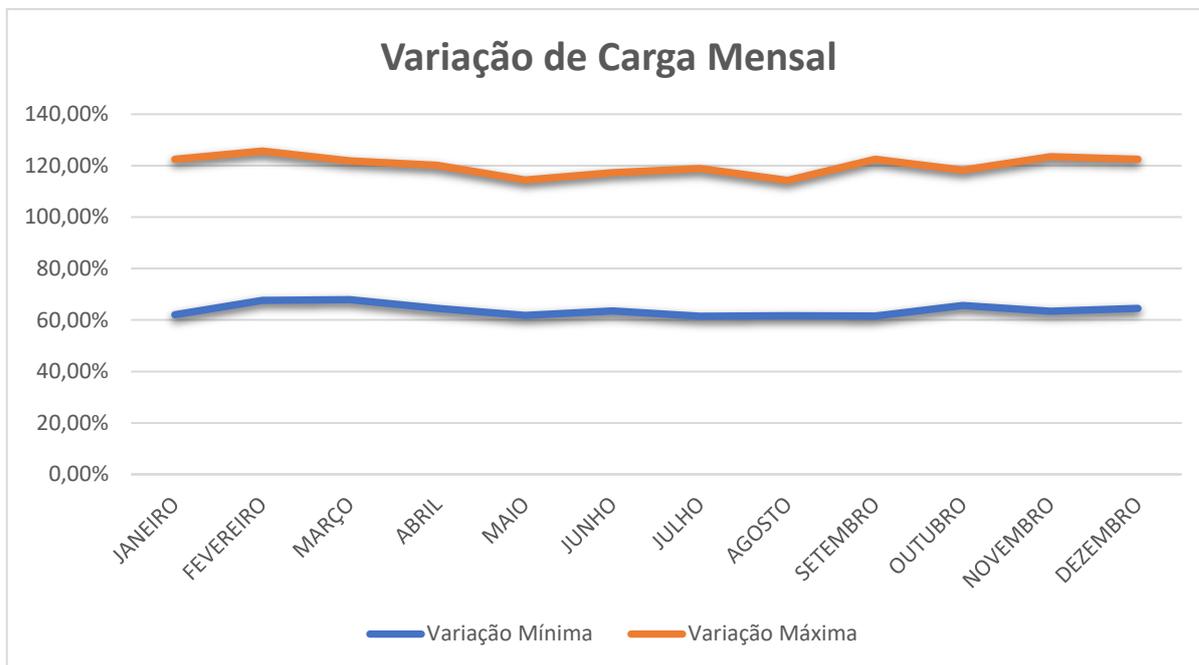


Figura 39 - Variação da carga mensal

Tabela 5 - Média e Percentil obtidos da variação de carga mensal

	Variação	
	Mínima	Máxima
MÉDIA	63,85%	120,24%
PERCENTIL	57,30%	133,55%

Através dos dados foi estabelecido, um sistema terá 130% de carga e o outro será configurado com 60%, além da configuração com carga nominal, e representarão a margem de operação do sistema.

4.2 SISTEMA ELÉTRICO SEM SVC

Os primeiros casos analisados são aqueles que representam a configuração original, ou seja, sem a presença de compensadores estáticos de reativos. Esses estudos são necessários pois servirão de base para analisar em que magnitude os SVCs influenciarão na localização dos distúrbios.

A Tabela 6 representa exatamente onde estão localizadas as faltas em relação aos localizadores e fornece um gabarito para avaliar o desempenho das simulações. Aquelas que estiverem localizadas a montante do transformador de fronteira, serão

identificadas com a letra “H” (*High Voltage*), enquanto as faltas localizadas a jusante serão representadas pela letra “L” (*Low Voltage*). Apesar de serem exatos os locais das faltas, alguns localizadores não serão sensibilizados com AMTs, devido à distância elétrica entre eles e a origem dos distúrbios, a tensão em seus terminais não serão afetadas a ponto de caracterizar um AMT.

Tabela 6 - Localização exata das fontes de AMTs frente aos medidores

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
M1	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
M2	H	H	H	H	H	H	L	H	L	L	L	L
M3	H	H	H	H	H	H	L	H	L	L	L	L
M4	H	H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
M5	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
M6	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H
M7	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

Nas simulações, a duração do distúrbio foi estabelecida como 100 milissegundos (aproximadamente 6 ciclos), ideal para um afundamento momentâneo, com impedância de falta ínfima, característico de um curto-circuito franco. A ausência da impedância foi considerada com intuito de gerar cenários mais críticos de afundamentos de tensão.

Para cada perfil de carga do sistema elétrico uma macro gerou automaticamente 252 amostras, considerando 3 tipos de faltas (FT, FFT e 3F), 12 pontos de aplicação das faltas (F1 a F12) e 7 medidores (M1 a M7). Assim, o cenário sem SVC é composto por 756 amostras. É importante salientar que para cada tipo de falta, foi utilizada apenas uma combinação de fases, pois o sistema elétrico é equilibrado e a combinação de outras fases não alterará os resultados.

Os resultados são gerados pela interface gráfica do RTDS, por meio do *RUNTIME*, e são analisados em tempo real através de relatórios individuais para cada caso, os quais são compostos por: (i) oscilografia senoidal das tensões trifásicas nos terminais do transformador monitorado; (ii) o círculo da potência complexa que permite analisar o seu comportamento durante distúrbios na rede; (iii) o indicador da fonte do AMT, que é sensibilizado durante afundamentos de tensão; (iv) valores em P.U. da potência ativa e reativa e (v) interface que monitora as variáveis associadas aos AMTs.

A Figura 41 ilustra o relatório individual para uma falta fase-terra em F2, com o localizador instalado em M1.

A título de ilustração, a Figura 40 exemplifica o comportamento da potência complexa para uma falta FT em F2, observado pelo localizador em M1. Momentos antes da falta, a potência reativa que fluía pelo transformador de fronteira em regime permanente era de jusante para montante e ocorria devido ao excesso de reativos produzido pelas longas linhas de transmissão da região, o qual não era consumido em sua totalidade pelas cargas. Durante o distúrbio com duração de 100 milissegundos, o fluxo de potência reativa ($PU_{reativa}$) é invertido, exclusivamente para suprir a falta, enquanto a potência ativa (PU_{ativa}) não sofre quase nenhuma alteração, apenas em regime transitório.

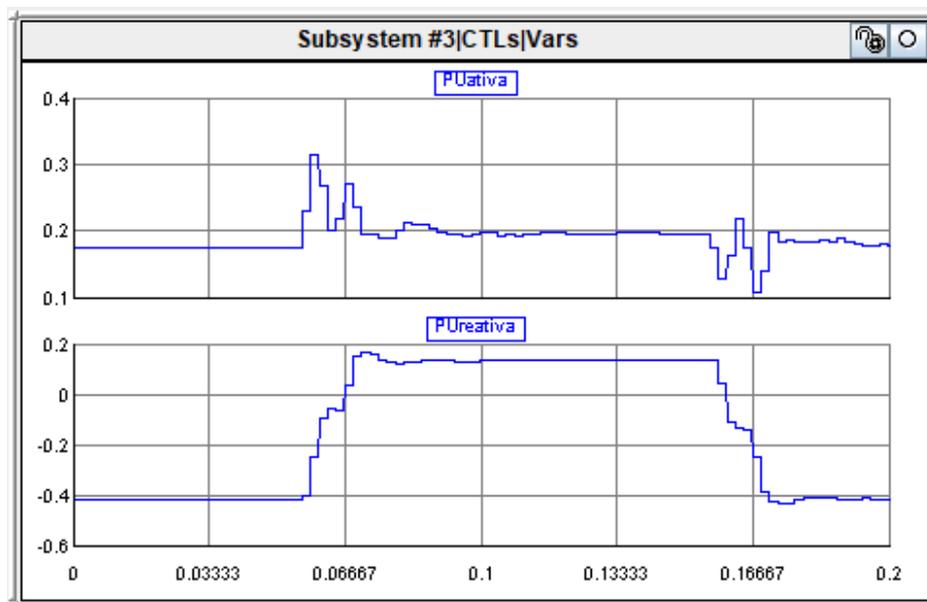


Figura 40 - Potência complexa durante F2 para M1

A Figura 42 demonstra o mesmo comportamento da potência complexa, contudo por uma perspectiva diferente. O ponto que estava no 4º quadrante, em regime permanente, percorre um caminho no círculo complexo até estabilizar-se no 1º quadrante, durante a falta. Após o distúrbio, o ponto regride para sua posição original.

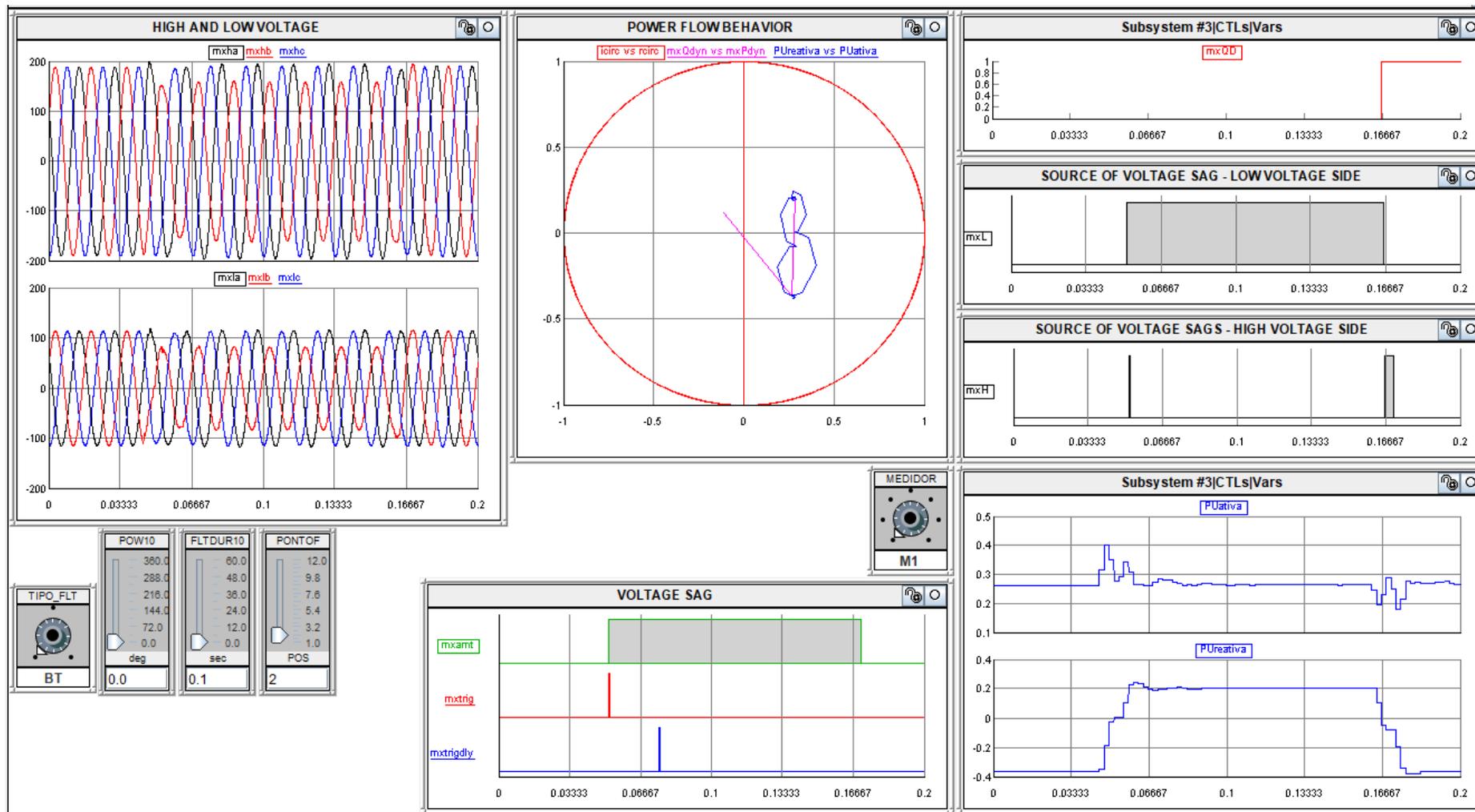


Figura 41 - Relatório individual gerado no RUNTIME

Para o mesmo evento citado, a Figura 42 apresenta o mesmo comportamento da potência complexa, contudo por uma perspectiva diferente. O ponto de operação que estava no 4º quadrante, em regime permanente, percorre um caminho no círculo complexo até estabiliza-se no 1º quadrante, durante a falta. Após o distúrbio, o ponto retorna para sua posição original.

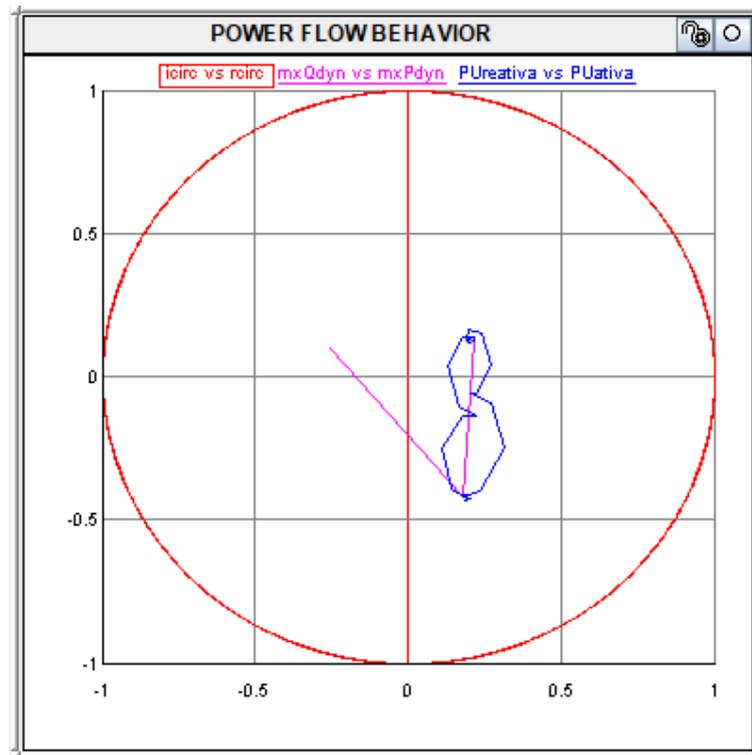


Figura 42 - Círculo complexo durante F2 para M1

4.2.1 Sistema Elétrico Subcarregado

4.2.1.1 Caso para faltas Fase-terra

O primeiro caso analisado representa um sistema elétrico com demanda inferior, carregado com 60% da carga nominal. Pelas características da rede, o fluxo de potência foi modificado, com tendência a exportação da energia gerada para outros subsistemas. Foi observado que os níveis de tensões na maioria dos barramentos estão elevados devido a baixa da energia reativa consumida pelas cargas, frente aos reativos produzidos pela geração e pelas longas linhas de transmissão.

A Tabela 7 indica todas as faltas monofásicas geradas e o comportamento dos localizadores. Será estabelecido que para essa e amostragens posteriores, as células que estiverem marcadas com um hífen (-), indicam que o localizador de AMTs estudado não foi sensibilizado pelo distúrbio, ou seja, as tensões remanescentes nos

terminais do transformador não chegaram a 90% ou porcentagem inferior em relação ao valor nominal da tensão. Os casos que estiverem assinalados com numeral um (1) são aqueles em que houve AMT e o localizador teve êxito na localização da falta, e caso contrário, o numeral zero (0) será utilizado para caracterizar erro na localização.

Com a amostragem dos dados na Tabela 7, o nível de acerto para esse cenário foi de 86,67%.

Tabela 7 - Resultados para faltas FT em sistemas subcarregados sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	0	-	-	0	0	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	-	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	-	1

As faltas F5 para M5 e F6 para M2 encontram-se eletricamente distantes dos localizadores resultando inicialmente numa falta de identificação. No entanto, do ponto de vista sistêmico, tais resultados não comprometem a validade dos resultados e eficiência do sistema de localização de AMTs, pois outros dispositivos mais próximos localizaram corretamente a falta ocorrida. A falta F5 para M2 será analisada em uma seção posterior, pois trata-se de uma estudo mais detalhado.

4.2.1.2 Caso para faltas Fase-fase-terra

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para as faltas fase-fase-terra e a sensibilização dos localizadores.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 8, o nível de acerto para esse cenário foi de 92,50%, que pode ser considerado apropriado.

Tabela 8 - Resultados para faltas FTT em sistemas subcarregados sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	1	-	-
M2	-	0	-	-	1	0	1	-	1	1	-	-
M3	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	-	1	-	0	1	-	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	-	1	1	-	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

A Tabela 8 demonstra que os erros de localização causados pela falta fase-terra F5 em M2 não ocorrem para falta FFT, principalmente pelo maior fluxo de potência durante o distúrbio. As faltas F2 e F6 resultam em erro de localização do M2 por estarem eletricamente distantes. O localizador M4 não obteve êxito na localização do curto-circuito em F6, o qual será analisado em um capítulo posterior.

4.2.1.3 Caso para faltas Trifásicas à terra

Nessa secção as faltas trifásicas à terra são analisadas e frequentemente são os casos mais severos em um SEP. A Tabela 9 demonstra a localização dos AMTs pelos medidores instalados.

Com a amostragem dos dados na Tabela 9, o nível de acerto para esse cenário foi de 92,50%.

Tabela 9 - Resultados para faltas 3FT em sistemas subcarregados sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	1	-	-
M2	-	0	-	-	1	0	1	-	1	1	-	-
M3	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	-	1	-	1	1	-	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	-	1	1	-	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

Novamente, o localizador M2 não obteve sucesso na avaliação dos distúrbios situados em F2 e F6. Conforme já citado, estes pontos de faltas estão eletricamente distantes do ponto de monitoramento M2.

4.2.2 Sistema Elétrico com Carga Nominal

4.2.2.1 Caso para faltas Fase-terra

Foi observado que mesmo com a carga nominal, há vários barramentos com tensões elevadas, devido a característica subcarregada da rede. A Tabela 10 apresenta os resultados para faltas fase-terra e a sensibilização dos localizadores.

Com a amostragem dos dados na Tabela 10, o nível de acerto para esse cenário foi de 90,91%.

Tabela 10 - Resultados para faltas FT em sistemas com cargas nominais e sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M2	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
M3	-	-	-	-	0	1	1	-	1	1	-	-
M4	-	-	-	1	-	1	1	-	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	-	1	-	-	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	-	1

Os medidores M3 e M5 não tiveram êxito na localização da falta em F5. Quanto a F2 vista pelo localizador M2, essa será analisada em uma seção posterior, pois requer uma maior atenção.

4.2.2.2 Caso para faltas Fase-fase-terra

A Tabela 11 mostra as localizações das faltas vistas pelos diversos dispositivos. Com a amostragem dos dados na Tabela 11, o nível de acerto para esse cenário foi de 95,00%.

Tabela 11 - Resultados para faltas FFT em sistemas com cargas nominais e sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M2	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M3	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	-	1	0	0	1	1	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	1	1	1	-	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

O medidor M4 não obteve êxito em duas localizações, para a falta em F5. A falta em F6, localiza-se nas proximidades do medidor M4 será tratada de forma particular posteriormente.

4.2.2.3 Caso para faltas Trifásicas à terra

Por fim, o sistema elétrico com carga nominal é utilizado na verificação dos medidores frente a faltas trifásicas. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos e como esperado, possui uma maior ocorrência de casos de AMTs.

Com a amostragem dos dados na Tabela 12, o nível de acerto para esse cenário foi de 92,68%.

Tabela 12 - Resultados para faltas 3FT em sistemas com cargas nominais e sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M2	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M3	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	1	1	0	0	1	1	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	1	0	1	-	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

Os medidores M4 e M6 não tiveram sucesso na localização das faltas F5 e F6, respectivamente. Quanto ao caso em que o localizador M4 não identifica corretamente a falta em F6, esse será analisado posteriormente.

4.2.3 Sistema Elétrico com Sobrecarga

4.2.3.1 Caso para faltas Fase-terra

O sistema elétrico sobrecarregado representa aquele que há aumento expressivo de consumo de carga e a rede elétrica também deve estar preparada para esta ocasião. Observa-se que as tensões nos barramentos estão em patamares mais adequados em relação aos casos anteriores, no entanto, ainda observa-se algumas barras com sub e outras com sobretensões. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para faltas fase-terra com a respostas dos localizadores.

Com a amostragem dos dados na Tabela 13, o nível de acerto para esse cenário foi de 88,24%.

Tabela 13 - Resultados para faltas FT em sistemas sobrecarregados sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	-	0	1	-	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	-	1	1	-	1	1	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	1

A localização da falta F5 observada pelos medidores M3 e M5 não obteve sucesso. As faltas F5 vista pelo localizador M2 e F6 pelo M4 serão analisadas posteriormente, pois necessitam de uma avaliação particular.

4.2.3.2 Casos para faltas Fase-fase-terra

Essas faltas tendem a causar um número maior de afundamentos de tensão do que as faltas FT e serão analisadas com base nos resultados apresentados na Tabela 14.

O nível de acerto para esse cenário foi de 92,86%.

Tabela 14 - Resultados para faltas FFT em sistemas sobrecarregados sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M2	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M3	-	-	-	-	1	0	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	1	1	0	0	1	1	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

Os localizadores M3 e M4 não obtiveram sucesso na localização das faltas situadas em F6 e F5, respectivamente. Para a falta situada em F6, o medidor adjacente M4 localizou erroneamente a origem do distúrbio, caso que será tratado posteriormente.

4.2.3.3 Casos para faltas Trifásicas à terra

Por fim, a Tabela 15 apresenta os resultados obtidos aplicando faltas trifásicas e como esperado, possui uma maior ocorrência de AMTs.

Com a amostragem dos dados na Tabela 15, o nível de acerto para esse cenário foi de 92,86%.

Tabela 15 - Resultados para faltas 3FT em sistemas sobrecarregados sem SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M2	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M3	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	1	1	0	0	1	1	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	1	0	1	1	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

Os medidores M4 e M6 não tiveram sucesso na localização das faltas F5 e F6, respectivamente. O caso em que o localizador M4 não identifica corretamente a falta em F6 será analisado em detalhes posteriormente.

4.3 SISTEMA ELÉTRICO COM SVC

As simulações realizadas considerando os compensadores estáticos de reativos instalados serão utilizadas no estudo para avaliar a influência desses no desempenho dos localizadores de AMTs, frente aos curtos-circuitos na rede. As mesmas configurações dos sistemas elétricos utilizadas no item 4.2 serão empregadas, além da Tabela 6, utilizado como referência, para efeito de comparação.

4.3.1 Sistema Elétrico Subcarregado

4.3.1.1 Casos para faltas Fase-terra

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos com a simulação de falta fase terra e como esperado, possui uma taxa inferior de ocorrência de AMTs em relação aos outros tipos de falta.

Com a amostragem dos dados na Tabela 16, o nível de acerto para esse cenário foi de 84,85%.

Tabela 16 - Resultados para faltas FT em sistemas subcarregados com SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	0	1	-	-	1	1	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	0	-	-	0	0	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	-	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	-	1	-	-	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	-	1

Os distúrbios ocorridos em F2 e F6 causaram a falha de localização do medidor M2, além de F5 em M5. Outros eventos ocorridos em F1 frente ao medidor M1, F5 frente M2 e F5 frente a M5 serão tratados posteriormente.

4.3.1.2 Casos para faltas Fase-fase-terra

Na sequência, o sistema subcarregado é utilizado na análise de faltas bifásicas à terra com a presença de SVCs, como apresentados na Tabela 17.

Com a amostragem dos dados na Tabela 17, observa-se que o nível de acerto para esse cenário foi de 90,48%.

Tabela 17 - Resultados para faltas FFT em sistemas subcarregados com SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	1	-	-
M2	-	0	-	-	1	0	1	-	1	1	1	-
M3	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	-	1	0	1	1	-	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	-	1	1	-	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

Alguns medidores não obtiveram êxito na localização de determinadas faltas, como os eventos em F2 e F6, no qual o localizador M2 identificou erroneamente o curto-circuito, além de F5 para os medidores M4 e M5. Observa-se que todos esses pontos estão em regiões distintas e distantes eletricamente entre si.

4.3.1.3 Casos para faltas Trifásicas à terra

Por fim, o sistema elétrico subcarregado é utilizado nas análises de faltas trifásicas com a presença de SVCs. A Tabela 18 mostra os resultados obtidos com os ensaios, contatando um nível de acerto de 85,37%.

Tabela 18 - Resultados para faltas 3FT em sistemas subcarregados com SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
M1	1	1	-	-	1	1	1	-	1	1	-	-
M2	0	0	-	-	1	0	1	-	0	1	-	-
M3	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
M4	-	-	-	1	-	0	1	-	1	1	-	-
M5	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
M6	-	-	1	1	-	0	1	-	1	1	-	-
M7	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

Como observado na Tabela 18, os medidores não obtiveram êxito na localização de seis ocorrências. A resposta do dispositivo M4 merece atenção na localização da falta em F6 e será tratado posteriormente.

4.3.2 Sistema Elétrico com Carga Nominal

4.3.2.1 Casos para faltas Fase-terra

O primeiro caso analisado no sistema elétrico com carga nominal é o de faltas monofásicas à terra com a presença de SVCs. A Tabela 19 expõe os resultados obtidos com os ensaios, com o percentual de acerto para esse cenário de 83,33%.

Tabela 19 - Resultados para faltas FT em sistemas com cargas nominais e SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	0	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	0	0	1	-	1	1	-	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	-	1	-	-	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	-	1

O medidor M3 não foi bem-sucedido na localização de faltas em F5 e F6, assim como o medidor M5 para o defeito em F5. Quanto as falhas de localização do medidor M1 para falta em F1 e de M2 para F5 serão analisadas posteriormente.

4.3.2.2 Casos para faltas Fase-fase-terra

Os casos analisados para faltas bifásicas à terra com a presença de SVCs são apresentados na Tabela 20, onde observa-se um nível de acerto de 97,44%.

Tabela 20 - Resultados para faltas FFT em sistemas com cargas nominais e SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	0	1	1	-	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	1	1	1	-	1	1	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

O único evento que não teve resultado coerente foi a ocorrência da falta F5 vista pelo medidor M4.

4.3.2.3 Casos para faltas Trifásicas à terra

Os resultados obtidos com as faltas trifásicas em um sistema caracterizado com cargas nominais e na presença de SVCs são demonstrados na Tabela 21, cujo índice de acerto foi de 97,30%.

Tabela 21 - Resultados para faltas 3FT em sistemas com cargas nominais e SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	-	1	1	-	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	-	0	1	-	1	1	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

O único evento que não teve resultado positivo foi a ocorrência da falta F6 vista pelo localizador M6.

4.3.3 Sistema Elétrico Sobrecarregado

4.3.3.1 Casos para faltas Fase-terra

Nesse cenário o sistema caracterizado por sobrecargas é utilizado na análise do localizador de AMTs frente a faltas monofásicas à terra, com a presença de SVCs. A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos constatando uma taxa de acerto de 87,50%.

Tabela 22 - Resultados para faltas FT em sistemas sobrecarregados com SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	0	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	-	1	1	-	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	0	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	-	1	-	-	1	-	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	1

Os medidores M3 e M5 não foram bem-sucedidos na localização da falta em F5. As falhas de localização do medidor M1 para o distúrbio em F1 e de M2 para F5, serão tratadas posteriormente.

4.3.3.2 Casos para faltas Fase-fase-terra

Os resultados encontrados para o sistema sobrecarregado, com a simulação de faltas bifásicas à terra na presença de SVCs são exibidos na Tabela 23.

Com a amostragem dos dados na Tabela 23, o nível de acerto calculado foi de 94,87%.

Tabela 23 - Resultados para faltas FFT em sistemas sobrecarregados com SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
<i>M4</i>	-	-	-	1	0	0	1	1	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	-	1	1	-	1	1	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

O medidor M4 não teve êxito na localização da falta em F5. Da mesma forma o medidor M4 falha na localização de F6.

4.3.3.3 Casos para faltas Trifásicas à terra

Por fim, o último caso analisado é o decorrente de faltas trifásicas na presença de SVCs. A Tabela 24 disponibiliza os resultados alcançados, o que representa uma taxa de assertividade de 95,00%.

Tabela 24 - Resultados para faltas 3FT em sistemas sobrecarregados com SVC

	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>F4</i>	<i>F5</i>	<i>F6</i>	<i>F7</i>	<i>F8</i>	<i>F9</i>	<i>F10</i>	<i>F11</i>	<i>F12</i>
<i>M1</i>	1	1	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M2</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M3</i>	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	-
<i>M4</i>	-	-	1	1	0	1	1	-	1	1	-	-
<i>M5</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-
<i>M6</i>	-	-	1	1	1	0	1	-	1	1	-	-
<i>M7</i>	-	-	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1

Os localizadores M4 e M6 não tiveram sucesso na localização das faltas em F5 e F6, respectivamente.

4.4 CASOS PARTICULARES

Em poucos casos, alguns medidores não comportaram como esperado e com o intuito de compreender todas estas situações, este item analisará em detalhes tais ocorrências.

As faltas monofásicas à terra foram os tipos de distúrbios que mais exigiram dos medidores, pois algumas delas são de difícil localização, devido ao baixo nível de variação do fluxo de potência. Entretanto, em geral, o localizador teve um bom resultado nessas situações, com a menor taxa de acerto na faixa de 83,33%.

4.4.1 Sistema elétrico subcarregado

4.4.1.1 Casos para faltas Fase-terra

a) Canarana (F1) – B.Peixe (M1)

O primeiro evento analisado considera a presença de SVCs no sistema elétrico subcarregado. Na Figura 43 é possível examinar que a potência reativa ($P_{Ureativa}$) tende a mudar o sentido de fluxo através dos terminais do transformador de fronteira, para alimentar a falta. Entretanto, o SVC localizado entre o medidor e o distúrbio muda o seu estado de operação rapidamente e a energia armazenada no banco de capacitores passa a suprir o curto-circuito. Assim, é possível concluir que o SVC pode influenciar na resposta do localizador em sistemas elétricos radiais.

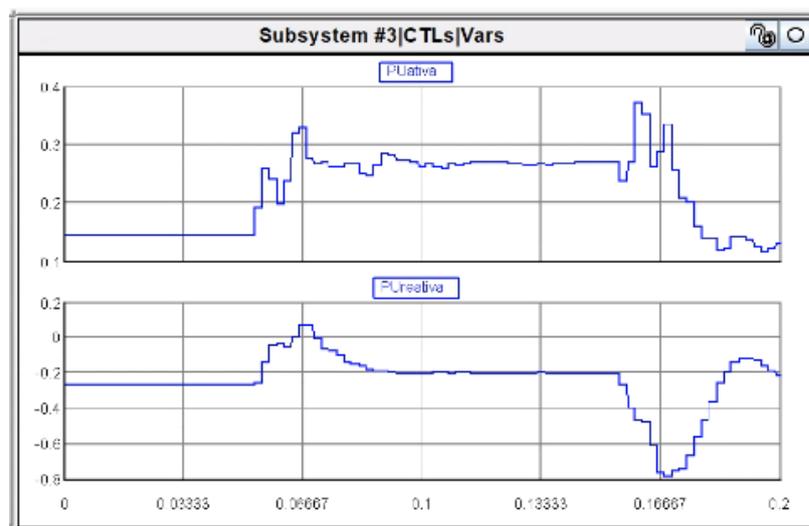


Figura 43 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas subcarregados com SVCs

No mesmo caso, sem a presença de SVCs, a Figura 44 demonstra que a potência reativa cruza o eixo horizontal do plano complexo, que passa a ser importada, e permite a localização correta da falta pelo medidor M1.

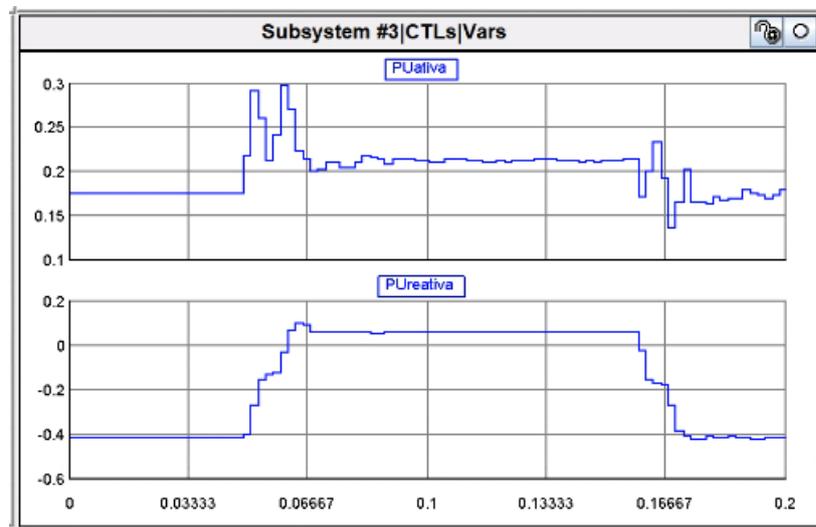


Figura 44 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas subcarregados sem SVCs

b) Rio Verde (F5) – Rondonópolis (M2)

Esse evento ocasionou erro na localização do medidor M2 tanto para o caso com SVC, quanto para aquele sem a sua presença. Rio Verde é um barramento em 230 kV e com alta potência de curto-circuito, o qual também está interligado ao sistema de Furnas. A Figura 45 e a Figura 46 ilustram a potência complexa que flui pelo transformador de Rondonópolis na condição pré e durante a falta. É importante observar que a potência reativa tende a mudar o seu sentido de fluxo, de jusante para montante para suprir a falta em F5, entretanto com valor muito pequeno, próximo de zero.

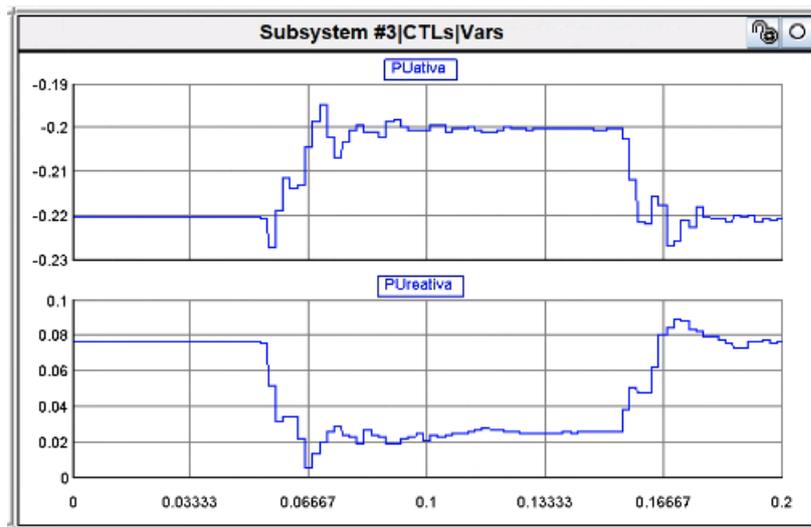


Figura 45 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas subcarregados com SVCs

Nos dois cenários avaliados, com e sem SVC, é possível verificar que tanto a potência ativa como a reativa sofreram pequena variação, o que demonstra a robustez do barramento e a pouca influência dos SVCs instalados para falta em F5.

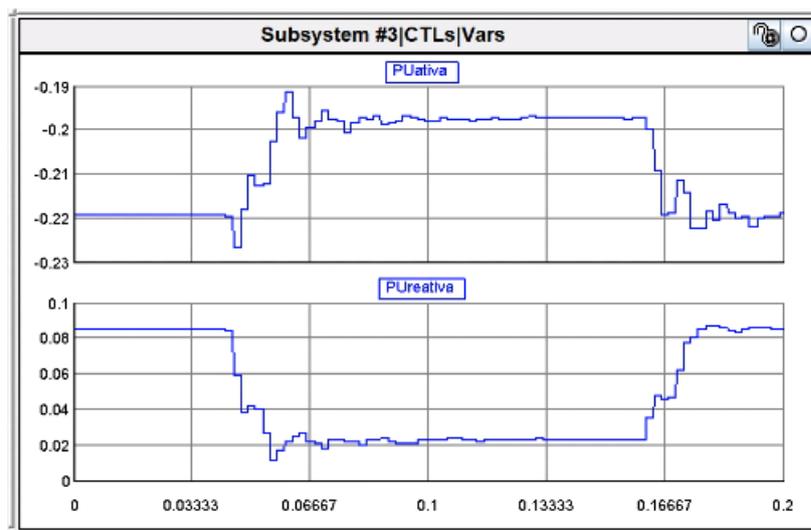


Figura 46 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas subcarregados sem SVCs

É possível concluir que a potência complexa comportou-se de maneira esperada na presença de curto-circuito porém, como não houve inversão do sentido do fluxo de potência o localizador M2 não teve êxito.

4.4.1.2 Caso para faltas Fase-fase-terra

a) Sorriso (F6) – Sinop 1 (M4)

Nesse cenário, o localizador não se comportou de forma adequada sem a presença de SVC. Nessa condição, o sistema exporta potência reativa de jusante para montante através do transformador instalado em Sinop 1, como é possível observar pela Figura 47 o seu valor negativo antes da falta. Durante o curto, o fluxo de reativo muda de sentido, ao contrário do esperado e o localizador não identifica corretamente a falta em F6.

Quanto ao cenário com SVC, ele consome o excesso de reativo no sistema elétrico a jusante de M4 e quase nenhuma dessa potência é transferida pelo transformador, como ilustra a Figura 48. Neste caso é possível observar que o SVC contribui positivamente para o êxito do localizador.

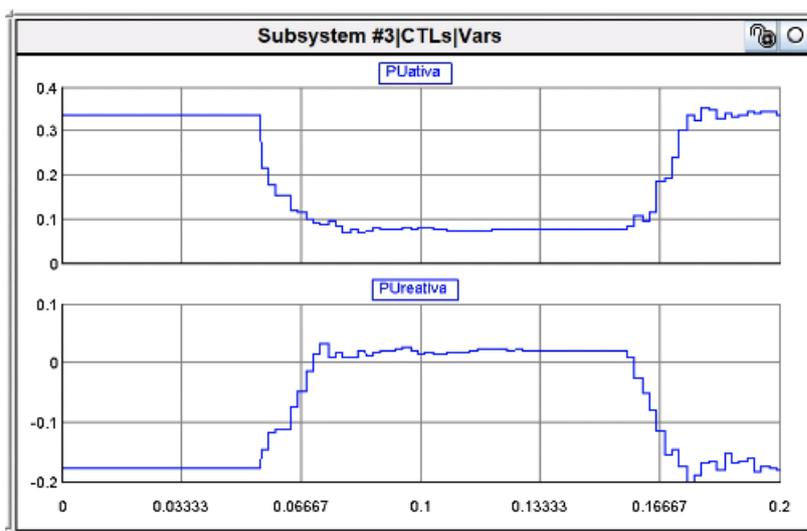


Figura 47 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas subcarregados sem SVCs

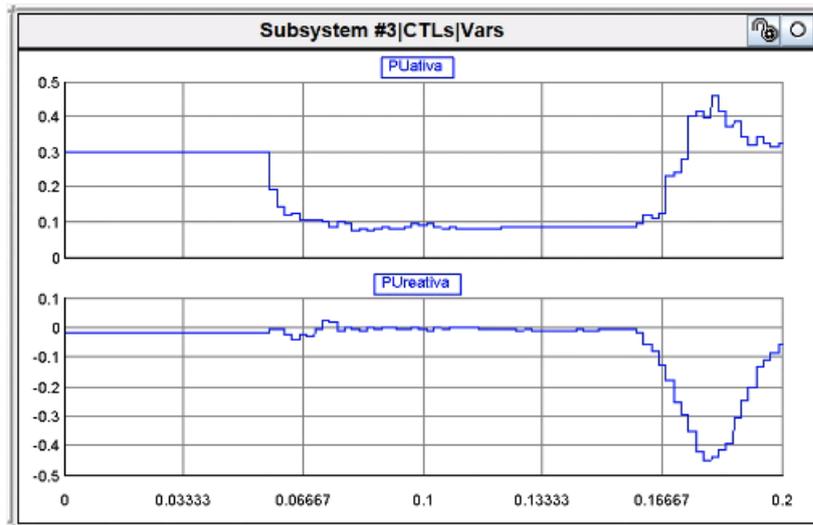


Figura 48 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas subcarregados com SVCs

4.4.1.3 Caso para faltas Trifásicas à terra

a) Sorriso (F6) – Sinop 1 (M4)

Com o auxílio da Figura 48, observa-se que o fluxo potência reativa é praticamente nulo nos terminais do transformador de fronteira e qualquer variação do reativo durante o AMT na rede pode comprometer a correta localização do medidor. Esse caso ocorre para faltas trifásicas em F6, pois de acordo com a Figura 49, a potência reativa flui de jusante para montante para alimentar a falta. Observa-se uma pequena variação do fluxo de reativo, inclusive com inversão de sentido, levando M4 a indicar que a falta ocorre a jusante, como ilustra a Figura 50.

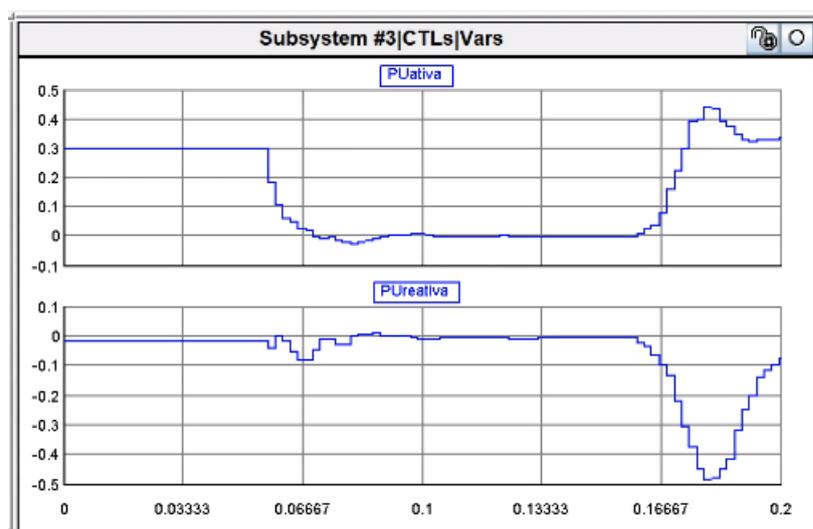


Figura 49 - Potência complexa para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas subcarregados com SVCs

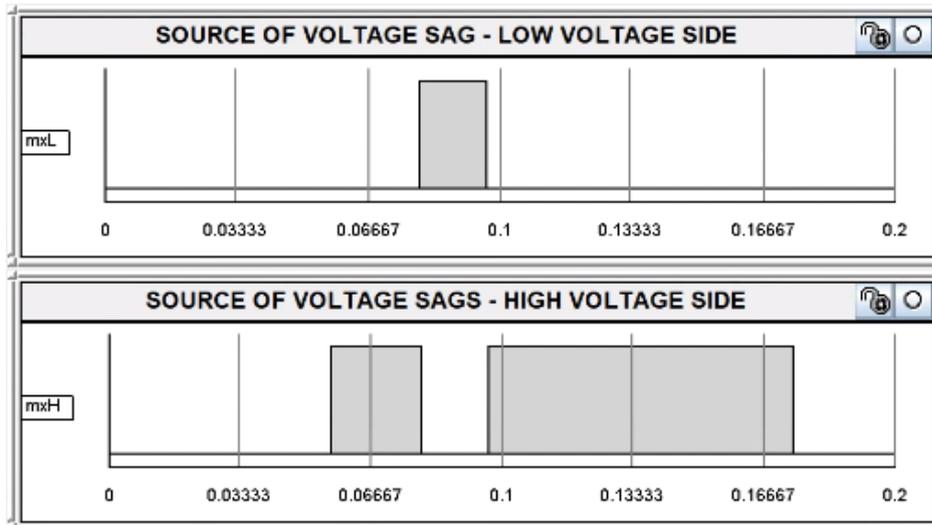


Figura 50 - Localização para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas subcarregados com SVCs

Para esses casos, é conveniente aprimorar o algoritmo de tratamento dos dados, pois como visto na Figura 50, durante a maior parte do curto-circuito, M4 indicou o lado correto do distúrbio, todavia, uma pequena variação da potência complexa fez que tal falta fosse localizada erroneamente a jusante. Talvez a solução para este problema seja estabelecer um limite mínimo de variação de potência para o localizador indicar a localização. Caso tal limite não seja alcançado, o localizador poderia indicar como resultado: “localização indeterminada”

4.4.2 Sistema elétrico com carga nominal

4.4.2.1 Casos para faltas Fase-terra

a) Canarana (F1) – B.Peixe (M1)

O mesmo comportamento descrito no item 4.4.1.1a acontece para o sistema elétrico operando com carga nominal. A Figura 51 ilustra a dinâmica da potência complexa registrada, mostrando novamente a influência do SVC no processo de localização de faltas em sistemas radiais quando o compensador estático está instalado entre o medidor e o ponto de ocorrência do curto-circuito

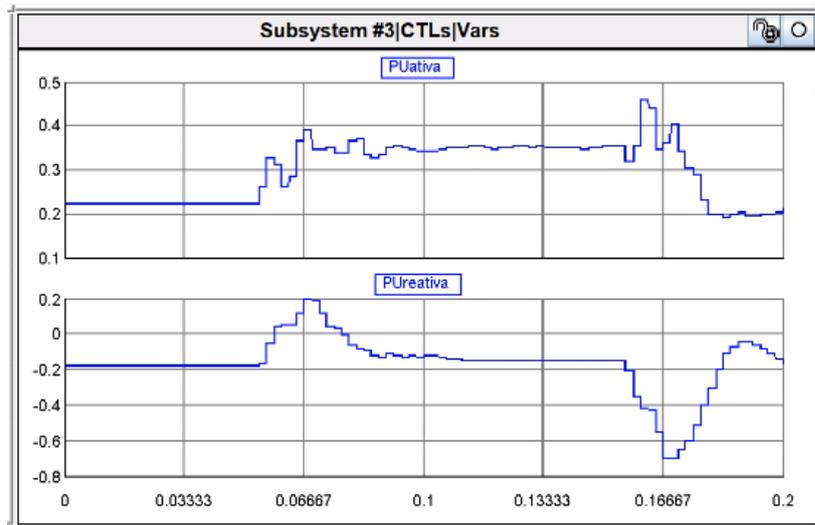


Figura 51 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas com carga nominal e SVCs

b) Rio verde (F5) – Rondonópolis (M2)

O mesmo comportamento descrito no item 4.4.1.1b acontece no sistema elétrico operando na condição de carregamento nominal. A Figura 52 e Figura 53 ilustram o comportamento da potência complexa para o cenário com SVCs e sem o dispositivo, respectivamente. As mesmas análises e conclusões apresentadas no item 4.4.1.1b são aplicáveis aqui.

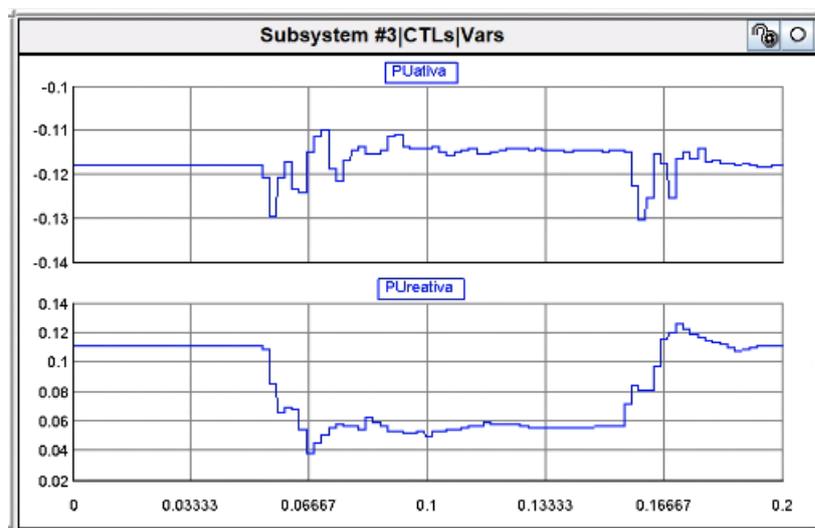


Figura 52 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas com carga nominal e SVCs

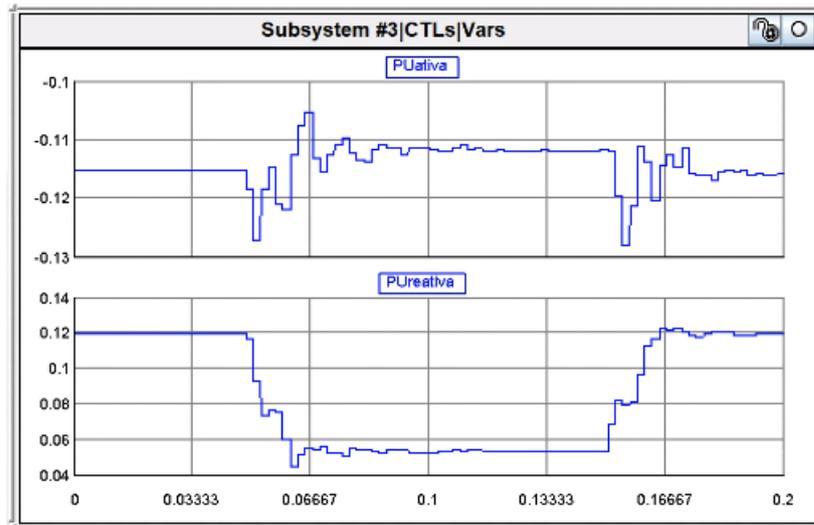


Figura 53 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas com carga nominal e sem SVCs

4.4.2.2 Caso para faltas Fase-fase-terra

a) Sorriso (F6) – Sinop 1 (M4)

A Figura 54 e Figura 55 ilustram o comportamento da potência complexa observado para o cenário sem e com SVCs, respectivamente.

Contata-se que as mesmas análises e conclusões descritas no item 4.4.1.2a são também aplicáveis neste evento.

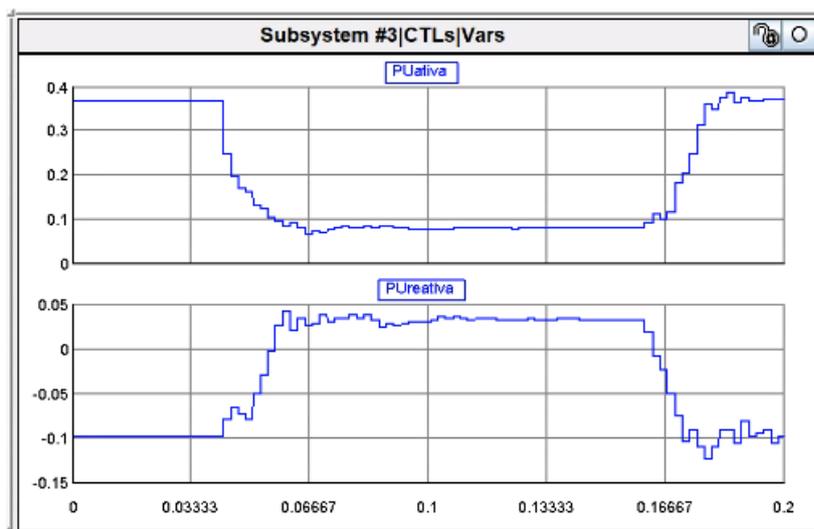


Figura 54 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e sem SVCs

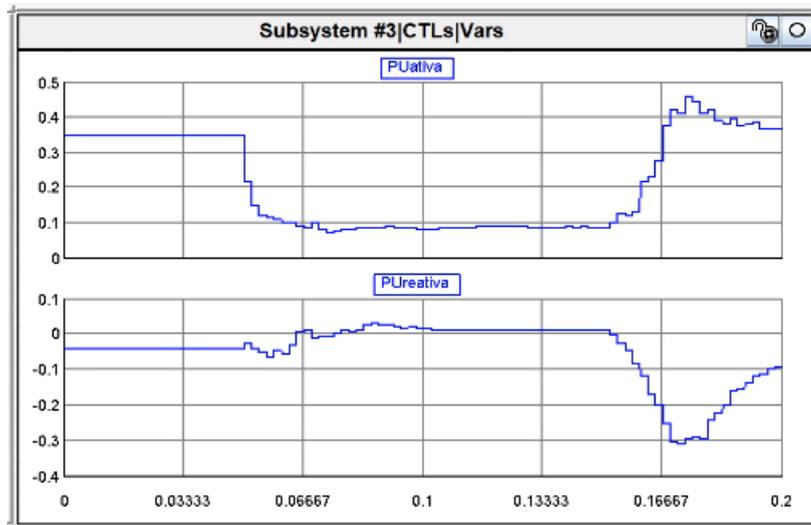


Figura 55 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e SVCs

4.4.2.3 Caso para faltas Trifásicas à terra

a) Sorriso (F6) – Sinop 1 (M4)

Ao contrário do que ocorreu no evento descrito no item 4.4.1.3a, a localização má sucedida ocorreu para o caso sem SVCs. Ao analisar o indicador de local da falta, apresentado na Figura 56, é possível concluir que durante a maior parte do distúrbio é indicado que a origem da falta está do lado de alta tensão, de forma correta. No entanto, a variação que ocorre na potência reativa ao cruzar o eixo das abscissas, conforme apresentado na Figura 57, leva M4 a indicar erroneamente que a origem do distúrbio está no lado de baixa tensão.

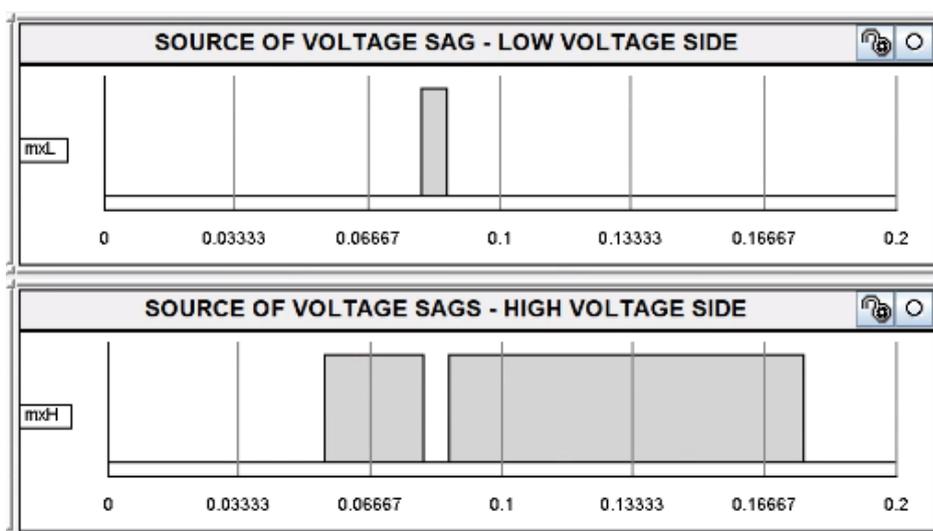


Figura 56 - Localização para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e sem SVCs

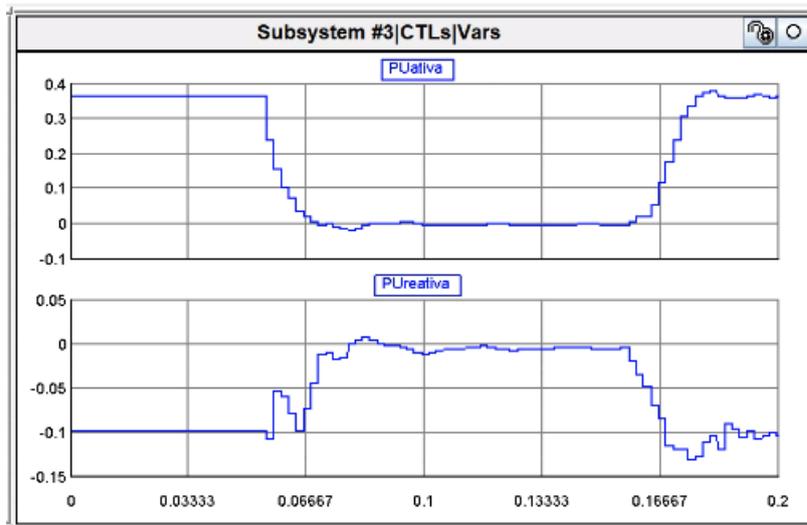


Figura 57 - Potência complexa para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas com carga nominal e sem SVCs

4.4.3 Sistema elétrico sobrecarregado

4.4.3.1 Casos para faltas Fase-terra

- a) Canarana (F1) – B.Peixe (M1)

A Figura 58 ilustra o comportamento da potência complexa para o cenário sobrecarregado com SVCs. De modo geral, observa-se no sistema o mesmo comportamento descrito no item 4.4.1.1a, mostrando novamente a influência do SVC no processo de localização de faltas em sistemas radiais quando o compensador estático está instalado entre o medidor e o ponto de ocorrência do curto.

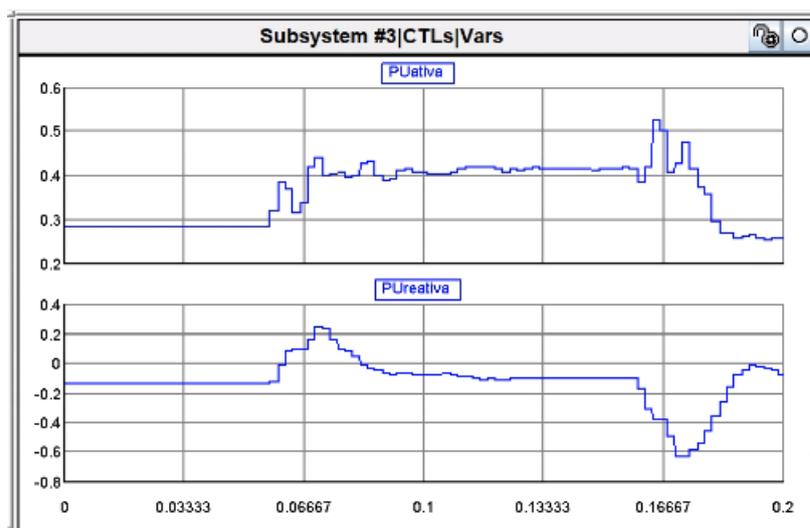


Figura 58 - Potência complexa para faltas FT (F1-M1) em sistemas sobrecarregados com SVCs

- b) Rio Verde (F5) – Rondonópolis (M2)

A mesma dinâmica no item 4.4.1.1b acontece no sistema elétrico sobrecarregado. A Figura 59 e Figura 60 ilustram o comportamento da potência complexa para o cenário com SVCs e sem o dispositivo, respectivamente. As mesmas análises e conclusões apresentadas anteriormente são válidas.

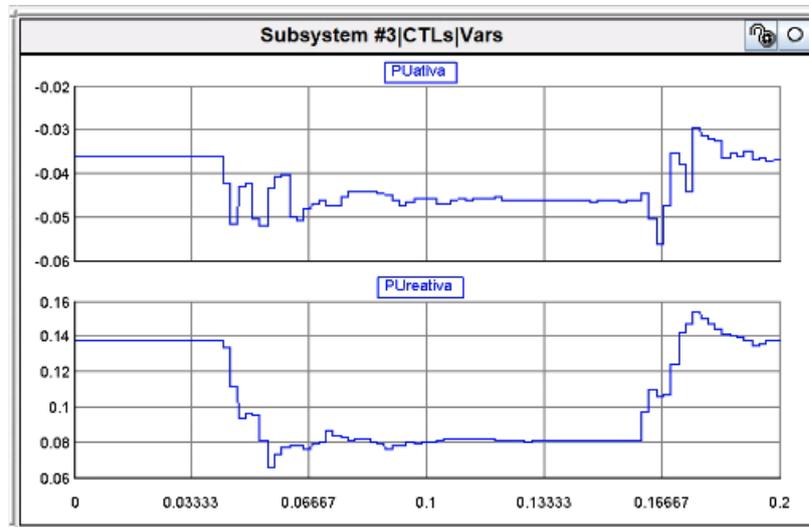


Figura 59 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas sobrecarregados com SVCs

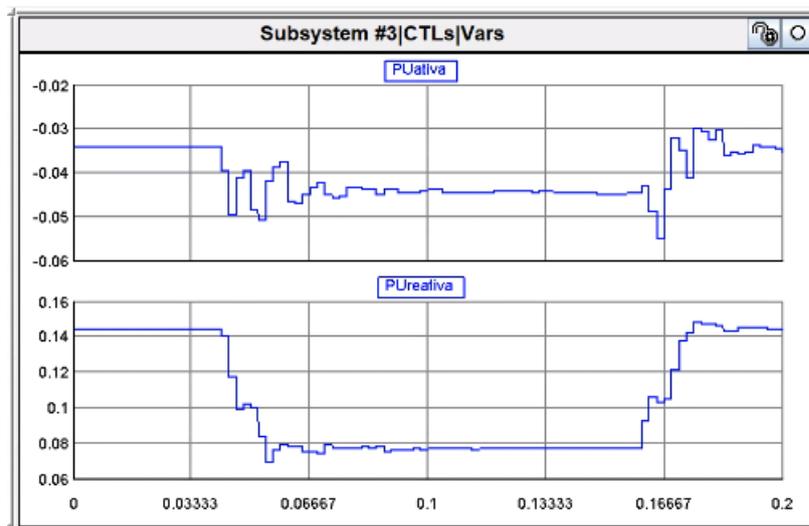


Figura 60 - Potência complexa para faltas FT (F5-M2) em sistemas sobrecarregados sem SVCs

c) Sorriso (F6) – Sinop 1 (M4)

Para o sistema elétrico sobrecarregado, a falta monofásica à terra F6 resulta numa localização errada do medidor M4. Como ilustra a Figura 61, contrariando as expectativas, a falta em F6 promove o aumento da potência reativa que flui pelos terminais do transformador, com sentido de montante para jusante, pois o distúrbio encontra-se do lado de alta tensão.

De acordo com a Figura 62, para este evento, o SVC faz com que localizador indique de maneira correta a localização da falta.

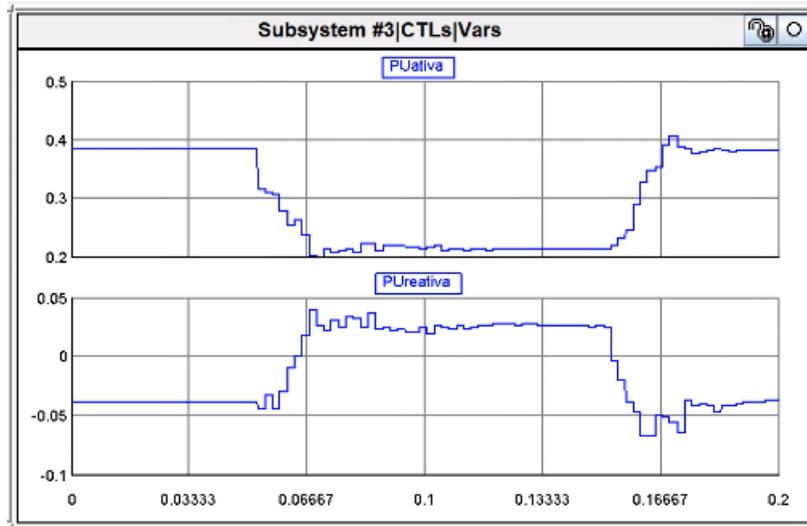


Figura 61 - Potência complexa para faltas FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs

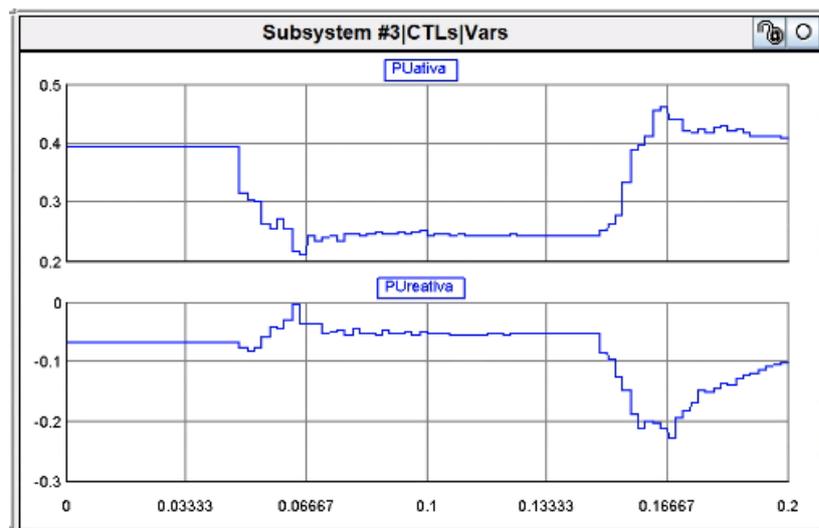


Figura 62 - Potência complexa para faltas FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados com SVCs

4.4.3.2 Caso para faltas Fase-fase-terra

a) Sorriso (F6) – Sinop 1 (M4)

A Figura 63 e Figura 64 exibem o comportamento da potência complexa para o cenário sem e com SVCs, respectivamente. Em ambos os casos M4 erra na indicação da localização da falta em F6.

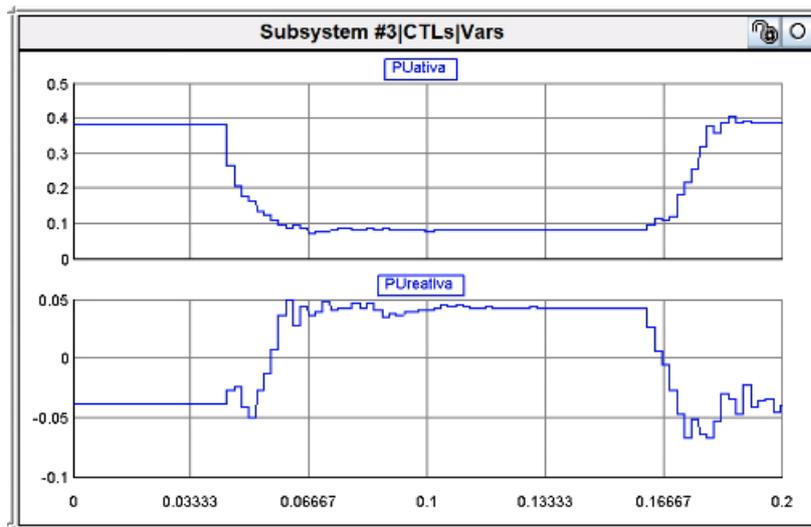


Figura 63 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs

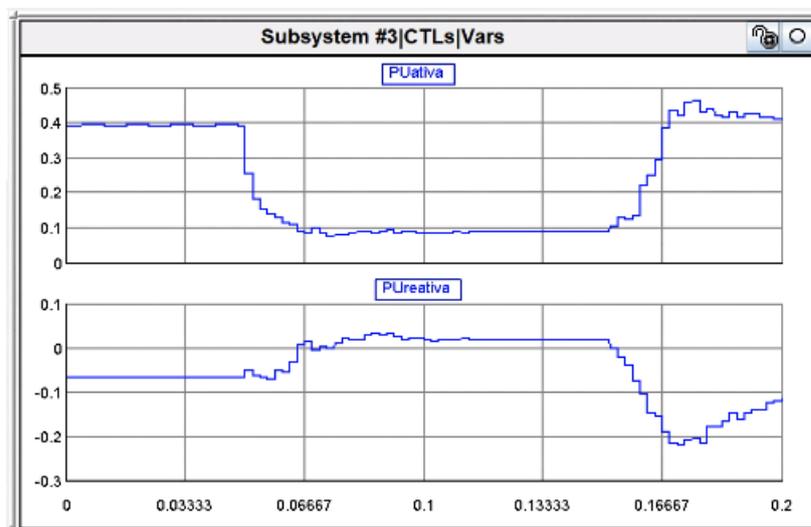


Figura 64 - Potência complexa para faltas FFT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados com SVCs

4.4.3.3 Caso para faltas Trifásicas à terra

a) Sorriso (F6) – Sinop 1 (M4)

A Figura 65 ilustra a localização errada indicada pelo medidor M4 e a Figura 66 apresenta o comportamento da potência complexa observada. É possível concluir que durante a maior parte do distúrbio é indicado corretamente que a origem da falta está do lado de alta tensão. No entanto, a variação que ocorre na potência reativa ao cruzar o eixo das abscissas, como ocorre na Figura 57, leva M4 a indicar erroneamente que a origem do distúrbio está no lado de baixa tensão.

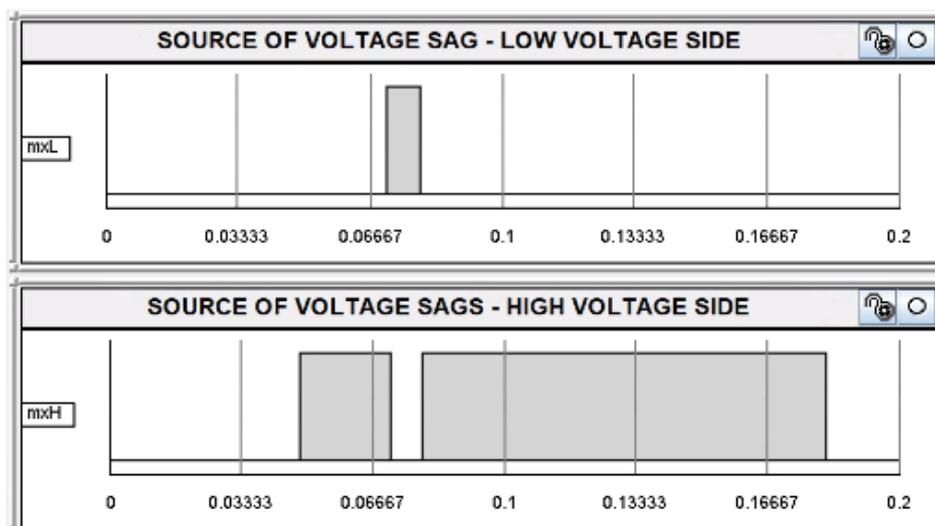


Figura 65 - Localização para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs

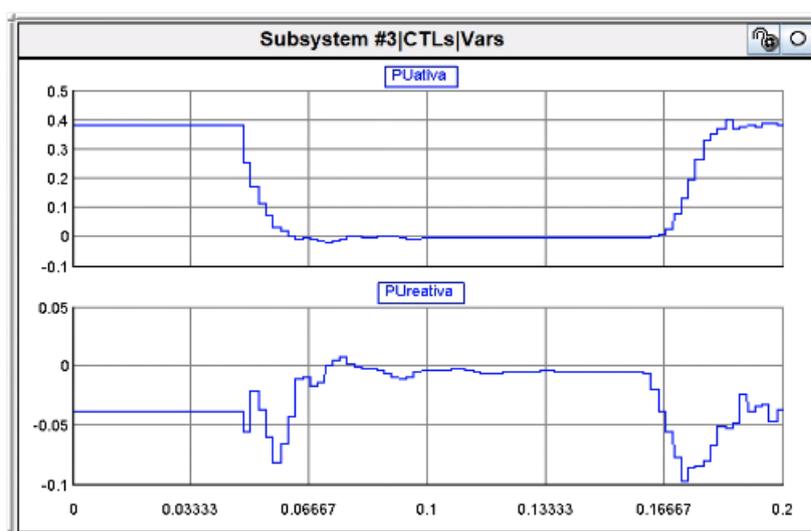


Figura 66 - Potência complexa para faltas 3FT (F6-M4) em sistemas sobrecarregados sem SVCs

4.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos durante os testes foram bastante satisfatórios e a Tabela 25 e Figura 67 apresentam isso, com uma taxa superior a 83% de acerto em todos os testes e alcançando valores próximos a 98%, como ocorre para as faltas FFT e 3FT, em sistemas com cargas nominais na presença de SVCs. Com essas informações, conclui-se que o localizador de AMTs comportou-se como esperado e possibilita uma ótima alternativa no tema atribuição de responsabilidades pela ocorrência de AMTs e seus efeitos.

Tabela 25 - Taxa de acerto dos Localizadores de AMTs

		Característica do Sistema Elétrico			
		Subcarregado	Nominal	Sobrecarregado	Média
Sem SVC	FT	86,67%	90,91%	88,24%	88,61%
	FFT	92,50%	95,00%	92,86%	93,45%
	3FT	92,50%	92,68%	92,86%	92,68%
Com SVC	FT	84,85%	83,33%	87,50%	85,23%
	FFT	90,48%	97,44%	94,87%	94,26%
	3FT	85,37%	97,30%	95,00%	92,56%

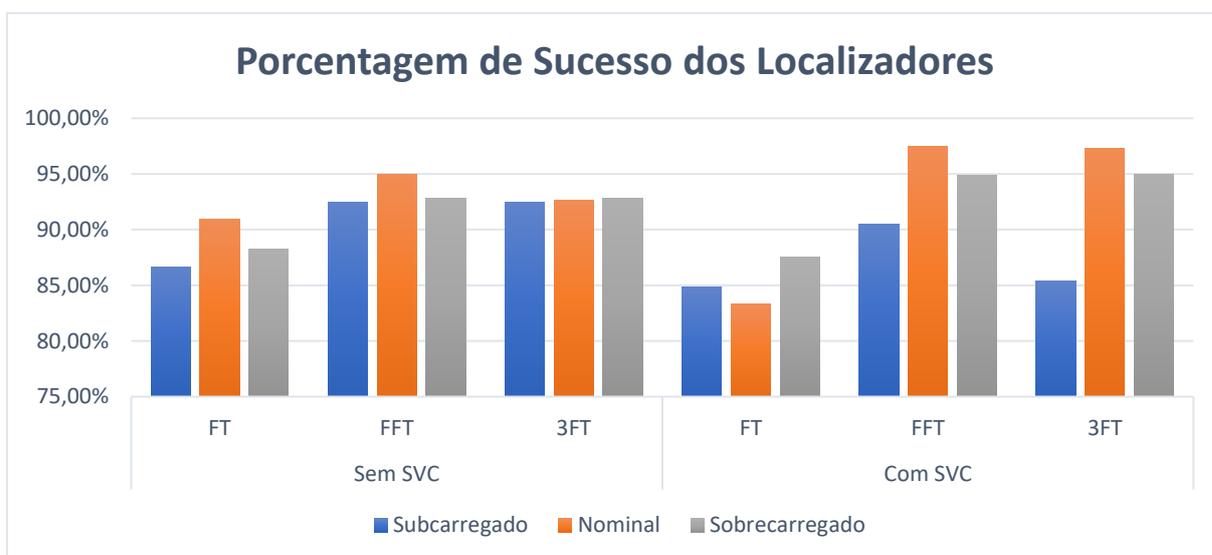


Figura 67 - Porcentagem de acerto dos localizadores de AMTs

A Tabela 26 apresenta a variação da taxa de acerto dos localizadores como base nos casos sem SVC. É possível destacar que os casos com carga leve resultam numa menor percentagem de acerto na presença de SVC para todos os tipos de faltas. Entretanto, para os casos de carga média e pesada, exceto para faltas monofásicas, os localizadores tiveram melhor desempenho quando com SVC..

Tabela 26 - Variação da taxa de acerto na presença de SVCs

Faltas	Com SVC			
	Leve	Média	Pesada	Erro Médio
FT	-2,10%	-8,34%	-0,84%	3,76%
2F	-2,18%	2,57%	2,16%	2,31%
3FT	-10,14%	4,98%	2,30%	5,81%

Outro ponto a destacar foi a mudança dos níveis de tensão durante as faltas com a presença dos SVCs. De caso a caso, ora o sistema apresentava um número maior, ora um número inferior de AMTs, comparado com os casos sem os SVCs. A

Tabela 27 mostra o número de afundamentos registrados nos casos simulados no RTDS.

Tabela 27 - Ocorrência de AMTs por casos simulados

Faltas	Sem SVC			Com SVC			Variação do No de AMTs		
	Leve	Média	Pesada	Leve	Média	Pesada	Leve	Média	Pesada
FT	30	33	34	33	30	32	3	-3	-2
2F	40	40	42	42	30	39	2	-10	-3
3FT	40	41	42	41	37	40	1	-4	-2

Essa variação ocorre principalmente em decorrência dos níveis de tensão em regime permanente. A presença do SVC faz com que o barramento onde está instalado permaneça com a tensão de 1 p.u. em regime permanente, e modifica a tensão nas barras adjacentes. Como o sistema elétrico possui, no caso para cargas leves, tensões mais elevadas, o SVC trabalha a maior parte do tempo consumindo reativos do sistema e na presença de uma falta, a variação do estado do SVC pode atrasar por alguns ciclos e nesses casos o AMT ocorre.

O processo oposto ocorre para sistemas com cargas nominais e altas, pois o SVC incrementa os níveis de tensões naqueles barramentos que estavam com subtensões e passíveis de sofrerem um AMT durante as faltas. Nesses casos, pela tensão estar mais distante de um afundamento, o SVC diminui os casos de AMTs.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao localizador de AMTs e como ele pode auxiliar na atribuição de responsabilidades para os agentes causadores desse distúrbio.

No capítulo 2 foram apresentados conceitos técnicos necessários à compreensão dessa pesquisa, como as faltas interferem nos níveis de tensão e como esses são classificados atualmente por normativas. Posteriormente, foi feita uma revisão sobre os algoritmos de localização de AMTs e finalmente, foram expostos os conceitos principais relativos aos SVCs, com detalhes de sua configuração e operação.

Neste trabalho, foram utilizados vários procedimentos na análise de desempenho do localizador de AMTs proposto em [5], considerando a inserção de SVCs. Tal localizador utiliza um algoritmo baseado na variação do fluxo de potência para identificação da região (a montante ou a jusante) onde ocorreu a falta que ocasionou o AMT detectado

No capítulo 3 foi apresentado os componentes elétricos utilizados na modelagem com a interface do RTDS. Foi possível apresentar em conjunto, a configuração elétrica e lógica do localizador de AMTs e do SVC.

O sistema elétrico utilizado como caso teste no capítulo 4 possui considerável complexibilidade, com vários quilômetros de linhas aéreas, transformadores com diversos carregamentos, algumas unidades geradoras, capacitores e reatores *shunt*, e algumas fontes equivalentes, as quais simulam interligações com outros sistemas. Tal malha elétrica foi utilizada para explorar ao máximo a potencialidade do localizador de AMTs e ao mesmo tempo foi utilizado novos cenários de perfis de carga juntamente com a inserção de SVCs para avaliar o desempenho do localizador desenvolvido em [5].

Ao final do trabalho, conclui-se que os resultados obtidos foram promissores, com bom percentual de acertos na indicação do lado da falta. O cenário verificado com a menor taxa foi de 83,33% para faltas à terra. A melhor taxa de acerto foi de

97,44% no cenário com faltas bifásicas à terra, modelado pelo sistema elétrico com carga nominal e com SVC. As faltas monofásicas sensibilizaram em menor índice os medidores e foram as que geraram os casos mais complexos de compreensão. As faltas fase terra, na maioria dos casos, interferem menos no fluxo de potência durante o distúrbio.

Alguns pontos merecem atenção e serão detalhados na sequência:

- Em sistemas elétricos radiais, com o SVC instalado entre o ponto de monitoramento e a falta, o fluxo de potência é modificado devido a injeção de potência reativa pelo compensador durante o distúrbio. Esses eventos podem causar falha na localização conforme verificado no desenvolvimento desta pesquisa;
- Nos casos em a potência reativa que flui pelo transformador de fronteira durante distúrbios é ínfima, pequenas variações do fluxo de reativo, inclusive com inversão de sentido, podem resultar em erro na localização da falta;
- Observou-se que a inserção de SVCs resultou num erro médio de localização baixo, de 3,96 %, tomando como referência a condição original do sistema sem SVCs;
- Verificou-se também que o tipo de falta, o perfil de carga, e a inserção do SVC, de forma combinada, interferem no desempenho do localizador, caso a caso, ora a favor ora contra.

Finalizando, para a avaliação completa do localizador de AMTs é necessário testá-lo em outros sistemas, com diversificados dispositivos elétricos de compensação de reativos e fontes de geração. Contudo, observou-se a taxa de acerto média obtida é adequada com SVCs é de 90,68%, com o potencial de ainda ser aumentada a partir da implementação de melhorias no algoritmo de localização.

5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Outros trabalhos podem ser desenvolvidos no âmbito do tema localizador de AMTs. Assim, para a continuidade desse trabalho são listados na sequência alguns tópicos que poderão ser desenvolvidos:

- Realizar novos testes considerando novas formas de modelagem da carga, como: potência constante e corrente constante;

-
- Teste do algoritmo de localização em sistema de distribuição suprindo sistemas industriais, onde há uma grande inserção de motores de indução trifásicos e inversores de frequência;
 - Implementar melhorias no algoritmo de localização, como por exemplo, estabelecer um limite mínimo de variação de potência reativa para que o localizador possa indicar a localização. Caso tal critério não seja alcançado, o localizador poderia soltar como resultado “localização indeterminada”.
 - Desenvolver o protótipo do localizador de AMTs e testá-lo no RTDS, por intermédio do HIL (*hardware in the loop*);
 - Instalar e testar o protótipo desenvolvido em um sistema elétrico real

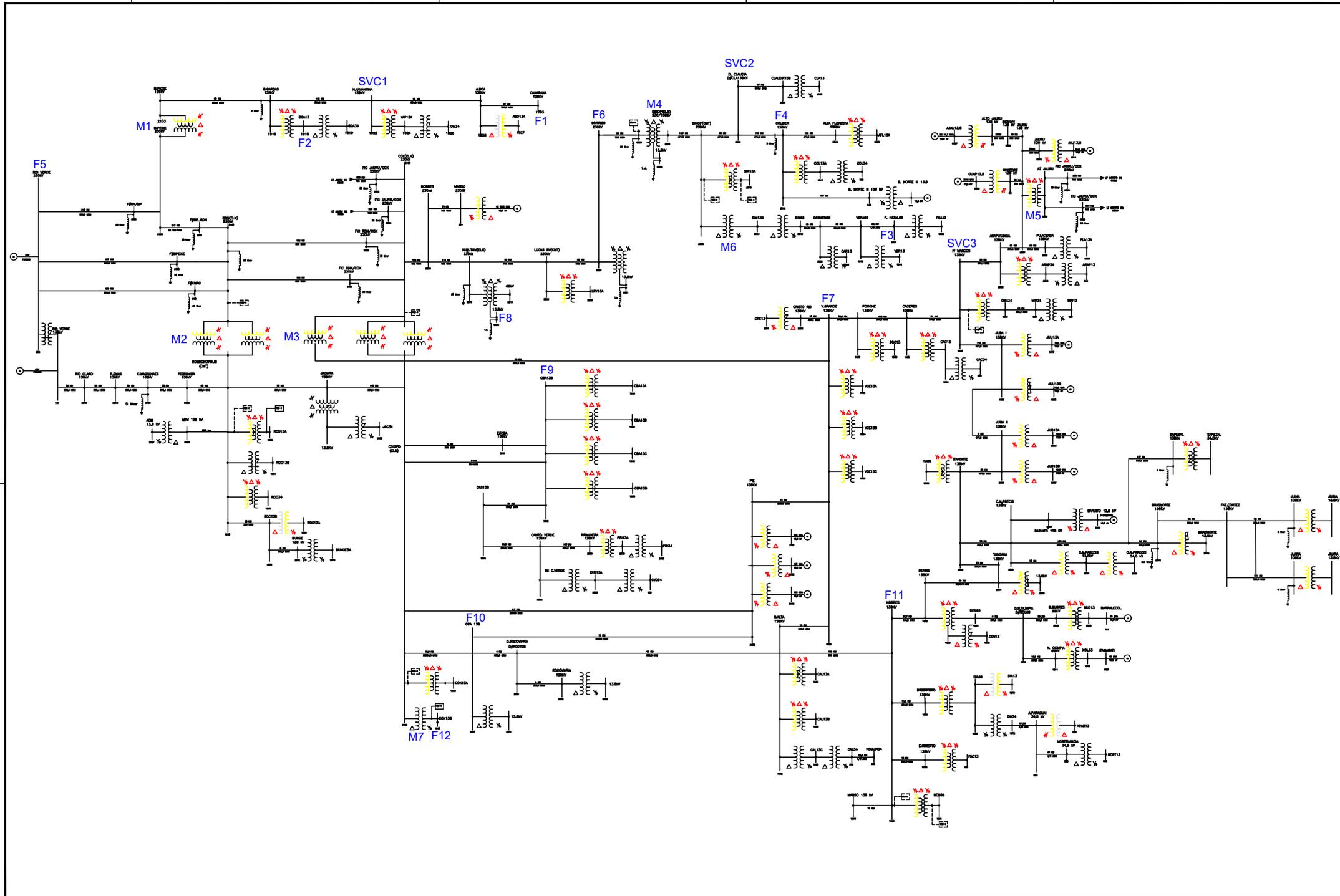
REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty, *Electrical Power System Quality*, McGraw-Hill.
- [2] B. K. Bose, “Global Energy Scenario and Impact of Power Electronics in 21st Century,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 7., pp. 2638 - 2651, Julho 2013.
- [3] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Prodist: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 12,” Brasília, 2021.
- [4] M. Mcgranaghan, D. Mueller e M. Samotyj, “Voltage Sags in Industrial Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 397-403, Março 1993.
- [5] F. O. Passos, *Localizador de Fontes de AMTs baseado nas Medições de Tensões de Fronteira*, Itajubá: UNIFEI, 2015.
- [6] N. G. Hingorani e L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Wiley India, 2011.
- [7] G. Wacker e R. Billinton, “Customer cost of electric service interruptions,” *Proceedings of the IEEE*, pp. 919-930, Julho 1989.
- [8] IEEE, “IEEE Std 1159-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” Nova York, 2019.
- [9] IEC, “IEC 61000-4-11 TEST Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests,” Switzerland, 2004.
- [10] ONS, “Procedimentos de Rede - Submódulo 9.7: Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica,” Brasília, 2021.
- [11] M. V. d. Costa, *Uma Contribuição à Regulação das Variações de Tensão de Curta Duração. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)*, Itajubá: UNIFEI, 2018.
- [12] IEEE, “IEEE Std 1564-2014: IEEE Guide for Voltage Sag Indices,” Nova York, 2014.
- [13] J. R. M. Jr., “Tutorial: Agregação de Eventos de Variação de Tensão de Curta Duração, Revisão 4,” Uberlândia, 2017.
- [14] M. H. Bollen, I. Y. Gu, P. G. Axelberg e E. Styvaktakis, “Classification of Underlying Causes of Power Quality Disturbances: Deterministic versus Statistical Methods,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, p. 17, 2007.
- [15] J. J. Grainger e W. D. Stevenson Jr., *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1994.

- [16] M. H. Bollen e D. J. Lawrence, “Characteristics of Fault Currents on Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Janeiro 1984.
- [17] L. V. Cunha, *Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão*, Belo Horizonte: UFMG, 2010.
- [18] J. V. Milanovic e C. P. Gupta, “Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags-Part I: The Methodology,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, pp. 918-924, Abril 2006.
- [19] G. T. Watanabe, *Uma Contribuição à Análise de Perdas Ocasionadas por Afundamentos Momenâneos de Tensão*, Itajubá: UNIFEI, 2010.
- [20] J. V. Milanovic e C. P. Gupta, “Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags-Part II: Practical Implementation,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, pp. 925-932, Abril 2006.
- [21] J. Merino, Ancillary service provision by RES and DSM connected at distribution level in the future power system, 2016.
- [22] M. d. C. P. Fonseca, *Sistema de apoio à tomada de decisão para atribuição de responsabilidade por perda de qualidade devido à variação de tensão de curta duração*, Belém: UFPA, 2009.
- [23] N. HAMZAH, A. MOHAMED e A. HUSSAIN, “Locating voltage sag source at the point of common coupling in industrial distribution systems,” em *Power Electronics and Drives Systems*, 2005.
- [24] J. Blanco-Solano, J. P. Petit-Suaréz e G. Ordóñez-Plata, “Methodology for relative location of voltage sag source using voltage measurements only,” *DYNA* 82, vol. 82, nº 192, pp. 94-100, Agosto 2015.
- [25] M. M. H. e Y. Mohammadi, “A new current-based method for voltage sag source location using directional overcurrent relay information,” *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, vol. 23, p. 270–281, 2013.
- [26] Y. Tang, R. Wei, K. Chen e Y. Fang, “Voltage sag source identification based on the sign of internal resistance in a “Thevenin's equivalent circuit”,” *Int Trans Electr Energ Syst*, vol. 27, nº 2461, 2017.
- [27] L. Fiaschetti, M. Risso e G. Boroni, “Fault location index for distribution power system restoration using voltage sags,” *Int Trans Electr Energ Syst*, nº 12149, 2020.
- [28] Y. Mohammadi, M. M. H. Moradi e R. L. Chouhy, “A novel method for voltage-sag source location using a robust machine learning approach,” *Electric Power Systems Research*, vol. 145, p. 122–136, 2017.

-
- [29] Y. Mohammadi, M. M. H. e R. L. Chouhy, “Locating the source of voltage sags: Full review, introduction of generalized methods and numerical simulations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 821-844, 2017.
- [30] C. F. P. J. Guasch L., “Symmetrical and unsymmetrical voltage sag effect on induction machine,” *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 19, pp. 774-782, 2004.
- [31] C. L. X. W. Tayjasant T., “A resistance sing-based method for voltage sag source detection,” *IEEE Trans Power Deliv*, vol. 4, n° 20, pp. 2544-51, 2005.
- [32] J. W. Resende, *Análise de sistemas de energia elétrica*, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- [33] R. D. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas*, Rio de Janeiro: LTC/EFEL, 1977.
- [34] J. W. Resende, *Compensadores Estáticos e suas Aplicações*, Uberlândia: UFU.
- [35] H. Andrei, P. C. Andrei, E. Cazacu e M. Stanculescu, *Reactive Power Control in AC Power Systems*, Springer, 2017.
- [36] M. Noroozian e C. Taylor, “Benefits of SVC and STATCOM for Electric Utility Application,” em *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2003.
- [37] J. A. M. Silva, *Análise comparativa de resultados de simulações de afundamentos de tensão utilizando programas de curto-circuito e de transitórios eletromagnéticos*, Itajubá: UNIFEI, 2004.
- [38] RTDS Technologies, *Power System Manual*, 2003.
- [39] RTDS Technologies, *RSCAD Power System Components Manual*.
- [40] N. S. Nise, *Engenharia de Sistemas de Controle*, Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [41] M. H. J. Bollen, “Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions,” IEEE Press on Power Engineering, Nova York, 2000.
- [42] J. C. de Oliveira, J. R. Cogo e J. P. G. de Abreu, *Transformadores: Teoria e Ensaio*, São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1998.

ANEXO



N.	DATA	REVISÃO	VISTO	NOTAS	REFERÊNCIAS

ELABORAÇÃO		APROVAÇÃO	
PROJ.:		VISTO:	
DES.:		RESP.:	
VERIF.:		DATA:	

CENTRAIS ELÉTRICAS MATOGROSSENSIS S.A.

ESCALA: ORIENT.:

REVISÃO: #

FOLHA: #

Nº DEL. CENAL: 001

W DEL. FOLHA

DIAGRAMA UNIFILAR

CONFIGURAÇÃO: JAN/2006

HOME DO ARQUIVO:
Diagram2003-ctulul.dwg