

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**LOCALIZADOR DA FONTE DE AMTs
BASEADO NAS MEDIÇÕES DE TENSÕES
DE FRONTEIRA**

Frederico Oliveira Passos

Itajubá, MG

2015

Frederico Oliveira Passos

LOCALIZADOR DA FONTE DE AMTs BASEADO NAS MEDIÇÕES DE TENSÕES DE FRONTEIRA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor 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: Paulo Márcio da Silveira

Itajubá, MG

2015

Dedico a todos que amo e contribuíram para o sucesso desse trabalho, em especial para minha mãe Maria Cecília, meu falecido pai Luiz Roberto, minha esposa Amanda, minha irmã Cristiane e todos amigos e familiares que acompanharam essa jornada.

Agradecimentos

A toda minha família, em especial, ao meu falecido pai, Luiz Roberto Passos, minha mãe Maria Cecília Galdino de Oliveira, pela criação, ensinamentos, carinho, confiança e apoio incondicional.

À minha esposa Amanda Corrêa Campos e sua família, pelo amor, apoio incondicional e confiança.

Aos professores José Maria de Carvalho Filho e Paulo Márcio da Silveira, pelo trabalho de orientação, apoio e ensinamentos proporcionados.

Ao professor Marcel Fernando da Costa Parentoni, pela amizade e contribuição para o sucesso desse trabalho.

Ao engenheiro Ricardo Cunha Perez pela contribuição ao trabalho realizado e amizade.

À Universidade Federal de Itajubá, pelo ensino de extrema qualidade oferecido e por me permitir participar como integrante de seu corpo docente.

Ao Cerin – Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes, pela confiança no meu trabalho e pelo suporte estrutural e financeiro.

Aos amigos e colegas professores do Campus Unifei Itabira pelo apoio e incentivo.

A todos meus familiares, meus avós, tios, tias e primos pela torcida.

Aos amigos de Volta Redonda e Itajubá, pela, sempre sincera e verdadeira, amizade.

À CAPES pelo apoio financeiro.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”
(Ayrton Senna)

Resumo

Esta tese propõe um novo método capaz de localizar a fonte do afundamento momentâneo de tensão num sistema elétrico baseado na estimativa do fluxo de potência na fronteira entre sistemas elétricos. O método proposto é uma solução adequada para localizar o lado da fonte do afundamento momentâneo de tensão, simétrico ou assimétrico, através de um conjunto de lógicas condicionais. Para tal, utilizam-se as tensões de fase em ambos os lados do transformador instalado na fronteira de interesse, bem como as informações dos dados de placa do transformador para estimar o fluxo de potência. O conjunto de lógicas condicionais é desenvolvido para analisar de forma qualitativa o fluxo de potência considerando os comportamentos típicos dos sistemas elétricos durante o afundamento momentâneo de tensão. O desempenho do método desenvolvido é avaliado através de casos simulados de um sistema elétrico de transmissão e distribuição e um sistema elétrico industrial. Através de casos simulados, uma análise comparativa foi realizada entre o método da impedância vista (o melhor dentre os apresentados na literatura) e o método desenvolvido. Os sistemas simulados têm geração distribuída, cargas ativas e fluxo de potência fluindo em todas as direções. A novidade proposta é justificada pela robustez e simplicidade. Análises teóricas e simulações confirmaram sua eficácia.

Palavras-chave: AMT. Localização de Falta. Medição de Fronteira. QEE

Abstract

This thesis proposes a new method capable of locating the voltage sag source side in the power grid based on the estimated power flow behavior at the interconnection point. The proposed method is a suitable approach to locate the voltage sag source, symmetrical or asymmetrical, by a set of conditionals logics. For such, the phase voltages at both sides of a transformer installed at the interested interconnection point and the plate data information are used to obtain the estimated power flow. The set of conditionals logics is developed to analyze the power flow by a qualitative way, considering the typical electrical systems behaviors during a voltage sag. The performance of the developed method is assessed through a simulated case study in a utility and a industrial systems. Through the simulated cases, a comparative analysis was performed between the seen impedance method (the best among those presented in the literature) and the method developed. The simulated systems have a distributed generation, active loads and power flowing at any directions. The novelty proposal is justified by the simplicity and robustness. Theoretical analysis and simulation have verified its effectiveness.

Keywords: Fault Location. Power Quality. Voltage Measurement. Voltage Sag.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração de conexão de fronteira em sistema elétrico radial típico. . .	25
Figura 2 – Relação entre AMT e salto de ângulo para faltas na concessionária ou dentro do sistema elétrico industrial.	26
Figura 3 – Circuito elétrico básico representando a medição simultânea em ambos barramentos (primário e secundário).	27
Figura 4 – Fluxograma do método de localização da fonte do AMT.	40
Figura 5 – Esboço de estrutura de medição necessária.	41
Figura 6 – Exemplo de medição das tensões no primário do transformador e detecção do AMT.	42
Figura 7 – Modelo de transformador em componentes simétricos utilizado para a estimativa das correntes em componentes simétricos	43
Figura 8 – Lugar geométrico da potência complexa - Regiões de operação	46
Figura 9 – Lugar geométrico da potência complexa - Regiões de operação típicas .	47
Figura 10 – Conceito geral do algoritmo de localização da fonte do AMT.	47
Figura 11 – Comportamento típico da potência complexa durante o AMT - (a) e (b) - Tensões nos terminais primário e secundário do Transformador, respectivamente, (c) - Comportamento da Potência Complexa ao longo do tempo, (d) - Comportamento do Lugar geométrico da Potência Complexa ao longo do tempo	49
Figura 12 – Possíveis comportamentos do lugar geométrico da potência complexa durante o AMT para sistemas com fontes ativas em ambos os lados da fronteira.	50
Figura 13 – Comportamento típico da potência complexa durante o AMT para falta a montante - (a) e (b) - Tensões nos terminais primário e secundário do Transformador, respectivamente, (c) - Comportamento da Potência Complexa ao longo do tempo, (d) - Comportamento do Lugar geométrico da Potência Complexa ao longo do tempo.	50
Figura 14 – Circuito elétrico básico com apenas fonte no lado a montante.	51
Figura 15 – Possíveis comportamentos do lugar geométrico da potência complexa durante o AMT para sistemas com fonte em apenas um dos lados da fronteira.	51
Figura 16 – Relação entre grandezas e equações do algoritmo de localização da fonte do AMT desenvolvido.	55
Figura 17 – Possibilidades de comportamento esperado para faltas localizadas a montante da fronteira.	56

Figura 18 – Possibilidades de comportamento esperado para faltas localizadas a jusante da fronteira.	57
Figura 19 – Fluxograma alternativo para o método de localização da fonte do AMT, considerando medições de Tensões e Corrente Disponíveis.	58
Figura 20 – Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição Real Modelado.	62
Figura 21 – Topologia do Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição Modelado.	63
Figura 22 – Tensões monitoradas ao longo do evento com a indicação do instante pré-AMT e do instante AMT - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	65
Figura 23 – Comportamento dos fasores de corrente em componentes simétricos estimados durante o evento - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	66
Figura 24 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	66
Figura 25 – Detecção do AMT nos terminais do transformador na fronteira e agregação de fase - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	67
Figura 26 – Comportamento das variáveis booleanas conforme equações (3.5) à (3.11) - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	68
Figura 27 – Resumo - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	69
Figura 28 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F2 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M1.	72
Figura 29 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F8 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M2.	73
Figura 30 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F4 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M2.	73
Figura 31 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F11 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	74
Figura 32 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F12 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.	74
Figura 33 – Comportamento das tensões monitoradas no monitor M5 durante falta trifásica em F11 ($R_f=10\Omega$).	75
Figura 34 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F11 ($R_f=10\Omega$) registrada pelo monitor M5.	76
Figura 35 – Resumo - Falta trifásica em F10 ($R_f=40\Omega$) registrada pelo monitor M5.	77
Figura 36 – Resumo - Falta monofásica em F10 ($R_f=20\Omega$) registrada pelo monitor M5.	78

Figura 37 – Resultados do método de localização da fonte do AMT baseado na impedância vista modificada - índice da variação da impedância vista e índice da variação do ângulo da impedância vista.	79
Figura 38 – Comparação entre os desempenhos obtidos pelo método desenvolvido e o método baseado na impedância vista modificada.	80
Figura 39 – Sistema Elétrico Industrial Modelado.	83
Figura 40 – Topologia do Sistema Elétrico Industrial Modelado.	83
Figura 41 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F1 registrada pelo monitor M1.	86
Figura 42 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F5 registrada pelo monitor M1.	86
Figura 43 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F1 registrada pelo monitor M2.	87
Figura 44 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F8 registrada pelo monitor M2.	88
Figura 45 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta monofásica em F1 registrada pelo monitor M2.	88
Figura 46 – Resultados do método de localização da fonte do AMT baseado na impedância vista modificada - índice da variação da impedância vista e índice da variação do ângulo da impedância vista - Sistema Elétrico Industrial	90
Figura 47 – Comparação entre os desempenhos obtidos pelo método desenvolvido e o método baseado na impedância vista modificada - Sistema Elétrico Industrial.	91

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela resumo das vantagens e desvantagens dos métodos de localização baseados em medição pontual de tensão e corrente.	36
Tabela 2 – Correta Localização da Fonte do AMT no Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição	63
Tabela 3 – Dados dos Transformadores de Potência com medidores instalados. . .	63
Tabela 4 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta trifásica simulada.	70
Tabela 5 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta monofásica simulada.	70
Tabela 6 – Taxa de sucesso de localização da fonte do AMT para faltas trifásicas.	71
Tabela 7 – Taxa de sucesso de localização da fonte do AMT para faltas monofásicas.	71
Tabela 8 – Correta Localização da Fonte do AMT no Sistema Elétrico Industrial .	84
Tabela 9 – Dados dos Transformadores de Potência com medidores instalados. . .	84
Tabela 10 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta trifásica simulada - Sistema Elétrico Industrial.	84
Tabela 11 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta monofásica simulada - Sistema Elétrico Industrial.	85
Tabela 12 – Taxa de sucesso na localização da fonte do AMT em cada monitor - faltas trifásicas - Sistema Elétrico Industrial.	85
Tabela 13 – Taxa de sucesso na localização da fonte do AMT em cada monitor - faltas monofásicas sólidas - Sistema Elétrico Industrial.	85

Lista de abreviaturas e siglas

ABRACE	Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e Consumidores Livres
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
A/D	Conversor Analógico-Digital
COMTRADE	<i>Common format for Transient Data Exchange for power systems</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DT	<i>Decision Tree</i>
dq0	Coordenadas ortogonais de <i>Park</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
FAU	Fundação de Apoio Universitário
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
MIT	Motor de Indução Trifásico
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>
MPCA	<i>Multiway Principal Component Analysis</i>
MRA	<i>Monitor Reach Area</i>
MT	Média Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>

PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
pré-AMT	Instante de tempo anterior ao AMT
PRODIST	Procedimentos de Rede
pu	Por Unidade
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RBF	<i>Radial Basic Function</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SRD	Superintendência de Regulação de Serviços de Distribuição
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
TP	Transformador de Potencial
.atp	Extensão de arquivo do ATP
.bat	Extensão de arquivo do Sistema Operacional <i>Windows</i>
.pl4	Extensão de arquivo de simulação do ATP

Lista de símbolos

$\Delta\angle Z$	Índice da variação do ângulo da impedância vista
$\Delta Z $	Índice da variação da impedância vista
Dy	Conexão Delta - Estrela
kV	Unidade de Tensão (Quilovolt)
km	Unidade de Comprimento (Quilômetro)
ms	Unidade de Tempo (Milissegundo)
MVA	Unidade de Potência Complexa (Mega-Volt Ampere)
MW	Unidade de Potência Ativa (Megawatt)
Ω	Unidade de Resistência Elétrica (Ohms)
R_f	Resistência de Falta
S_N	Potência Nominal do Transformador
θ	Defasamento Angular do Transformador
V_P	Tensão Nominal no Primário do Transformador
V_S	Tensão Nominal no Secundário do Transformador
X/R	Relação nominal entre a reatância indutiva e a resistência do transformador
Z_f	Impedância vista durante o AMT
Z_{pre}	Impedância vista antes do AMT
$Z\%$	Impedância Percentual do Transformador
%	Porcentagem
°	Unidade Angular (Graus)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações Iniciais	16
1.2	Contexto do Tema Localização da Fonte do AMT	18
1.3	Principais Contribuições	19
1.4	Estrutura da Tese	19
2	LOCALIZAÇÃO DA FONTE DO AMT - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Considerações Iniciais	21
2.2	Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Sistêmica	21
2.3	Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Pontual de Tensão	24
2.4	Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Pontual de Corrente	28
2.5	Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição de Sinais de Alta Frequência	29
2.6	Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Pontual de Tensão e Corrente	30
2.7	Considerações Finais	34
3	MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DA FONTE DO AMT DESENVOLVIDO	37
3.1	Considerações Iniciais	37
3.2	Visão Geral do Localizador da Fonte do AMT	37
3.3	Elementos que Compõem o Localizador da Fonte do AMT Desenvolvido	39
3.3.1	Medição e Cálculo dos Fasores de Tensão nos Terminais do Transformador de Fronteira	39
3.3.2	Deteção do AMT	41
3.3.3	Transformação dos Fasores em Componentes Simétricos e Estimativa das Correntes que fluem pelo Transformador	43
3.3.4	Estimativa da Potência Complexa que flui pelo Transformador	45
3.3.5	Lugar Geométrico da Potência Complexa que flui pelo Transformador	45
3.3.6	Algoritmo de Localização da Fonte do AMT	46
3.3.6.1	Comportamentos Esperados para o Fluxo de Potência Complexa durante o AMT	47
3.3.6.2	Comportamento do Fluxo de Potência - Equipamentos Específicos e Casos Atípicos	52

3.3.6.3	Conjunto de Lógicas Condicionais	53
3.4	Alternativa para o Método Desenvolvido quando sinais de Tensão e Corrente estão Disponíveis	57
3.5	Considerações Finais	58
4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM SISTEMA ELÉTRICO DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO	60
4.1	Considerações Iniciais	60
4.2	Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição Simulado	60
4.3	Resultados Obtidos pelo Localizador da Fonte do AMT Desenvolvido	70
4.4	Comparação de Desempenho entre o Método Desenvolvido e Método de Impedância Vista Aprimorado	79
4.5	Considerações Finais	80
5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL	82
5.1	Considerações Iniciais	82
5.2	Sistema Elétrico Industrial Modelado	82
5.3	Resultados Obtidos pelo Localizador da Fonte do AMT	84
5.4	Comparação de Resultados com o Localizador baseado no Método de Impedância Vista Aprimorado	89
5.5	Considerações Finais	91
6	CONCLUSÃO	92
6.1	Conclusões Gerais	92
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	95
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS	102

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Os sistemas elétricos são fundamentais para o crescimento econômico de uma nação. A expansão dos sistemas de geração, transmissão e distribuição deve anteceder ao aumento do consumo de energia elétrica pelos diversos setores da sociedade. Melhorias devem ser implementadas buscando-se assegurar maior eficiência energética e melhor qualidade da energia elétrica fornecida.

Pesquisas na área de eletrônica de potência buscam melhorar a eficiência dos sistemas elétricos, assim como viabilizar a utilização de energias renováveis, a exemplo de fazendas eólicas, e possibilitar a inserção de novos tipos de cargas, como os veículos elétricos (POPOVIC-GERBER; FERREIRA; WYK, 2011) e (BLAABJERG et al., 2005). Como consequência, por exemplo, aproximadamente 70% do fluxo de potência nos sistemas elétricos norte americanos fluem por sistemas de eletrônica de potência (BOSE, 2013). Tal realidade implica em outra importante questão, pois sistemas eletrônicos, em geral, são mais sensíveis à distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE) (REID, 1996).

Sabe-se que os estudos sobre a qualidade da energia elétrica estão relacionados aos diversos fenômenos que influenciam na qualidade do sinal de tensão fornecido. Distúrbios como interrupções de fornecimento de energia, variações de tensão de curta duração, distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão, *flicker*, transitórios impulsivos ou oscilatórios, entre outros (DUGAN et al., 2012), são motivos de preocupação para os diversos agentes envolvidos (GOMEZ et al., 2013). O impacto econômico relacionado aos distúrbios de qualidade é um problema real no Brasil (ABRACE, 2014) e no mundo (MELO; CAVALCANTI, 2012). Muitos esforços têm sido dispendidos para medições, análises e diagnósticos dos fenômenos, assim como, para as diversas ações mitigadoras (SRD, 2014).

Pontualmente, no que tange ao foco desse trabalho, destaca-se o fenômeno “Afundamento Momentâneo de Tensão” ou “AMT”, que é caracterizado pela variação de curta duração no valor eficaz da tensão fornecida. Para registro, considera-se AMT quando o valor da tensão eficaz se encontra entre 10% a 90% do valor nominal durante intervalo de tempo que perdure de 0,5 ciclo à 1 minuto em pelo menos uma das fases de um sistema polifásico (IEEE..., 2009). Os AMTs caracterizam-se por se propagarem pelo sistema elétrico e, devido à diversidade dos agentes causadores, suas ocorrências são frequentes. Essas características tornam os AMTs grandes vilões, tanto para as concessionárias de energia elétrica, como para consumidores industriais, sobretudo aqueles com processos

produtivos contínuos.

Uma vez que os AMTs ocorrem devido a excessivos fluxos de potência (ou corrente) no sistema elétrico, podem ser destacados como seus potenciais causadores os curtos-circuitos, energização de transformadores e partidas diretas de motores de grande porte (BOLLEN, 2000). Todavia, no tocante a partida de motores, cada vez mais tem ocorrido a substituição das partidas diretas, por técnicas baseadas em eletrônica de potência, como *Soft Starters* e inversores de frequência. Isto faz das faltas no sistema elétrico as principais causadoras de AMTs, sobretudo no sistema elétrico brasileiro, onde há predominância de redes aéreas de transmissão e distribuição.

Uma falta no sistema elétrico é um evento de natureza estocástica e, por sua vez, depende também das próprias características do sistema elétrico. Por exemplo, sistemas de transmissão são mais susceptíveis às intemperes e, por sua vez, os sistemas industriais são mais suscetíveis a falhas humanas (procedimentos de operação, manutenção e segurança). De fato, ações mitigadoras com foco na causa da falta são possíveis, entretanto difíceis, considerando as inúmeras possibilidades e a aleatoriedade dos motivos. Por isso, na prática, busca-se ações mitigadoras com foco nos efeitos causados pela falta no sistema elétrico, com destaque ao AMT, tema principal deste trabalho.

Estudos recentes apresentam o grande impacto financeiro causado pelos AMTs nos sistemas produtivos e, também, para as concessionárias devido ao não fornecimento de energia ao cliente enquanto o processo permanece parado até o reinício da produção. As perdas podem passar da ordem de 10% da movimentação financeira anual das empresas (VEGUNTA; MILANOVIC, 2011) e (GOSWAMI; GUPTA; SINGH, 2012). Para reduzir as perdas financeiras resultantes de AMTs, existem diversas tecnologias disponíveis para mitigar seus efeitos. Entre as soluções, destacam-se os *Static Var Compensators* (LEE; LEE; LEE, 2010) e (DELFINO; FORNARI; PROCOPIO, 2005) e os *Dynamic Voltage Restores* (RAUF; KHADKIKAR, 2015) e (BABAEI; KANGARLU; SABAH, 2010) e (WANG; VENKATARAMANAN, 2009). Entretanto, o elevado custo de implantação destas soluções não viabiliza, na maioria dos casos, a instalação destes mitigadores, a não ser em casos muito específicos. Dessa forma, as tecnologias citadas para mitigar o AMT ainda não são alternativas viáveis economicamente para a grande maioria dos consumidores.

Considerando que os problemas relacionados à ocorrência de AMTs estão longe de serem resolvidos e que as ações nesse sentido requerem grandes investimentos, disputas entre os agentes envolvidos (concessionárias e consumidores industriais) são comuns. Neste contexto, a localização da fonte dos AMTs ocasionados por faltas no sistema elétrico ganha importância, pois a identificação do agente causador do evento passa ser fundamental no processo de atribuição de responsabilidades.

1.2 Contexto do Tema Localização da Fonte do AMT

A atribuição de responsabilidades na área de AMT não é uma tarefa simples, pois o fenômeno não respeita fronteiras e pode propagar-se para pontos remotos dos sistemas elétricos adjacentes. O conceito de fronteira aqui utilizado pode ser entendido como: (i) separação de sistemas elétricos com níveis de tensão diferentes e pertencentes a um mesmo agente, por exemplo, indústrias com sistemas de alta, média e baixa tensão ou sistema de transmissão e distribuição de propriedade de uma mesma concessionária; (ii) separação entre sistemas com mesmo nível de tensão cujas as propriedades são de agentes distintos, por exemplo, sistemas de transmissão e distribuição de diferentes concessionárias.

Se por um lado, atualmente o AMT é considerado como um grande vilão, por outro, normas e procedimentos para definir a responsabilidade pelos prejuízos causados pelos AMTs ainda são escassas no Brasil (ANEEL, 2015) e no mundo. Tal incoerência acarreta grandes discussões entre os agentes do setor elétrico, podendo ocorrer disputas para definir responsabilidades para arcar com os prejuízos e os custos para implementação das ações corretivas ou mitigadoras.

No Brasil, o módulo 8 do procedimentos de rede (PRODIST - Módulo 8), que rege as ações relacionadas à qualidade do produto e aos distúrbios de QEE, está em fase de revisão com o objetivo de melhorar as regulamentações e definições de indicadores, procedimentos e valores de referência. Durante esse processo, verifica-se ampla participação dos agentes (ABRADEE - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica; ABRACE - Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e Consumidores Livres; ONS - Operador Nacional do Sistema; dentre outros). Nessa discussão, o AMT, destaca-se como sendo um fenômeno com pouca regulamentação, pois no mundo apenas a África do Sul e França sinalizam algum tipo de regulamentação através de normas (FAU, 2014) e índices de referência. As contribuições técnicas enviadas pela ABRADEE (ABRADEE, 2014) e ABRACE (ABRACE, 2014), relacionadas à nota técnica publicada pela Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição da ANEEL (SRD, 2014) e os respectivos relatórios de estudos prévios realizados, confirmam os diferentes pontos de vista e divergências sobre o assunto. A ABRACE e a ABRADEE concordam que os índices de referência devem ser considerados nas ações de regulamentação, mas divergem sobre os valores apresentados, as responsabilidades relacionadas a implementação dos monitores de QEE e a sequência de procedimentos após o AMT ser informado pelo consumidor industrial.

Mesmo acontecendo revisão do módulo 8 do PRODIST, que certamente resultará em melhorias significativas relacionadas à regulamentação dos fenômenos de QEE, no que tange o AMT, vislumbra-se que ainda não serão definidas ações de punição por violação dos futuros índices de referência. Tal constatação é fruto das dificuldades inerentes para localizar a fonte do AMT e, consequentemente, dificuldades para identificar o agente

responsável pelo sistema onde a causa origem (falta) aconteceu. Para reverter esse cenário, o levantamento de dados através de monitores de QEE e localizadores da fonte do AMT será primordial. Neste contexto, o foco principal deste trabalho de tese está apontado para o tema localização da fonte do AMT.

Pode-se encontrar na literatura recentes propostas de localizadores da fonte do AMT utilizando as mais variadas metodologias. O capítulo 2 apresentará resumidamente as principais características de cada metodologia, suas vantagens, desvantagens e limitações, permitindo o entendimento pleno dos principais problemas e desafios a serem superados pelo trabalho apresentado nessa tese.

1.3 Principais Contribuições

Esta tese apresenta o desenvolvimento, modelagem e avaliação computacional de um novo método para a localização da fonte do AMT utilizando apenas medição de tensões dos terminais do transformador de fronteira e um algoritmo que avalia de forma qualitativa o comportamento do fluxo de potência antes e durante o AMT. O método apresentado traz como principal contribuição a solução para alguns dos problemas ainda evidentes nos métodos de localização existentes. Destaca-se o seu bom desempenho em sistemas elétricos diversos, considerando qualquer condição de fluxo de potência pré-AMT e diversos tipos de falta, sejam com características simétricas ou assimétricas. Ao avaliar qualitativamente o comportamento do fluxo de potência, o método garante robustez ao permitir que o fluxo de potência monitorado seja estimado através de apenas medições de tensão na fronteira e dados de placa do transformador. A simplicidade do método viabilizará a implementação do algoritmo desenvolvido tanto em dispositivos de monitoramento de QEE, como em relés de proteção. Como consequência, contribuirá para facilitar a instalação de localizadores no sistema elétrico, minimizando os problemas resultantes da incoerência entre a crescente preocupação com prejuízos causados por este fenômeno e a falta de normatização no tema.

1.4 Estrutura da Tese

Além deste capítulo introdutório, esta tese se compõe dos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 - Localização da Fonte do AMT - Revisão Bibliográfica;
- Capítulo 3 - Método de Localização da Fonte do AMT Desenvolvido;
- Capítulo 4 - Avaliação de Desempenho em Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição;
- Capítulo 5 - Avaliação de Desempenho em um Sistema Elétrico Industrial;

- Capítulo 6 - Conclusão.

O Capítulo 2 contém informações dos diversos métodos existentes de localização das fontes de AMTs. Estruturado para classificar as diferentes metodologias e os respectivos métodos associados, apresenta as vantagens e desvantagens de cada um através de análises comparativas, destacando as lacunas ainda não preenchidas sobre o assunto.

Uma vez identificados os problemas existentes, o Capítulo 3 apresenta o método de localização desenvolvido, as explicações detalhadas de cada elemento que o compõe, bem como o embasamento teórico relacionado aos comportamentos característicos esperados para o fluxo de potência, considerando os diversos tipos de sistemas elétricos existentes.

Com intuito de avaliar o desempenho da metodologia apresentada, o Capítulo 4 se destina à modelagem de um sistema de transmissão e distribuição real, apresentação dos procedimentos de simulação, apresentação e avaliação de desempenho do método desenvolvido perante esse tipo de sistema.

O capítulo 5 foi estruturado de modo similar ao capítulo anterior, entretanto, o sistema modelado consiste num sistema industrial real com cogeração para confirmar a robustez do método.

Em ambos os Capítulos 4 e 5, uma comparação de desempenho é realizada entre o método desenvolvido e um dos métodos propostos na literatura e considerado de melhor desempenho.

Por fim, no Capítulo 6 são destacados de forma conclusiva os principais aspectos do método apresentado, resultados das avaliações realizadas, confirmação das contribuições desta tese de doutorado e as sugestões para trabalhos futuros. As referências bibliográficas e o anexo contendo a lista de artigos científicos publicados resultantes desse trabalho completam no final a estrutura dessa tese.

2 LOCALIZAÇÃO DA FONTE DO AMT - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar, resumidamente, as principais metodologias de localização da fonte do AMT, assim como, suas vantagens, desvantagens, aplicações e limitações. Entretanto, antes de apresentar os principais métodos, o conceito de localização da fonte do AMT utilizado deve ser esclarecido.

A maioria dos trabalhos publicados sobre esse tema, assim como essa tese, consideram que o termo “localização da fonte do AMT” como sendo a indicação da região do sistema elétrico na qual a origem do AMT se encontra, diferentemente da interpretação associada à localização exata do ponto de falta. Em outras palavras, o termo localização indica se o evento causador do AMT está localizado a montante ou a jusante do ponto de monitoramento. A localização exata da origem de um AMT pode ser concebida apenas para localizadores de falta em linhas de transmissão (LT) ou alguns poucos métodos de localização da fonte do AMT. Portanto, para esses casos, será destacada a mudança no entendimento do termo “localização da fonte do AMT”.

As diversas metodologias de localização analisadas foram agrupadas de acordo com o tipo de medição utilizada, destacando os métodos de localização da fonte do AMT baseados em:

- Medições sistêmicas;
- Medição pontual de tensão;
- Medição pontual de corrente;
- Medição de sinais de alta frequência;
- Medição pontual de tensão e corrente.

2.2 Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Sistêmica

Com o desenvolvimento tecnológico e o crescimento exponencial dos sistemas de comunicação, assim como o ampla difusão dos conceitos de redes inteligentes (*Smart*

Grids), cada vez mais tecnologias relacionadas ao monitoramento do sistema elétrico de forma *online* e sistêmica são utilizadas. Sistemas de comunicação capazes de garantir confiabilidade, antes economicamente inviáveis devido às características típicas dos sistemas elétricos (grandes distâncias e informações complexas à serem trafegadas), hoje, são comuns às infraestruturas dos diversos sistemas elétricos. Dispositivos de controle, proteção e monitoramento, cada vez mais, utilizam tecnologias digitais que possibilitam diversas formas de comunicação. Canais de comunicação de diversos meios (ex: guias de onda, radio frequência e fibra ótica) alcançam longas distâncias. Sistemas de gerenciamento de tráfego de informações e protocolos de comunicação modernos possibilitam de forma rápida e segura a transferência de dados. Tais afirmações combinadas viabilizaram o desenvolvimento de tecnologias de localização da fonte do AMT baseadas em medição sistêmica das grandezas elétricas.

Dentro deste contexto de medição sistêmica encontra-se um grupo de métodos de localização da fonte do AMT caracterizados principalmente pelo monitoramento amplo de pontos ao longo do sistema elétrico, onde as informações coletadas pelos diversos monitores são concentradas em uma unidade central de processamento capaz de rodar algoritmos que resultam na localização pontual da fonte do AMT.

É importante destacar que, para esse tipo de metodologia, o termo “localização da fonte do AMT” representa a localização exata da fonte do evento, por exemplo, localização do barramento ao qual a falta aconteceu ou o *pin-point* da falta em uma LT. Também, é importante destacar que dependendo da estrutura de comunicação utilizada, o processamento dos diversos possíveis algoritmos pode acontecer de forma simultânea ao evento do AMT registrado (*online*) ou de forma posterior (*offline*).

Entre os diversos métodos existentes, alguns utilizam apenas sinais de tensão ou de corrente e outros utilizam ambos os sinais. Vale a pena destacar que a grande quantidade de barramentos existentes num sistema elétrico inviabilizaria a instalação de monitores em todos eles. Para solucionar tal problema, estudos de otimização para a alocação ideal de monitores são necessários.

A proposta de otimização do número de monitores instalados considera que qualquer AMT ocorrido num determinado sistema elétrico deve ser observado por, pelo menos, um monitor (ESPINOSA-JUAREZ; HERNANDEZ; OLGUIN, 2009). Essa proposta utiliza a ferramenta denominada “Área de Alcance do Monitor” (*Monitor Reach Area* - MRA) e um algoritmo de otimização para obter o menor número possível de monitores e os respectivos pontos de instalação, garantindo a observação total do sistema para qualquer tipo de falta.

A localização da fonte do AMT é possível, pois os registros de tensões nos barramentos monitorados garantem a avaliação das intensidades do fenômeno em cada ponto. O AMT perde intensidade conforme aumenta a distância elétrica entre o barramento monitorado e a fonte do distúrbio. Portanto, ao avaliar as intensidades do afundamento

em cada ponto, é possível identificar o local da falta (GALIJASEVIC; ABUR, 2002).

Variações de corrente e energia em cada barramento podem ser monitoradas permitindo a classificação em ordem crescente dos barramentos impactados pela fonte do AMT (índices de impacto). O local, ou área próxima ao fenômeno, é obtido considerando o barramento ou barramentos com maiores índices de impacto (CHANG et al., 2008). Outro método utiliza ferramenta híbrida capaz de medir tensões e correntes no sistema, otimizar os dados coletados (*Multiway Principal Component Analysis* - MPCA) e classificar o evento registrado indicando o local da fonte do afundamento, se no sistema de alta tensão (AT) ou no sistema de média tensão (MT). O processo de localização é baseado em sistemas inteligentes (*Multilayer Perceptron* - MLP, *Radial Basic Function* (RBF) *network*, *Decision Tree* -DT) (KHOSRAVI et al., 2007). Simulações no sistema de teste de 30 barras do IEEE foram realizadas para avaliar o desempenho do método baseado em rede neural (SHAREEF; MOHAMED, 2013).

Um conjunto de métodos específicos foram desenvolvidos para sistemas elétricos típicos de alimentadores radiais de distribuição. O principal conceito relacionado a esses métodos compara, o conjunto de resultados de cálculos das várias combinações de níveis de tensão dos barramentos do sistema para faltas simuladas em cada um dos barramentos (perfil de tensões no sistema para cada falta simulada), aos valores registrados durante o AMT. Aquele perfil de tensão que resultar no menor erro durante a comparação corresponderá à condição de falta registrada pelos monitores, portanto, o ponto de falta simulado será o local da fonte do AMT (PEREIRA et al., 2009). Esse conceito de comparação entre grandezas monitoradas e calculadas não contempla alterações do sistema elétrico ou variações na resistência de falta. Portanto, técnicas de aprendizagem computacional foram utilizadas em (DONG; ZHENG; KEZUNOVIC, 2013) na tentativa de proporcionar melhor desempenho perante essas variações.

Chen et al. (2015) realizou uma análise de sensibilidade da técnica de comparação entre grupo de valores medidos e simulados perante diversos erros de entrada de dados possíveis, destacando o impacto do aumento da geração distribuída em sistema de distribuição. O autor destacou a fragilidade do método e que os principais fatores que afetam o desempenho desse tipo de localizador são: a resistência de falta, a condição de carga e, por último, o aumento da geração distribuída.

Blanco, Petit e Ordonez (2014) utilizam medições apenas de tensão de diversos monitores ao longo de um sistema de distribuição radial, onde através das relações das grandezas monitoradas em cada monitor e um algoritmo de seleção, localiza a região da fonte do AMT provocado por falta ou o chaveamento de banco de capacitores.

Em geral, os métodos de localização da fonte do AMT em sistemas de transmissão e distribuição baseados em medição sistêmica apresentam bom desempenho. Ferramentas computacionais são empregadas para minimizar os erros e incertezas inerentes ao se utilizar

modelo analítico como base fundamental do método. Como já abordado, a infraestrutura de comunicação e monitoramento necessária para implantação desses métodos está cada vez mais disponível, entretanto é uma realidade que ainda não alcançou a maioria dos sistemas elétricos de médio e pequeno porte. Isso acontece devido ao alto investimento em monitores de qualidade para os diversos pontos de medição necessários, assim como o custo de implantação de todo o sistema de comunicação. Acredita-se que, com o passar do tempo, o investimento nesse tipo de estrutura será viável mesmo para sistemas de médio e pequeno porte.

É importante destacar o principal problema não solucionado por este conjunto de métodos de localização da fonte do AMT. A necessidade de concentração dos dados coletados pelo monitores permite apenas que esse tipo de estrutura seja implementada num sistema elétrico de uma única empresa, ou seja, sistemas adjacentes de diferentes concessionárias não estariam contemplados na rede de monitoramento e concentração de dados. Considerando que o AMT propaga facilmente ao longo dos sistemas limítrofes, essa metodologia de localização não disponibiliza informações para os diversos agentes que disputam a não responsabilidade pela fonte do AMT. Mesmo com o aumento da infraestrutura de comunicação, a troca de informações entre agentes distintos, ou concorrentes, ou em disputa, atualmente e num futuro próximo, não acontecerá enquanto não existir normatização. Até lá, por exemplo, disputas entre concessionária e cliente industrial ou entre concessionárias distintas com conexões de fronteira, não poderão utilizar esse tipo de metodologia de localização para prover informações da localização da fonte do AMT.

2.3 Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Pontual de Tensão

Ao instalar o localizador da fonte do AMT na fronteira entre sistemas, o resultado deve ser a indicação do lado no qual se encontra o evento fonte em relação à fronteira. Consequentemente, subsidiando informações técnicas para possíveis disputas entre agentes. A Figura 1 ilustra o conceito de fronteira utilizado. Para sistema elétrico radial, o conceito de fronteira é intuitivo, entretanto, para sistemas elétricos com estruturas complexas, como por exemplo, sistemas de transmissão malhados, o conceito de fronteira e da localização do AMT deve ser melhor discutido.

O método apresentado por Gomez et al. (2005) consiste na instalação de um localizador da fonte do AMT na fronteira entre uma concessionária e um cliente industrial. Através de medições apenas de tensão no barramento de fronteira, o método é capaz de indicar se a fonte do AMT está localizada na concessionária ou dentro do sistema industrial. Esse método avalia o comportamento da relação entre a intensidade do AMT e o salto de ângulo da tensão, o qual o salto de ângulo representa a diferença angular entre os fasores

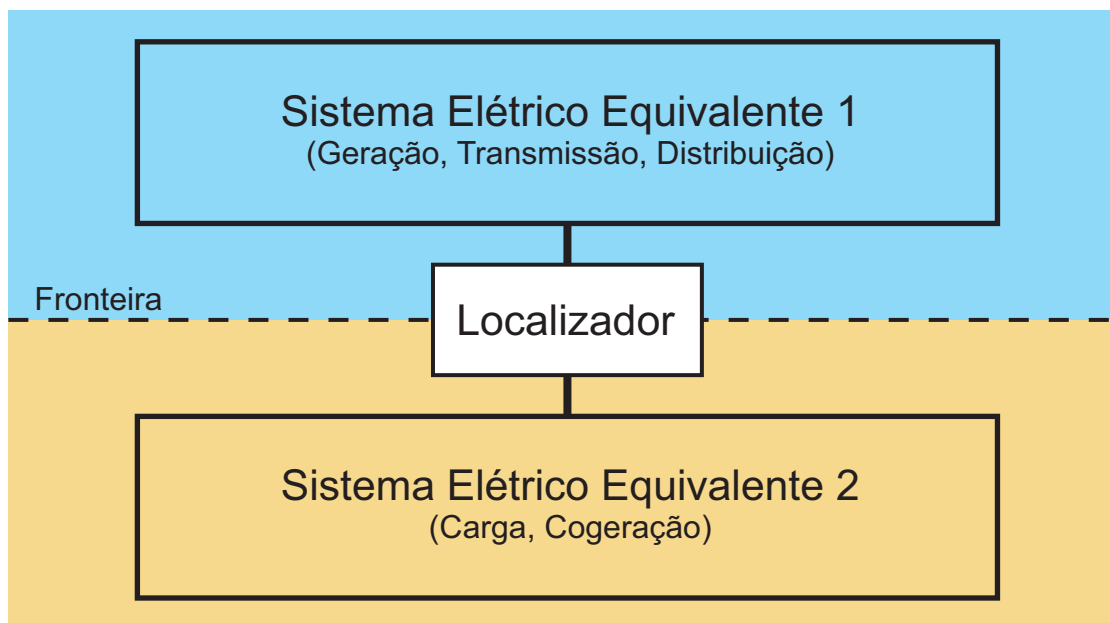


Figura 1 – Ilustração de conexão de fronteira em sistema elétrico radial típico.

de tensão durante a transição da condição pré-AMT para a condição de AMT.

O método sugere que faltas localizadas dentro do sistema industrial não são capazes de influenciar consideravelmente o salto de ângulo da tensão monitorada. Entretanto, faltas localizadas na concessionária resultam num maior salto de ângulo. Ao considerar que a intensidade do AMT influencia no salto de ângulo, o autor realizou um conjunto de testes e obteve o comportamento padrão entre a intensidade do AMT e o salto de ângulo. Os testes foram realizados por simulações as quais foram aplicadas faltas trifásicas e monofásicas, ora dentro do sistema industrial, ora fora do sistema industrial (concessionária) e, também, por meio de medições reais de uma única instalação elétrica para a análise. Os resultados permitiram a classificação em grupos que relacionam o AMT com o salto de ângulo, possibilitando a definição de um limiar entre os grupos, e consequentemente, um critério de localização. Dependendo do ponto ao qual a relação entre as gradezas durante o AMT se encontrar, o método indicará a origem do evento.

A Figura 2 esboça, com base no levantamento feito pelo autor, as regiões que relacionam o salto de ângulo e uma certa intensidade do AMT para os casos de faltas no sistema industrial e fora dele, assim como uma região limiar.

O método é de fácil implementação devido à utilização de medições apenas de tensão. Entretanto, o autor não deixa claro qual é a sua robustez perante a outros sistemas elétricos, pois diversos fatores podem influenciar nos comportamentos esperados para a relação intensidade do AMT e salto de ângulo, tais como: tipo de falta, condição de carga, fluxo de potência pré-AMT, potência de curto-circuito no ponto de conexão, dentre outros. Assim, maiores investigações são necessárias.

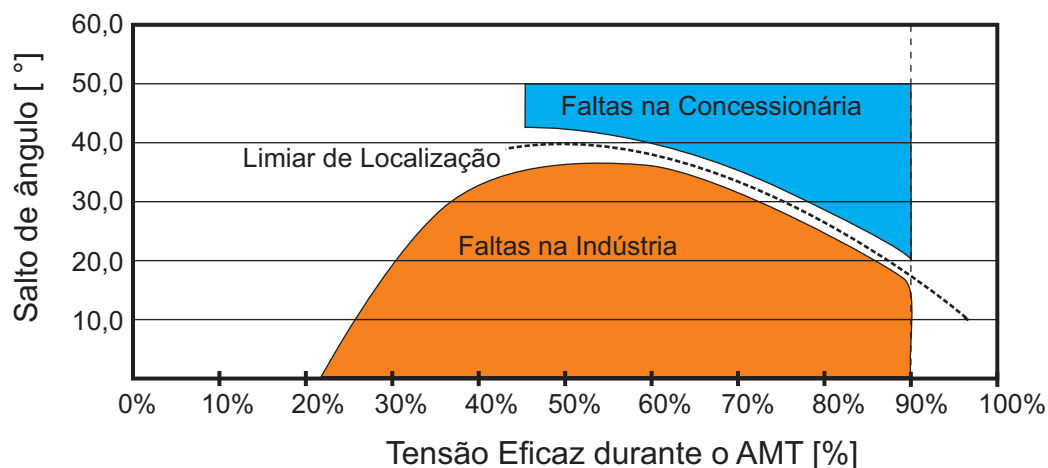


Figura 2 – Relação entre AMT e salto de ângulo para faltas na concessionária ou dentro do sistema elétrico industrial.

Makaliki e Leborgne (2007) propuseram um método capaz de localizar a fonte do AMT através de medição de tensão em dois barramentos conectados por um transformador. Por intermédio da medição da variação da tensão, em pu, simultaneamente em cada barramento (primário e secundário), antes e durante o AMT, o método determina se a fonte do AMT está localizada a montante ou a jusante do ponto de conexão. O método considera a queda de tensão provocada pelo fluxo de potência que flui pelo transformador durante a falta como critério de decisão, pois os autores afirmam que acontece maior queda de tensão no terminal do transformador correspondente ao sistema onde ocorre a falta.

Neste ponto é válido destacar que a localização da fonte do AMT pode ser informada através das terminologias “montante” ou “jusante”. Tais terminologias são muito comuns para identificar sistemas elétricos em referência a um determinado ponto de interesse. Neste método, a fronteira entre sistemas é definida pelos enrolamentos primário e secundário do transformador. Em geral, considera-se um sistema a montante aquele que fornece o fluxo de potência ativa que flui pela fronteira. Por outro lado, considera-se um sistema a jusante aquele que recebe o fluxo de potência ativa. Sabendo que o fluxo de potência ativa pode inverter em condições normais de operação quando ambos os sistemas contemplarem fontes, é comum definir o sistema a montante aquele com maior nível de tensão, ou aquele que fornece, na maior parte do tempo, potência ativa.

A Figura 3 apresenta o princípio do método ao qual utiliza o monitoramento das tensões no primário e secundário de um transformador que, em geral, está localizado na fronteira entre dois sistemas. A magnitude das tensões nos terminais do transformador durante o AMT será menor no lado onde ocorreu a falta devido à queda de tensão na impedância do transformador decorrente do fluxo de corrente durante a falta. Considerando essa premissa, o método localiza a falta a jusante se a intensidade do AMT for mais severa (menor tensão remanescente) no secundário, caso contrário, a falta é a montante. Se o

sistema a jusante não possuir fontes e acontecer falta no sistema a montante, não existirá contribuição para a falta pelo sistema a jusante, portanto a queda de tensão nos dois terminais do transformador serão semelhantes.

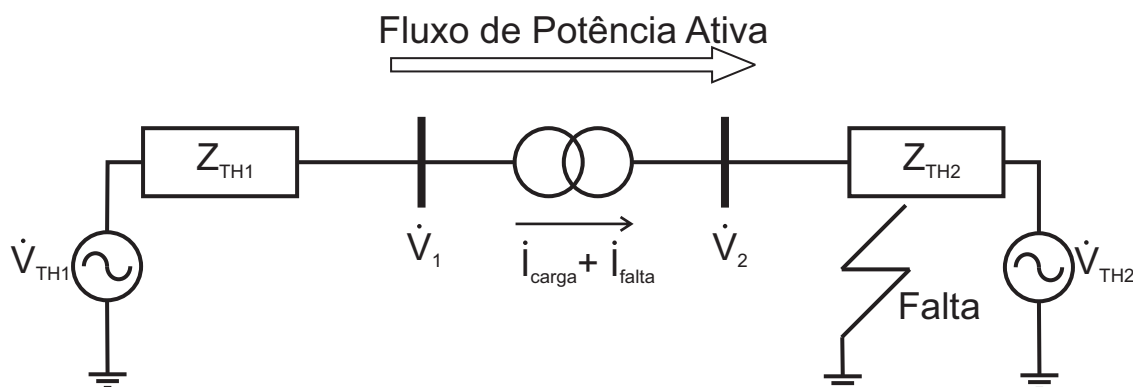


Figura 3 – Circuito elétrico básico representando a medição simultânea em ambos baramentos (primário e secundário).

Através de simulações e medições de um caso exemplo, utilizando dados de um sistema real da Zâmbia, os autores constataram que esse método apresenta bom desempenho para localizar a fonte do AMT nas fronteiras de sistemas de transmissão. Nesse nível de tensão, a influência das cargas e os consequentes possíveis desequilíbrios de tensão não são significativos e a maioria dos transformadores do sistema possuem defasamento angular igual a 0° . Ambos os pontos destacados influenciam no desempenho do método, pois, ao comparar os níveis de tensão de fase no primário e secundário de um transformador, as possíveis conexões dos enrolamentos que resultam em defasamento angular diferentes de 0° inviabilizariam tais comparações quando da ocorrência de faltas assimétricas. O comportamento da carga também limita o desempenho do método, pois dependendo do tipo de carga, ao reduzir o nível de tensão, o fluxo de potência pode aumentar ou diminuir, trazendo como consequência variações nos níveis de tensão monitorados que levariam à localização errônea da fonte do AMT.

A revisão bibliográfica dos métodos de localização demonstrou que são poucos os métodos que utilizam medições pontuais de tensão. A utilização de localizadores da fonte do AMT baseados em medição apenas de tensão facilitaria a instalação em massa de localizadores no sistema, pois sinais de tensão são mais fáceis e seguros de serem obtidos do que sinais de corrente. No entanto, cada vez mais transdutores de corrente são instalados e a disponibilidade dos sinais de corrente se equipara à dos sinais de tensão.

O fato a ser destacado consiste em quanto maior o número de métodos que contemplem as diversas possibilidades de monitoramento das grandezas elétricas, maior será a chance para implementação em massa de localizadores da fonte do AMT. Ao

aumentar o número de possibilidades de localizadores baseados em diferentes metodologias (apenas tensão, apenas corrente ou ambos), a disponibilidade do tipo de sinal no ponto de interesse não acarretará em dificuldades durante o processo de instalação dos localizadores. Independente do tipo de sinal ou sinais disponíveis, existirá opções de localizadores capazes de garantir bom desempenho na localização da fonte do AMT.

2.4 Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Pontual de Corrente

A maioria dos métodos baseados nessa metodologia tem como objetivo localizar o ponto exato da falta em linhas de transmissão ou em alimentadores radiais de distribuição. Por exemplo, Liao (2007) desenvolveu um localizador do ponto exato de falta em uma LT utilizando medições de corrente de um ou ambos terminais.

Também usou de cálculos matriciais (matriz de impedância do sistema) e desenvolveu equações relacionando os parâmetros do sistema e os fasores de corrente medidos, a fim de obter o ponto exato da falta (0 a 100% do comprimento da LT). Kang e Liao (2010), por sua vez, desenvolveram um método de localização para linhas de transmissão duplas.

Das et al. (2011) propôs um procedimento para localizar o ponto de falta em sistemas de distribuição radiais. A proposta tem como premissa básica a construção de um conjunto de informações de valores de amplitude ou fasor da corrente que flui pelo alimentador principal utilizando simulações de falta ao longo de todo o circuito para compará-los à corrente monitorada. Assim, o método é capaz de definir o local da falta ao considerar a simulação de falta que tenha o menor erro entre as grandezas monitoradas e calculadas. Das, Karnik e Santoso (2012) apresentaram outro método capaz de minimizar os problemas relacionados às diferenças entre o modelo utilizado para os cálculos de corrente e a medição real do sistema elétrico no momento do AMT.

Um recente trabalho desenvolvido (POLAJZER; RTUMBERGER; DOLINAR, 2015) utiliza os valores instantâneos das componentes de sequência positiva da corrente monitorada para indicar se a fonte do AMT está a montante ou jusante do ponto de monitoramento. O método utiliza transformação modal para obter os valores instantâneos de corrente de sequência positiva em valores complexos instantâneos. Calcula a variação do módulo da corrente instantânea de sequência positiva em relação ao valor de pré-falta, pois enquanto não houver distúrbio no sistema, o módulo da diferença entre eles será nulo. O cálculo integral, ao longo do tempo, dos valores instantâneos da amplitude do sinal diferença é realizado e os autores definem como critério de localização a evolução desse cálculo integral. Se o resultado do cálculo for menor que zero, indica falta a montante, caso contrário, falta a jusante. O método foi avaliado através de simulações em sistema de distribuição radial composto por fonte a montante, carga passiva e geração distribuída

a jusante do ponto de monitoramento. Também, testes em laboratório e medições de campo foram utilizados para avaliar o desempenho da proposta. Em geral, o método apresentou bom desempenho para localização da fonte do AMT, principalmente, quando ocorria evento no sistema a montante. Entretanto, os autores concluíram que para faltas localizadas a jusante do localizador, o desempenho não foi tão bom devido ao efeito da resistência de falta na ocorrência de faltas assimétricas.

Após a apresentação das técnicas de localização baseadas na medição pontual de corrente, constata-se que apenas um método está diretamente relacionado ao tema foco dessa tese (POLAJZER; RTUMBERGER; DOLINAR, 2015).

2.5 Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição de Sinais de Alta Frequência

Técnicas que utilizam os sinais de alta frequência são uma alternativa para avaliação e diagnósticos dos diversos distúrbios de QEE, dentre eles, com foco no tema dessa tese, a localização de faltas é contemplada. A utilização dos sinais de tensão e corrente obtidos através de elevadas taxas de amostragem possibilita a avaliação de informações existentes no espectro de frequência. Essa característica permite o diagnóstico do tipo de evento que causou o distúrbio de QEE.

Santoso et al. (2000) utiliza a transformada de *Fourier* e a transformada *Wavelet* para caracterizar o tipo do distúrbio de QEE ocorrido. A avaliação das formas de onda de tensão e corrente, dos valores de pico e valores eficazes registrados, possibilitam a classificação dos eventos em três categorias: operação de conversores; energização de transformadores; e chaveamento de banco de capacitores. Entretanto, o autor não realizou uma abordagem para a caracterização de faltas.

Pourahmadi-Nakhli e Safavi (2011) propuseram um método de localização de falta em sistema de distribuição radial. O método utiliza o conceito de reflexão das ondas viajantes do distúrbio de tensão nos diversos pontos do alimentador, tais como no final do alimentador e em suas derivações. Dependendo do ponto de falta e da topologia do alimentador radial, existirá um espectro de frequência típico com intensidades de energia para os sinais em diversas frequências. Utilizando *Wavelets* para estratificar os padrões dos possíveis espectros de frequência e rede neural (treinada para um específico sistema elétrico), o método passa a ser uma alternativa para a localização do ponto de falta gerador do AMT. Após ser avaliado por um conjunto de simulações, os autores confirmaram o bom desempenho e robustez frente a variações de carga no alimentador e variadas condições de resistência de falta e ângulo de incidência de falta. Entretanto, a aplicação em sistemas malhados não foi realizada, não permitindo, portanto, qualquer tipo de avaliação de desempenho para esse tipo de sistema. Além disso, a rede neural teve um treinamento

específico, podendo não ser válida em caso de mudança de topologia, carga e outras variáveis, apesar da sua habilidade de generalização.

Lopes, Fernandes e Neves (2013) propuseram um método que utiliza uma técnica amplamente conhecida capaz de analisar o tempo de propagação da onda de tensão nos dois terminais de uma LT durante a falta. O método estratifica o distúrbio do sinal através da transformação de *Park* e, utilizando valores de referência para detectar o distúrbio, ajustados de acordo com o ruído típico a aquele sistema e calcula a diferença de tempo de propagação até cada terminal da LT. Esse cálculo permite a localização exata do ponto de falta na LT. Utilizando a transformação de *Park*, ao invés da tradicional transformação *Wavelet* para esse tipo de aplicação, o autor simplifica a técnica garantindo menor esforço computacional. O método foi avaliado através de simulação num sistema de transmissão de 230kV, apresentando bom desempenho. Lopes et al. (2015) apresentou uma proposta de localizador que não precisa de sincronismo de tempo dos sinais monitorados no extremos da LT para localizar o local da falta. Utilizando guia de onda que comunica as duas extremidades da LT e sinal digital, o método proposto é capaz de calcular a diferença de tempo entre a detecção do distúrbio nos terminais da LT. Os resultados obtidos atestam o bom desempenho do método, porém sua aplicação fica restrita à apenas linhas de transmissão, inviabilizando sua aplicação na identificação da fonte do AMT.

2.6 Métodos de Localização da Fonte do AMT baseados em Medição Pontual de Tensão e Corrente

O primeiro método desenvolvido é baseado nos distúrbios de potência e de energia (PARSONS et al., 2000). Este método é definido como a diferença entre a potência fornecida durante o AMT e a potência consumida em condições normais de operação. O distúrbio de energia é obtido através do cálculo integral do distúrbio de potência ao longo do tempo e o valor final da variação de potência e da energia definirá o local de origem do AMT. Se a variação for positiva, a origem do AMT está dentro do sistema que alimenta o ponto de medição (a jusante). Caso a variação seja negativa, o local de origem do AMT está fora (a montante). Tais definições consideram como premissa que, ao acontecer uma falta com intensidade suficiente para gerar o AMT, a potência ativa irá fluir de todas as fontes do sistema para o local da falta. Portanto, se a falta estiver dentro do sistema que alimenta o ponto de medição, haverá um aumento no fluxo de potência ativa e, consequentemente, um aumento na energia monitorada durante o distúrbio. Caso contrário, ocorrerá a redução ou inversão do fluxo de potência ativa no ponto de monitoramento. Em geral, esse método é eficaz e robusto, entretanto, não se aplica para sistemas radiais com cargas com características de aumento de potência ativa ao ocorrer diminuição de tensão, por exemplo, motores de indução trifásicos, amplamente utilizados em sistemas

elétricos industriais.

De forma complementar, um método baseado nos mesmos conceitos apresentados foi desenvolvido apenas para os casos de faltas assimétricas. Ao invés de utilizar as informações de fase ou sequência positiva, o método utiliza os valores de sequência negativa dos fasores de tensão e corrente monitorados (KANOKBANNAKORN; SAENGSUWAN; SIRISUKPRASERT, 2011). Os autores concluíram que a proposta é robusta e atende as expectativas, mas, considerando a incapacidade de localizar a fonte do AMT para faltas simétricas, deve ser utilizado de forma complementar à outra técnica de localização.

Ahn et al. (2004) e Kim et al. (2005) buscaram classificar o tipo de evento que causa o AMT (falta, partida de motor e energização de transformadores) e localizar a fonte do AMT baseando-se na comparação da variação de potência com um índice pré-definido. Os métodos foram avaliados apenas para sistemas radiais com cargas típicas e não foi possível avaliar seus desempenhos para outros tipos de sistemas. O cálculo das potências ativa e reativa instantâneas foi apresentado por Kong, Dong e Chen (2008), no entanto só realizaram testes para sistemas radiais.

Outra abordagem utiliza a inclinação da trajetória da variação da resistência do sistema (LI et al., 2003). O método utiliza os sinais de tensão, corrente e fator de potência medidos para relacionar a intensidade da corrente com o valor da parte real do fasor de tensão. O resultado disso é a variável que representa a resistência da fonte do circuito. Ao acontecer o AMT, avalia-se a variação dessa variável e, se a inclinação dessa trajetória for positiva, indica falta a montante. Se a inclinação da trajetória for negativa, a fonte do AMT será localizada a jusante. Para faltas monofásicas, o método mostra diferentes comportamentos para cada fase, consequentemente, não permite concluir sobre a localização da fonte do AMT. Na mesma linha de raciocínio, outro método (TAYJASANANT; LI; XU, 2005) utiliza a ferramenta dos mínimos quadrados para estimar a resistência de sequência positiva. O método proposto tem sólida fundamentação teórica para sistemas lineares. Entretanto, para cargas não lineares, o mesmo deve ser melhorado para incorporar os transitórios característicos desse tipo de carga.

Hamzah, Mohamed e Hussain (2004) desenvolveram um método de localização baseado na componente real do fasor de corrente. O método realiza análise da variação da parte real do fasor de corrente utilizando o fasor de tensão como referência. Se a projeção do fasor de corrente durante o AMT estiver na parte positiva da abscissa do plano complexo, isso indica falta a jusante, caso contrário, falta a montante. Basicamente, o que este método propõe é investigar o fator de potência no início do afundamento. Se o ângulo entre os fasores de tensão e corrente estiver entre -90° e 90° , então a falta é considerada a jusante e entre 90° e 270° , considerada a montante. A análise é feita usando os valores de fase e espera-se obter a mesma indicação em cada uma das três fases, até mesmo para faltas assimétricas. O método não precisa do processo de linearização

para obter a linha de tendência, diminuindo a necessidade de processamento exigido no método da trajetória da variação da resistência do sistema. Entretanto, sua aplicação para faltas assimétricas em sistemas com mais de uma fonte deve ser aprimorado. O método foi testado para um sistema de distribuição, onde apresentou bons resultados (HAMZAH; MOHAMED; HUSSAIN, 2005). O método utiliza os valores de fase, portanto, o mesmo resultado de localização deve ser obtido para todas as fases do sistema. Entretanto, para faltas assimétricas, os autores apresentaram apenas os resultados das fases A e B. Faltou a apresentação dos resultados da fase C para garantir resultados idênticos em todas as fases. Portanto, não foi possível confirmar o bom desempenho do método para faltas assimétricas. A condição inicial do fluxo de potência também não foi considerada e avaliada.

Outros métodos de localização da fonte do AMT, os quais utilizam o conceito de impedância vista no ponto de monitoramento foram desenvolvidos. Tal conceito é comumente utilizado em algoritmos de relés de distância para proteção de LTs. Sendo um pouco diferente das abordagens anteriores, a ideia básica utiliza a impedância vista durante o AMT (PRADHAN; ROUTRAY, 2005). A impedância é estimada usando os fasores de tensão e de corrente de sequência positiva no ponto de monitoramento. Para faltas a jusante, o valor do módulo da impedância vista calculada é menor que na condição pré-AMT. Para faltas a montante do ponto de monitoramento, a corrente flui no sentido inverso, portanto a impedância será alterada em módulo e ângulo. Assim, este método propõe a seguinte regra para detectar a fonte do AMT: se o módulo da impedância vista durante o AMT for menor que o módulo da impedância vista antes do AMT e o ângulo da impedância for maior que zero, então a falta ocorreu a jusante, caso contrário a falta ocorreu a montante do ponto de monitoramento.

Com relação ao desempenho, diversas simulações foram realizadas para sistemas de dois terminais, sistemas radiais, sistemas de cinco barras malhado e em sistema com compensadores de reativo na LT. Os autores verificaram bom desempenho para os diversos tipos de falta, todavia destacaram as principais limitações do método:

- Faltas localizadas a montante do ponto de monitoração em sistemas radiais sem cogeração não alteram o valor da impedância vista;
- Quando a falta não for permanente, o método não é capaz de estabelecer e manter o mesmo resultado de localização, visto que o valor da impedância vista varia ao longo do tempo para esses casos.

Tentando melhorar o desempenho da proposta baseada na impedância vista, Shao, Peng e Kang (2010) introduziram o conceito de impedância vista em coordenadas $dq0$ ao utilizar a transformação ortogonal de Park's e potência instantânea. Como não utilizam os fasores de tensão e corrente, o critério de localização utiliza a amplitude da impedância

instantânea calculada e, se o valor diminuir durante o AMT, o método indica falta a jusante do localizador, caso contrário, localiza a montante do localizador. Ao realizar simulações utilizando sistema radial, ora com carga de impedância constante, ora com motor de indução trifásico (MIT), constataram que a utilização de impedância instantânea permite uma melhor avaliação do fenômeno. Entretanto, considerando as contribuições de curto-circuito do MIT nos primeiros ciclos após o início da falta, as variações da impedância vista foram mínimas, dificultando a análise. Também, vale ressaltar que os transitórios inerentes ao cálculo da impedância instantânea durante a transição para o AMT utilizando as coordenadas $dq0$ dificultam a localização da fonte do AMT.

O método apresentado por Pradhan e Routray (2005) foi aprimorado para solucionar a não variação da impedância vista quando da ocorrência de faltas a montante de um sistema radial (YILIN; YONGHAI, 2011) e (YONGHAI et al., 2012). O método da impedância vista aprimorado calcula usando (2.1) e (2.2) os índices de variações do módulo da impedância vista e do ângulo da impedância.

$$\Delta|Z| = \left(\frac{|Z_f|}{|Z_{pre}|} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2.1)$$

$$\Delta\angle Z = \angle Z_f - \angle Z_{pre} \quad (2.2)$$

Onde: $\Delta|Z|$ Índice da variação da impedância vista; Z_f Impedância vista durante o AMT; Z_{pre} Impedância vista antes do AMT; $\Delta\angle Z$ Índice da variação do ângulo da impedância vista;

Após avaliação dos valores obtidos para ambos os índices calculados durante diversas faltas simuladas, os autores propuseram dois valores limites (-40% para o índice da variação da impedância vista e 25° para o índice da variação do ângulo da impedância vista). Se $\Delta|Z| < -40\%$ e $\Delta\angle Z > 25^\circ$, então a fonte do AMT está localizada a jusante do monitor, senão, fonte do AMT a montante. Ao criar o conceito de índice, o método permitiu que pequenos distúrbios pudessem ocasionar consideráveis variações nos índices, assim como, permitir variações durante faltas a montante num sistema radial sem cogeração. Porém, ao resolver o problema apresentado na proposta de Pradhan e Routray (2005), o método criou outro problema. Ao utilizar valores de referência para uma tomada de decisão, especificamente, para um certo sistema elétrico avaliado, não garante-se que os mesmos índices de referência serão aplicáveis a outros sistemas. Isso resulta em falhas de localização em sistemas com características diferentes ou que sofrem constantes variações de topologia.

Em geral, comparando o desempenho dos métodos baseados em medição pontual de tensão e corrente, aqueles que utilizam o conceito de impedância vista (ou algoritmo de relé de distância) apresentaram melhores resultados. Alguns trabalhos compararam os

desempenhos de diversos métodos de localização (LEBORGNE; KARLSSON; DAALDER, 2006), (POLAJZER et al., 2009) e (QIAN-QIAN et al., 2011). Como exemplo, Leborgne, Karlsson e Daalder (2006) apresentaram uma avaliação comparativa entre os diversos métodos baseados na medição de tensão e corrente. Entre eles se encontram os métodos da potência e energia do distúrbio (PARSONS et al., 2000), inclinação da trajetória da variação da resistência do sistema (LI et al., 2003); sinal da resistência estimada (TAYJASANANT; LI; XU, 2005), componente real da corrente (HAMZAH; MOHAMED; HUSSAIN, 2004) e a aplicação de algoritmo de relé de distância (PRADHAN; ROUTRAY, 2005). Após simulações de diversas faltas simétricas e assimétricas em alguns barramentos de um sistema de transmissão e distribuição simulado, constatou-se que o desempenho dos métodos foi melhor para faltas simétricas, onde foram obtidos resultados corretos em 87% dos casos. Por outro lado, para faltas assimétricas os resultados corretos foram apenas de 65%. O método baseado na aplicação do algoritmo de relé de distância obteve o maior número de acertos, mostrando-se um método de localização relativamente mais eficiente. Fica claro nesse ponto que alguns problemas relacionados à localização da fonte do AMT ainda necessitam de melhorias.

2.7 Considerações Finais

No presente capítulo foram apresentadas diversas metodologias para localização da fonte do AMT, bem como o princípio de funcionamento, o desempenho e as limitações de cada método. Tendo em vista destacar os pontos principais, as seguintes considerações se apresentam como constatações sobre os problemas existentes:

- Métodos baseados em medição sistêmica não são a melhor solução de localização da fonte do AMT para os casos de disputa entre agentes distintos devido as dificuldades relacionadas à troca de informações entre os próprios agentes;
- Utilizar apenas medições de tensão para localizar a fonte do AMT proporciona facilidades de implantação em massa de localizadores da fonte do AMT, devido ao maior número de pontos de monitoramento de tensão disponíveis e a segurança relacionada à utilização dos sinais monitorados. Entretanto, são poucos métodos que utilizam essa metodologia;
- A maioria dos métodos baseados em medição pontual apenas de corrente é utilizada para localizar o local exato da falta em linhas de transmissão ou sistemas de distribuição radiais. A mesma informação vale para os métodos que utilizam sinais de alta frequência;

- Vários métodos de localização pontual utilizam medição de tensão e corrente. Cada método apresenta vantagens e desvantagens, conforme resumo apresentado na Tabela 1;
- Poucos métodos foram avaliados perante sistemas com cargas rotativas, compensadores estáticos e geração eólica;
- A maioria dos métodos baseados em medição pontual de tensão e de corrente tem bom desempenho para sistemas radiais quando avalia faltas simétricas. Por outro lado, poucos métodos tiveram bom desempenho para faltas assimétricas;
- O método que utiliza o algoritmo de relé de distância apresenta, em geral, melhor desempenho que os demais, porém tem limitações quando ocorrem faltas a montante em sistemas radiais sem cogeração;
- O aprimoramento do método de localização que utiliza algoritmo de relé de distância soluciona a falta de sensibilidade do método original, mas apresenta limitações ao utilizar valores referência para a tomada de decisão;
- Variações de topologia ou mudanças constantes de características dos sistemas não foram contempladas pela maioria dos métodos, assim como, as possíveis inversões no fluxo de potência em condição pré-AMT e sistemas malhados.

Tabela 1 – Tabela resumo das vantagens e desvantagens dos métodos de localização baseados em medição pontual de tensão e corrente.

Método	Vantagens	Desvantagens
Variação da potência e da energia	Simplicidade	Pequenas variações de potência não sensibilizam o localizador e depende do tipo de carga existente no sistema
Inclinação da trajetória da variação da resistência do sistema	Parâmetros de referência para comparação não são necessários	Não tem bom desempenho para faltas assimétricas
Assinatura da resistência estimada	Bom desempenho para sistemas lineares	O método não é confiável para sistemas malhados
Componente real do fasor de corrente	Satisfatório para faltas simétricas	Não é satisfatório para faltas assimétricas
Algoritmo de relé de distância	Bom desempenho para faltas simétricas e assimétricas	Não é sensível quando a origem do AMT num sistema radial com fonte ativa única se encontra a montante
Algoritmo de relé de distância aprimorado	Sensível quando a origem do AMT num sistema radial com fonte ativa única se encontra a montante	São necessários parâmetros de referência para comparação

3 MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DA FONTE DO AMT DESENVOLVIDO

3.1 Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é apresentar um método capaz de localizar a fonte do AMT independentemente das características e topologia dos sistemas elétricos monitorados; assim como dos tipos de falta e do fluxo de potência pré-AMT. Este localizador utiliza lógicas condicionais e deve, a princípio, medir apenas sinais de tensão, facilitando qualquer tipo de *design* de equipamento para utilização em massa nos sistemas elétricos.

A visão geral do localizador desenvolvido é apresentada no início deste capítulo. Tal abordagem permitirá a compreensão da aplicação do método, a sequência de raciocínio para a definição das premissas a serem consideradas e a apresentação do fluxograma do mesmo, o qual contém todos os elementos essenciais ao seu funcionamento. Na sequência, tais elementos são abordados em detalhes.

Um dos elementos que compõem a totalidade do método consiste no algoritmo de localização da fonte do AMT proposto. Para que esse algoritmo seja plenamente entendido, as relações entre as características dos sistemas elétricos e o comportamento esperado do fluxo de potência durante um AMT serão elucidadas com o objetivo de evidenciar os aspectos explorados. Uma vez conhecido os comportamentos típicos do fluxo de potência durante o evento, as lógicas condicionais do algoritmo são apresentadas.

Finalizando o capítulo, uma adaptação do fluxograma do método proposto é apresentada como uma possível alternativa de aplicação quando os sinais de corrente no PCC (*Point of Common Coupling*) de interesse também estiverem disponíveis.

3.2 Visão Geral do Localizador da Fonte do AMT

A busca pela solução das deficiências existentes nos métodos apresentados levou a adoção de uma abordagem completamente diferente para o problema da localização da fonte do AMT. Técnicas de comparação de informações entre dados medidos e simulados, utilização de equacionamentos analíticos resultantes de análises quantitativas ou a definição de valores de referência para tomada de decisão não foram consideradas neste trabalho, pois cada um destes procedimentos têm suas respectivas aplicações, vantagens e limitações.

Uma vez definido que nenhuma técnica já implementada seria utilizada, três desafios foram enfrentados para garantir o sucesso do método:

1. Ter bom desempenho e robustez na localização da fonte do AMT;
2. Utilizar lógica condicional para comparar os comportamentos do fluxo de potência monitorado com os padrões de comportamento esperados antes e durante o AMT;
3. Utilizar medições de tensão nos terminais primário e secundário de transformadores de potência instalados nas fronteiras entre sistemas elétricos para estimar o fluxo de potência.

O primeiro desafio foi estabelecer como o localizador poderia ter bom desempenho considerando: (i) os vários tipos de sistemas elétricos; (ii) as diferentes causas do AMT (tipos de falta, por exemplo) e; (iii) todas as principais condições de operação pré-AMT.

Análises qualitativas dos comportamentos dos sistemas elétricos frente ao AMT foram analisadas com o intuito de obter possíveis padrões de comportamentos comuns aos diversos tipos de sistemas elétricos considerados. O foco na análise qualitativa permitiu avaliar o comportamento do fluxo de potência na fronteira entre sistemas elétricos durante a ocorrência de um AMT. De fato existem diferentes padrões de comportamento do fluxo de potência considerando diversos tipos de sistemas elétricos e vários causadores do AMT. Tal análise qualitativa, avaliando a potência ativa e, sobretudo, a potência reativa durante o AMT, leva a conclusão de que não importa os valores exatos das grandezas, mas apenas informações se o fluxo de potência aumentou reduziu, inverteu ou não se alterou durante a transição da condição pré-AMT para a condição de AMT.

O segundo desafio foi exatamente escolher um procedimento capaz de atender as premissas citadas anteriormente. Diferentemente das técnicas já utilizadas, o método proposto utiliza lógica condicional para comparar os comportamentos do fluxo de potência monitorado com os padrões de comportamento esperados, resultando na localização da fonte do AMT. Tal ferramenta pode ser considerada simples e de fácil implementação, pois a lógica condicional, para este específico desenvolvimento, consiste em um conjunto de regras (equações) que relaciona o comportamento monitorado e o esperado para fluxo de potência antes e durante o evento, resultando, conseqüentemente, nos critérios de localização da fonte do AMT.

Partiu-se assim para resolver o terceiro desafio, ou seja, estimar o fluxo de potência a partir de medições apenas de tensão. Tal decisão foi tomada em função de duas premissas básicas: (i) não haveria necessidade de exatidão/ precisão dos valores monitorados do fluxo de potência na fronteira, pois a análise é qualitativa; (ii) medir apenas tensões pontuais iria facilitar em muito o desenvolvimento de dispositivos localizadores, principalmente para sistemas onde não existe disponibilidade de se medir corrente, evitando inclusive desenergização de carga.

As tensões medidas então associadas às informações de placa do transformador e alguns dados do sistema elétrico em questão, permitindo assim estimar as correntes que fluem pelo transformador e, conseqüentemente, estimar o fluxo de potência. Será mostrado que o grau de exatidão e precisão do fluxo de potência assim obtido é suficiente para garantir o bom desempenho do método. No entanto, vale ressaltar que o método, ora proposto, também pode ser aplicado caso as correntes no local estejam disponíveis para medições, como será visto posteriormente.

Uma vez estimado o fluxo de potência na fronteira, a lógica condicional é capaz de avaliar o comportamento qualitativo deste fluxo e localizar se a fonte do AMT está no sistema a montante ou a jusante do ponto de monitoramento.

O fluxograma da Figura 4 apresenta de forma detalhada a sequência do método desenvolvido. Este fluxograma é executado a cada amostra dos sinais de tensão, utilizando o conceito de janela deslizante. Na sequência, serão apresentados, em detalhes, os elementos que compõem o método.

3.3 Elementos que Compõem o Localizador da Fonte do AMT Desenvolvido

3.3.1 Medição e Cálculo dos Fasores de Tensão nos Terminais do Transformador de Fronteira

Conforme já mencionado, o método desenvolvido utiliza apenas sinais de tensão do sistema para estimar o fluxo de potência na fronteira monitorada. Este fluxo de potência complexa deve ser estimado para qualquer condição operacional. Logo, os possíveis desequilíbrios de tensão e corrente no sistema elétrico devem ser considerados. Conseqüentemente, os sinais de tensão de todas as fases devem ser obtidos para que os fasores de sequência positiva, negativa e zero sejam calculados em ambos os terminais do transformador, tanto antes quanto durante o AMT. Portanto, o método utiliza medição de seis sinais de tensão, conforme ilustrado na Figura 5.

A relação de transformação dos TPs é definida para o valor mais próximo da relação entre a tensão de fase e o valor normalizado no secundário (115V). No momento do AMT, o TP dificilmente apresentará erros de distorção do sinal secundário, pois afundamentos de tensão ocorrem na região linear da curva de saturação dos TPs. Essa característica garante que o fenômeno possa ser observado sem distorções. Com os níveis de tensões reduzidos, os sinais são convertidos para valores digitais através dos conversores Analógico-Digital (A/D). Cabe mencionar que a taxa de amostragem e a resolução do conversor A/D irá definir a capacidade de reprodução do sinal analógico medido.

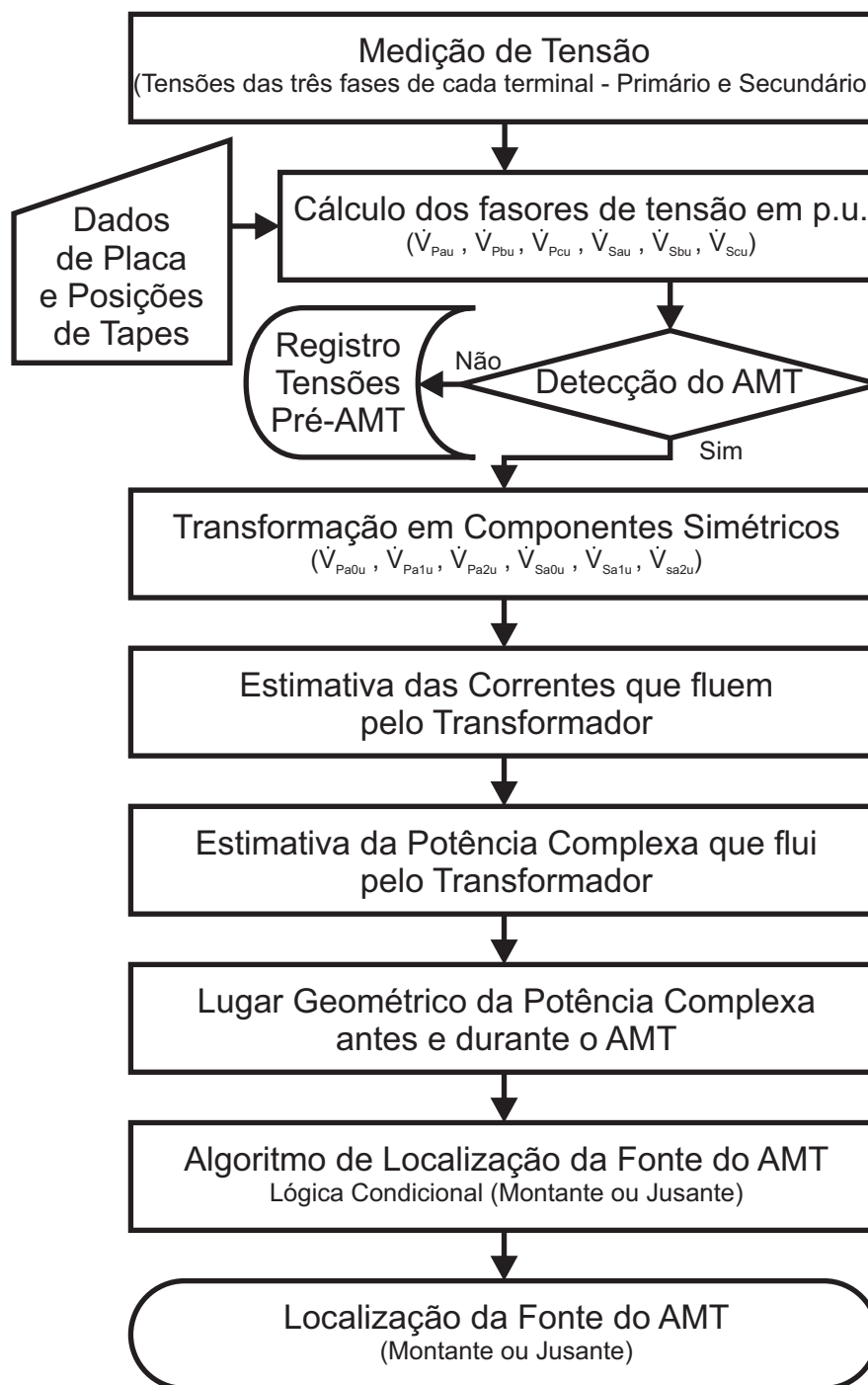


Figura 4 – Fluxograma do método de localização da fonte do AMT.

Os módulos e ângulos dos fasores de cada tensão são obtidos através de filtros digitais, os quais podem ser implementados em um *Digital Signal Processor* – DSP. Sabe-se que existem diversos algoritmos que realizam a obtenção do módulo e do ângulo de um sinal senoidal. Dentre eles, o algoritmo usando Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*) é amplamente utilizado (MACII; PETRI; ZORAT, 2012). O sucesso de tal algoritmo se dá pelo fato da facilidade de extração das informações dos diversos componentes harmônicos de um sinal distorcido utilizando poucas amostras ao

longo de um ciclo do sinal fundamental (PHADKE et al., 1979).

Para a aplicação proposta, basta a obtenção das componentes da frequência fundamental, consequentemente a implementação do algoritmo fica ainda mais simples. Sabendo-se que a DFT necessita de pelo menos um ciclo completo de aquisição para resultar nos valores de módulo e ângulo do sinal senoidal monitorado. Entretanto, buscando diminuir o tempo de resposta do algoritmo, a DFT de meio ciclo, foi adotada (YU; HUANG; JIANG, 2010) e (SIDHU; ZHANG; BALAMOUROUGAN, 2005). Assim, o processo de filtragem é capaz de informar o módulo e ângulo do sinal fundamental, após meio ciclo de processamento, sendo essa característica fundamental para observação de AMTs com duração mínima.

3.3.2 Detecção do AMT

O método obtém os valores eficazes das seis tensões para cada janela de dados deslizante. Assim que os limites que definem o AMT são violados (magnitude inferior a 0,9pu), os valores de módulo e ângulo de cada fase na condição pré-AMT mais recente são armazenados. Tal instante de tempo é considerado como a única condição anterior ao evento que foi detectado e, em tal caso, a condição de fluxo de potência pré-AMT é obtida levando em conta essas tensões armazenadas. Mais a frente, este fluxo pré-evento será usado como parte da metodologia.

A Figura 6 ilustra a dinâmica dos cálculos realizados pela DFT de meio ciclo para

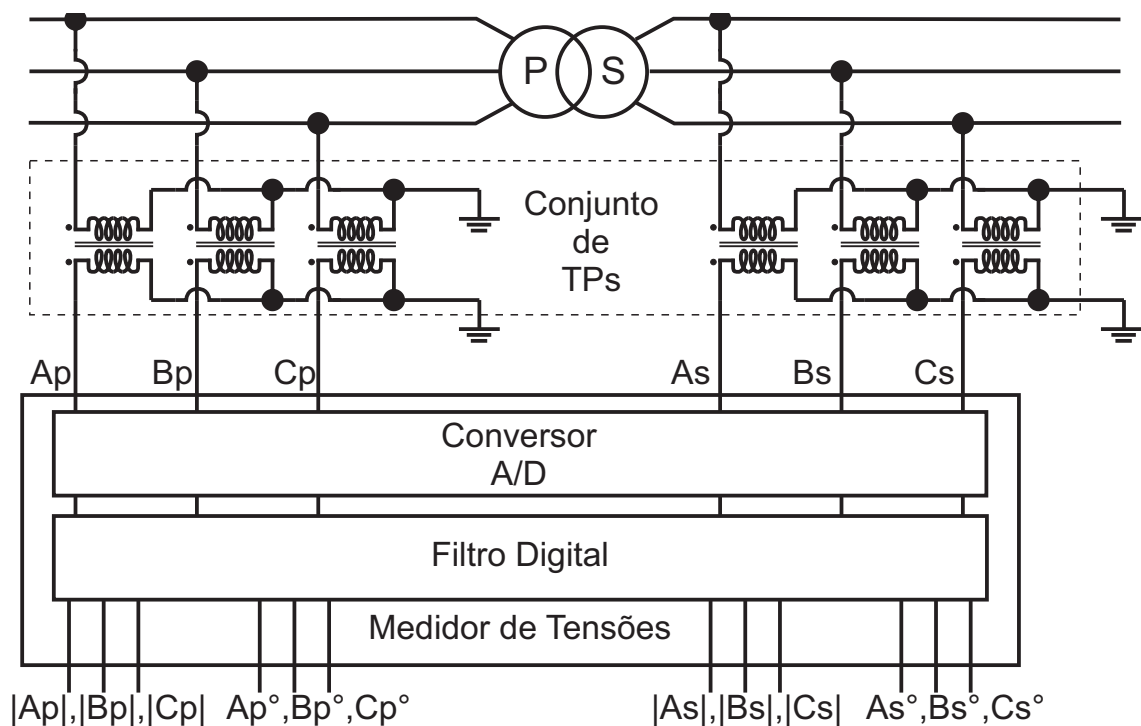


Figura 5 – Esboço de estrutura de medição necessária.

um caso exemplo de uma falta assimétrica, bem como o comportamento da detecção do AMT nas três fases monitoradas. Observa-se ainda o instante considerado pré-AMT para o qual as tensões são armazenadas (um ciclo anterior ao primeiro registro do afundamento). Cabe mencionar que, não havendo AMT, a cada passo de execução do algoritmo, apenas os valores dos sinais de tensão mais novos são armazenados, descartando-se os valores anteriores. Caso contrário, o método inicia o processo de transformação em componentes simétricos das tensões durante o evento, bem como as estimativas das correntes que fluem pela fronteira.

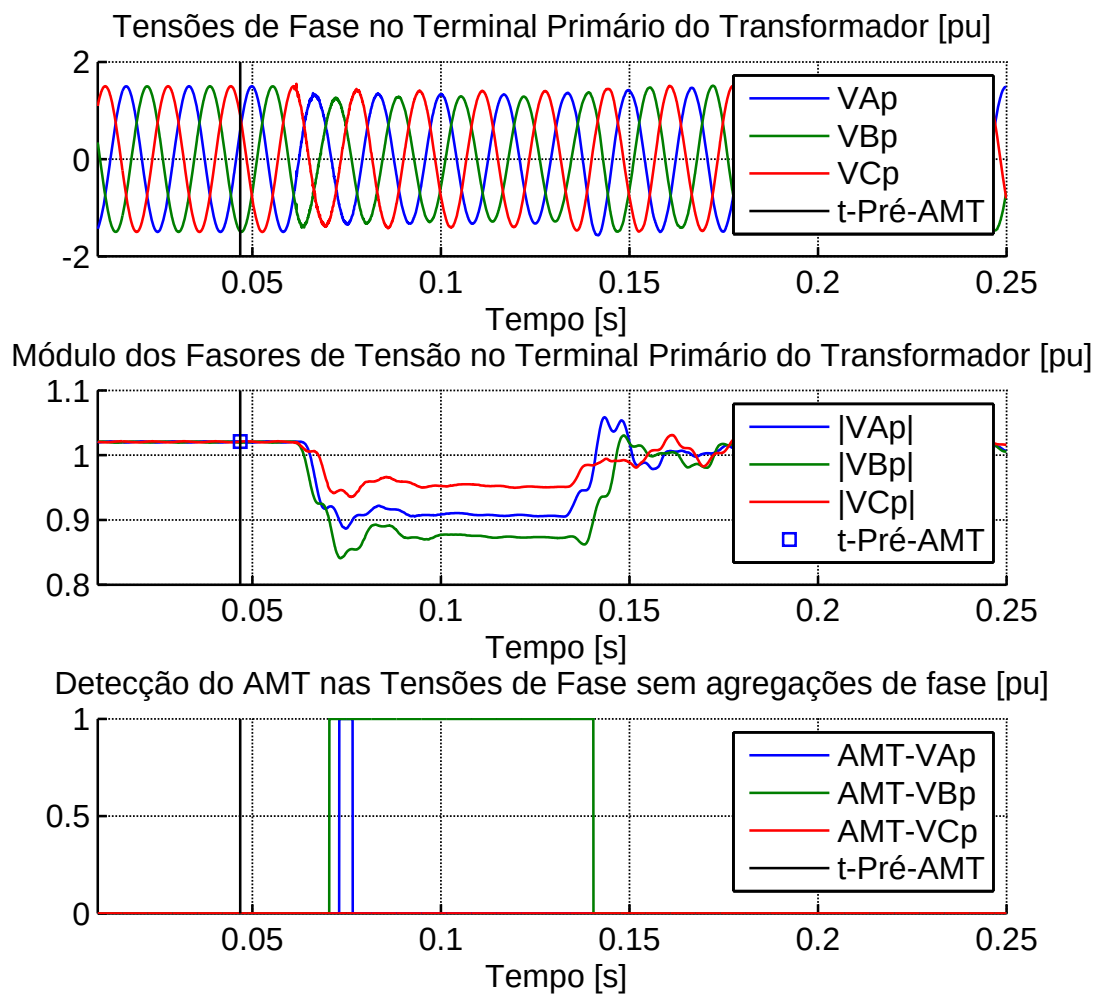


Figura 6 – Exemplo de medição das tensões no primário do transformador e detecção do AMT.

3.3.3 Transformação dos Fasores em Componentes Simétricos e Estimativa das Correntes que fluem pelo Transformador

Os fasores de tensão dos lados primário e secundário do transformador no domínio das fases são transformados para os modos de sequência (componentes simétricos). Para relacionar grandezas de tensões e correntes dos lados primário e secundário do transformador, quando existir defasamento angular, é imprescindível utilizar o modelo em componentes simétricos que consiste em representar o transformador através de três modelos independentes: sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. A Figura 7 apresenta os modelos em componentes simétricos (valores em pu), considerando como base os dados de placa do transformador de fronteira.

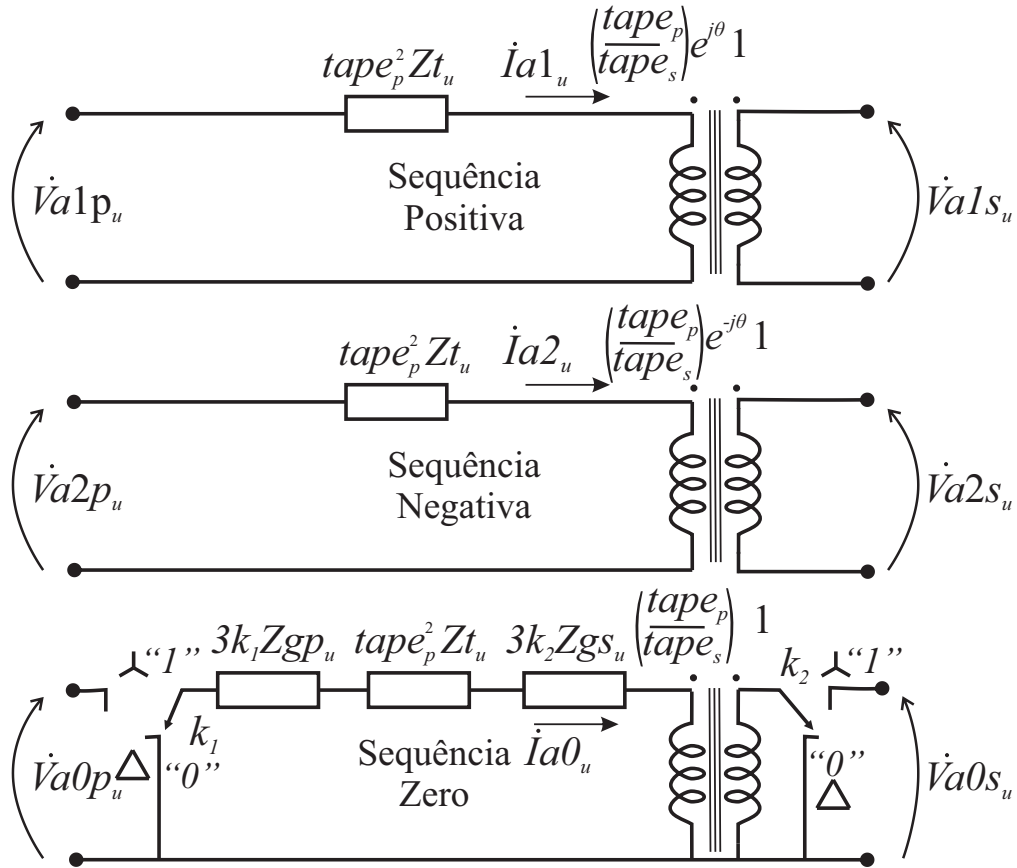


Figura 7 – Modelo de transformador em componentes simétricos utilizado para a estimativa das correntes em componentes simétricos

$(\dot{V}a1p_u, \dot{V}a2p_u$ e $\dot{V}a0p_u)$ são, respectivamente, os fasores de tensão de fase de seqüência positiva, negativa e zero do lado primário do transformador. $(\dot{V}a1s_u, \dot{V}a2s_u$ e $\dot{V}a0s_u)$ são, respectivamente, os fasores de tensão de fase de seqüência positiva, negativa e zero do lado secundário do transformador e são obtidos pela transformação em componentes simétricos dos fasores medidos. $(\dot{I}a1_u, \dot{I}a2_u$ e $\dot{I}a0_u)$ são fasores estimados de corrente de seqüência positiva, negativa e zero que fluem pelo transformador, todos em p.u. (Z_{t_u}, Z_{gp_u}

e Zgs_u) são as impedâncias do transformador e do aterramento de neutro do primário e secundário, respectivamente, em p.u. Os parâmetros ($tape_p$ e $tape_s$) são os valores de tape em relação à posição nominal no primário e secundário do transformador e θ o ângulo do defasamento angular devido ao tipo de conexão do transformador em radianos. Finalmente, k_1 e k_2 são constantes que recebem os valores de “0” ou “1” de acordo com o conexão do transformador. Para conexões em delta utiliza-se (“0”) e para conexões em estrela utiliza-se (“1”).

As informações de módulo e ângulo da impedância total do transformador e as constantes que definem o fechamento do transformador podem ser obtidas pelos dados da placa do equipamento. A relação X/R do transformador não é comumente disponibilizada na placa de identificação, entretanto, o método permite a utilização de dados típicos, sem perder a sua robustez. Por sua vez, as informações da posição dos tapes podem ser adicionadas continuamente considerando as possíveis variações dinâmicas para os casos de transformadores com mudança de tape sob carga. Cabe mencionar que o modelo do transformador em componentes simétricos utilizado não considera o ramo magnetizante, pois pequenos valores da corrente de magnetização acarretam erros muito pequenos na estimativa das correntes (PASSOS; FILHO, 2014). Esses erros são tolerados devido à robustez resultante da análise qualitativa proposta pelo método.

Uma vez definidos os modelos de circuito elétrico do transformador e conhecidos os fasores de tensão em componentes simétricos de ambos os terminais, as correntes de sequência positiva, negativa e zero são estimadas conforme as equações (3.1), (3.2) e (3.3), respectivamente.

$$\dot{I}a1_u = \frac{\left(\dot{V}a1p_u - \left(\frac{tape_p}{tapes}\right) e^{j\theta} \dot{V}a1s_u\right)}{tape_p^2 Zt_u} \quad (3.1)$$

$$\dot{I}a2_u = \frac{\left(\dot{V}a2p_u - \left(\frac{tape_p}{tapes}\right) e^{-j\theta} \dot{V}a2s_u\right)}{tape_p^2 Zt_u} \quad (3.2)$$

$$\dot{I}a0_u = \frac{\left(k_1 \cdot \dot{V}a0p_u - k_2 \left(\frac{tape_p}{tapes}\right) \dot{V}a0s_u\right)}{\left(3k_1 \cdot Zgp_u + tape_p^2 Zt_u + 3k_2 \cdot Zgs_u\right)} \quad (3.3)$$

A precisão e exatidão do cálculo das correntes em componentes simétricos dependem da exatidão e precisão das grandezas envolvidas no modelo do transformador e, assim como, das medições das tensões no primário e secundário do mesmo. Vale destacar porém, que este método de localização da fonte do AMT foi desenvolvido para considerar essas incertezas nas estimativas do fluxo de potência.

3.3.4 Estimativa da Potência Complexa que flui pelo Transformador

A potência complexa trifásica é composta pelas potências aparentes de cada fase do circuito. Se o sistema for desequilibrado, cada fase poderá ter valores de potência aparente diferentes em módulo e ângulo. Considerando que os fasores de tensão medidos e as correntes estimadas estão em componentes simétricos, a estimativa da potência complexa ($S3\phi_u$) que flui pelo transformador de fronteira pode ser calculada por (3.4).

$$S3\phi_u = 3 \left(k_1 \dot{V}a0p_u \cdot \dot{I}a0_u^* + \dot{V}a1p_u \cdot \dot{I}a1_u^* + \dot{V}a2p_u \cdot \dot{I}a2_u^* \right) \quad (3.4)$$

É importante destacar que a equação (3.4) utiliza as tensões e correntes do lado primário do transformador na fronteira, ou seja, no método proposto a potência calculada é aquela que flui pelo terminal primário. Entretanto, dependendo do fechamento do enrolamento primário (delta ou estrela, com ou sem aterramento de neutro), poderá existir ou não fluxo de potência de sequência zero. Isso justifica a inserção da constante k_1 na equação 3.4.

3.3.5 Lugar Geométrico da Potência Complexa que flui pelo Transformador

O método proposto utiliza o comportamento do fluxo da potência complexa para localizar a fonte do AMT. Portanto é importante a compreensão do lugar geométrico dessa variável no plano complexo, a qual é a melhor forma para se avaliar o comportamento do fluxo num determinado instante de tempo. Através desse tipo de representação, informações como a intensidade e o sentido dos fluxos de potência ativa e reativa são observadas de forma imediata e compreensível. Deve-se lembrar que o valor da potência complexa estimada usando (3.4) é obtido em p.u., cuja representação no plano complexo é uma região correspondente a uma circunferência centrada na origem e com raio unitário, conforme mostra a Figura 8.

A potência complexa que flui pelo transformador pode ter qualquer valor de módulo e ângulo e estar situada em qualquer um dos quatro quadrantes, representando fluxos ativos e reativos importados ou exportados. Por convenção, será considerada potência ativa exportada quando a mesma estiver fluindo do primário para o secundário do transformador na fronteira (sentido jusante), estando tal potência nos quadrantes 1° ou 4° . Por outro lado, será considerada potência ativa importada (presente nos quadrantes 2° ou 3°) quando a mesma estiver fluindo do secundário para o primário (sentido montante). Também por convenção, será considerada potência reativa indutiva exportada (1° e 2° quadrantes) quando ela estiver no sentido primário para secundário (sentido jusante), e, do mesmo modo, a potência reativa indutiva será importada (3° e 4° quadrantes) quando este fluxo estiver no sentido secundário para primário (sentido montante). Por sua vez, a potência reativa capacitiva é oposta à potência reativa indutiva. Portanto, se for avaliado

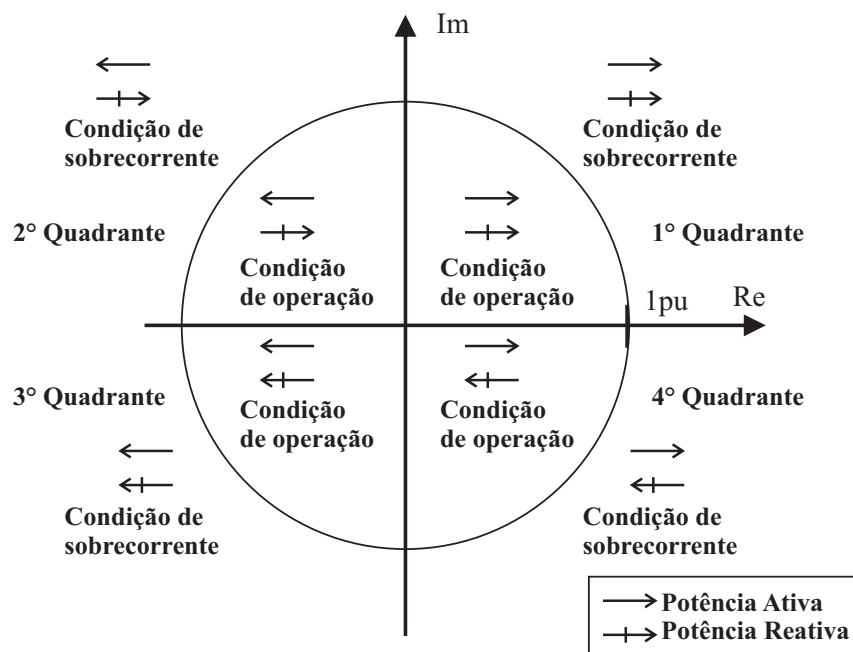


Figura 8 – Lugar geométrico da potência complexa - Regiões de operação

o comportamento da potência reativa capacitiva, deve-se considerar o comportamento contrário em relação à indutiva. Devido ao fato dos sistemas serem predominantemente indutivos, a potência reativa indutiva tem sido adotada.

Os transformadores em geral trabalham em condições de operação dentro dos limites nominais (região dentro da circunferência), as quais, potências ativas e reativas indutivas podem fluir em ambos os sentidos (montante e jusante), associadas diretamente aos limites de fator de potência praticados. A Figura 9 destaca as possíveis regiões de operação para os quatro quadrantes, considerando como limites de operação os fatores de potência indutivo ou capacitivo igual a 0,92. Na Figura 9, representou-se também, a título de exemplo, o fluxo de potência complexa corresponde a 75% da potência nominal e um fator de potência de 0,98 indutivo, com potência ativa e reativa exportadas (sentido primário para o secundário).

3.3.6 Algoritmo de Localização da Fonte do AMT

O princípio básico de funcionamento do algoritmo consiste na avaliação do comportamento da potência complexa antes da detecção do AMT e durante a ocorrência do mesmo. Desse modo, um conjunto de lógicas condicionais permite que o algoritmo seja capaz de avaliar o comportamento do fluxo de potência durante o AMT, e localizando a sua origem com base nos possíveis comportamentos esperados para fluxo de potência durante o AMT. A Figura 10 apresenta o conceito geral do algoritmo.

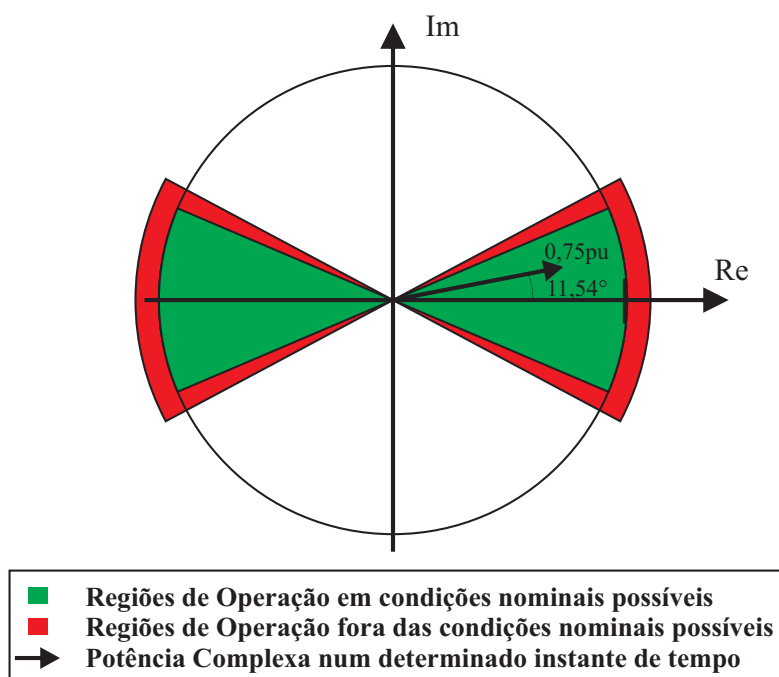


Figura 9 – Lugar geométrico da potência complexa - Regiões de operação típicas

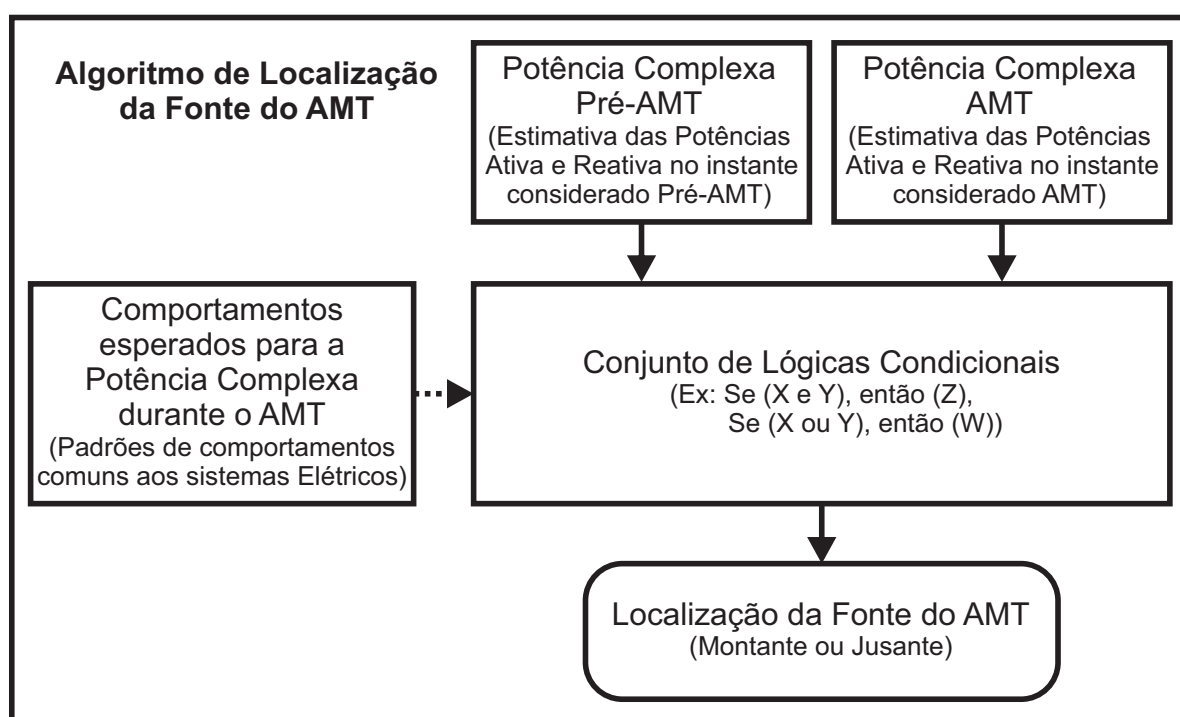


Figura 10 – Conceito geral do algoritmo de localização da fonte do AMT.

3.3.6.1 Comportamentos Esperados para o Fluxo de Potência Complexa durante o AMT

O conjunto de lógicas condicionais foi definido após a observação do comportamento do fluxo de potência durante o AMT para vários cenários, considerando diversas

combinações de sistemas elétricos e diferentes condições de faltas (tipo e local).

Sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica têm características estruturais e de operação bem distintas de sistemas industriais. Em geral, sistemas de transmissão são malhados, interligando os diversos parques de geração hidráulica, térmica e mais recentemente os complexos eólicos. Máquinas síncronas, transformadores de potência e linhas de transmissão são as principais partes integrantes desse tipo de sistema. Os sistemas são predominantemente equilibrados e o comportamento dinâmico é diretamente influenciado pelas dinâmicas das máquinas rotativas (máquinas síncronas) quando ocorrem transitórios (SCHLABBACH; ROFALSKI, 2014).

Os sistemas de subtransmissão e distribuição têm características semelhantes aos sistemas de transmissão, entretanto são geralmente radiais. A fonte é conectada à carga através de circuito radial, podendo existir cogeração junto ao sistema do consumidor. As cargas passam a ter comportamento de impedância constante e de potência constante combinadas. As dinâmicas das máquinas rotativas (Motores de Indução Trifásicos - MITs) e dos dispositivos baseados em eletrônica de potência passam a ter maior relevância no comportamento transitório do sistema.

Em sistemas industriais as cargas são compostas na maioria por MITs conectados diretamente na rede ou através de dispositivos de eletrônica de potência (inversores de frequência). O comportamento dinâmico está diretamente ligado ao comportamento das diversas cargas. A cogeração pode existir, mas não é predominante.

O comportamento do fluxo de potência durante um AMT causado por falta depende do local e tipo de falta, da topologia do sistema elétrico e das características dos elementos que o compõem (fontes e cargas ativas e passivas). Lembrando que o localizador desenvolvido pode estar na fronteira entre sistemas com mesmas características elétricas ou características completamente distintas. A Figura 11 (c) e (d) mostra o comportamento esperado do fluxo de potência na fronteira quando ocorre uma falta trifásica a jusante num sistema similar aquele representado na Figura 3, que exemplifica uma fronteira entre os sistemas de transmissão e distribuição típicos.

É possível observar que existe um caminho percorrido pelo lugar geométrico na transição da condição pré-AMT para a condição AMT. Dois instantes de tempo são destacados. O primeiro representa a condição pré-AMT e o segundo a condição durante o AMT, considerando a execução do método na janela deslizante. Nesse exemplo, verifica-se que o fluxo de potência pré-AMT está no 1º quadrante (exportando potência ativa e reativa) e durante o AMT ocorre aumento na potência reativa e redução na potência ativa. Esse comportamento é típico quando a falta ocorre no lado jusante, com existência de fontes apenas no sistema a montante. O aumento na potência reativa ocorre devido à predominância indutiva do curto-circuito. Pode-se afirmar que, para a maioria dos casos, sempre que a fronteira estiver entre o ponto de falta e uma fonte, acontecerá

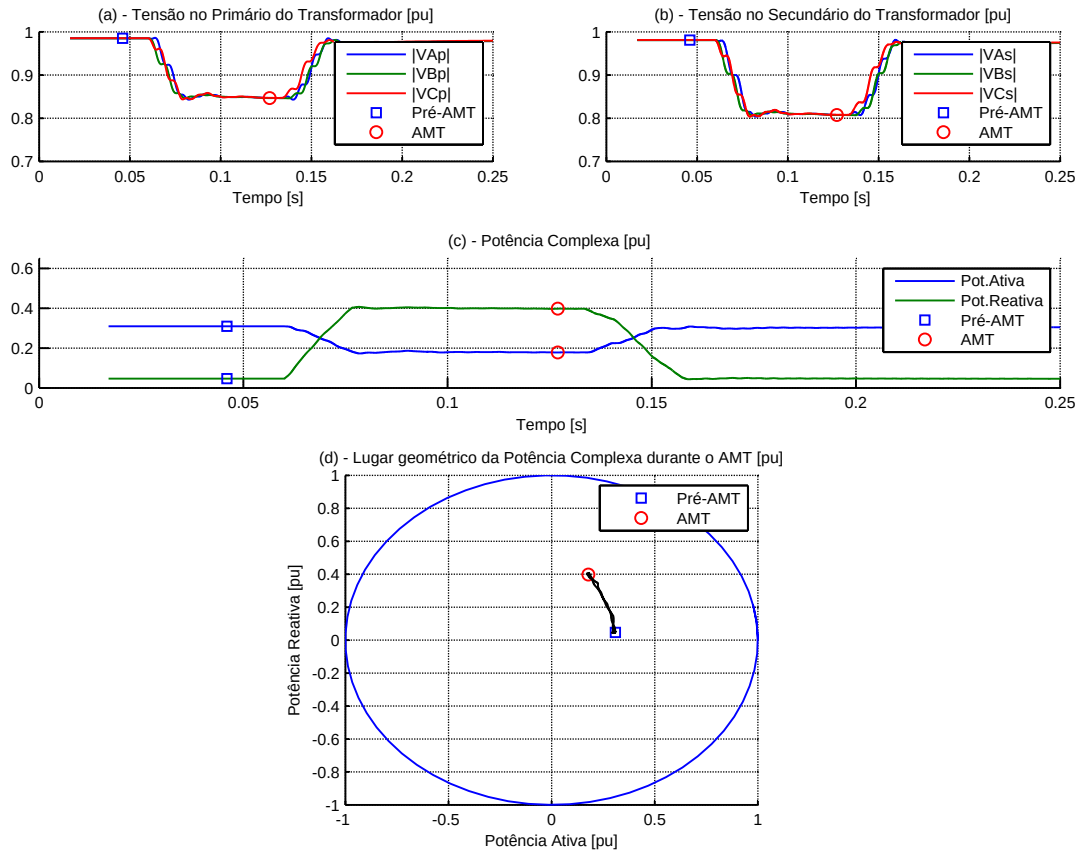


Figura 11 – Comportamento típico da potência complexa durante o AMT - (a) e (b) - Tensões nos terminais primário e secundário do Transformador, respectivamente, (c) - Comportamento da Potência Complexa ao longo do tempo, (d) - Comportamento do Lugar geométrico da Potência Complexa ao longo do tempo

aumento na potência reativa em direção ao ponto de falta (origem do AMT). Portanto, independentemente do sistema elétrico envolvido, do tipo de falta e do fluxo de potência pré-AMT, a potência reativa aumentará nos quadrantes 1° e 2° quando as faltas estiverem localizadas no sistema jusante e, por sua vez, aumentará dentro dos quadrantes 3° e 4° para faltas no sistema a montante. O mesmo padrão não pode ser afirmado para o comportamento da potência ativa. Dependendo do sistema elétrico e das características das cargas envolvidas, pode ocorrer variações no fluxo de potência ativa. As diversas possibilidades para os comportamentos descritos estão ilustradas na Figura 12.

Sabe-se que diferentes tipos de falta influenciam na intensidade do fluxo de potência. Por exemplo, faltas trifásicas simétricas resultam num maior fluxo de potência do que faltas monofásicas. Essas possíveis diferenças poderiam influenciar nos resultados, entretanto, considerando que o método é qualitativo e os AMTs acontecem devido ao aumento do fluxo de potência, a localização da fonte do AMT é geralmente alcançada. Outro comportamento típico da potência complexa na fronteira é exemplificado na Figura 13. Esse caso considera

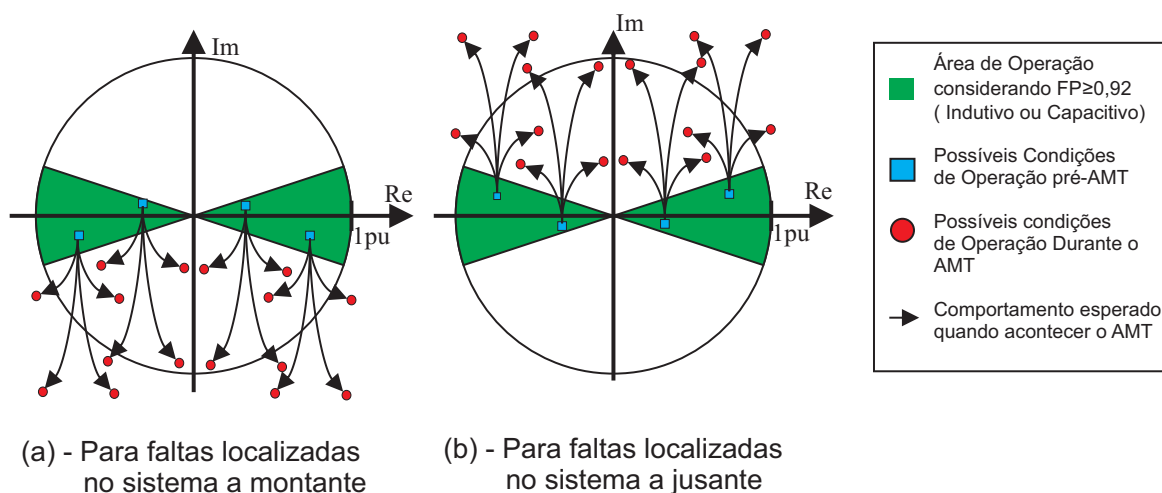


Figura 12 – Possíveis comportamentos do lugar geométrico da potência complexa durante o AMT para sistemas com fontes ativas em ambos os lados da fronteira.

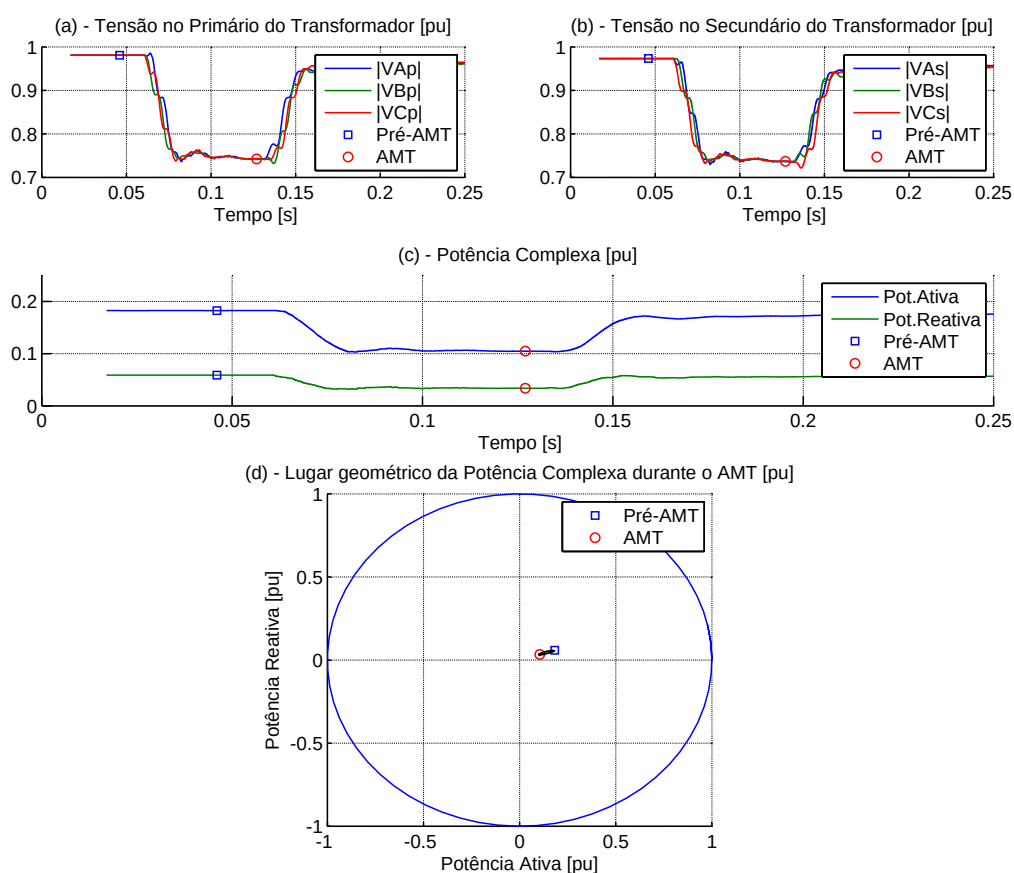


Figura 13 – Comportamento típico da potência complexa durante o AMT para falta a montante - (a) e (b) - Tensões nos terminais primário e secundário do Transformador, respectivamente, (c) - Comportamento da Potência Complexa ao longo do tempo, (d) - Comportamento do Lugar geométrico da Potência Complexa ao longo do tempo.

o circuito representado na Figura 14, onde existe apenas fonte no sistema a montante e a falta trifásica ocorre entre a fonte e a fronteira monitorada.

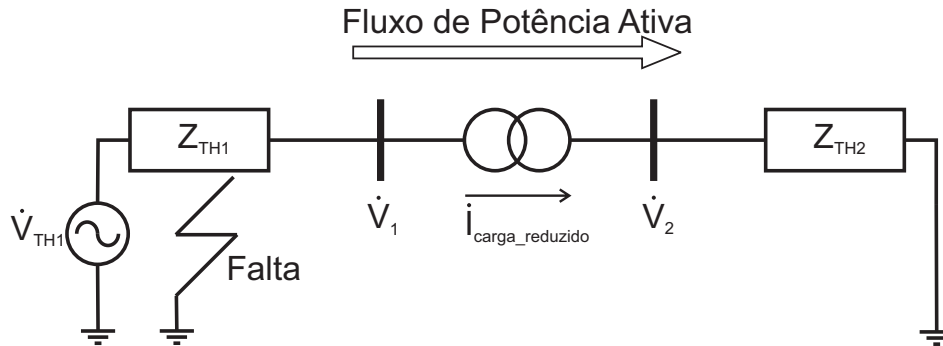


Figura 14 – Circuito elétrico básico com apenas fonte no lado a montante.

É possível identificar que existe redução no fluxo de potência ativa e reativa na fronteira. Isso se deve ao fato de que o único fluxo de potência pela fronteira é aquele demandado pela carga. Se a carga no sistema a jusante se caracterizar por impedância constante, ocorrerá uma redução proporcional ao quadrado do nível de tensão durante o AMT. Portanto, o comportamento esperado da potência complexa para esses casos, consiste na redução da potência complexa em direção à origem do plano complexo. O mesmo raciocínio vale quando há uma única fonte no sistema a jusante e ocorre falta entre a fonte e a fronteira monitorada. A condição do fluxo de potência pré-AMT pode estar em qualquer quadrante, pois o fluxo se direcionará para a origem do plano complexo. As diversas possibilidades para o comportamento descrito anteriormente estão ilustradas na Figura 15.

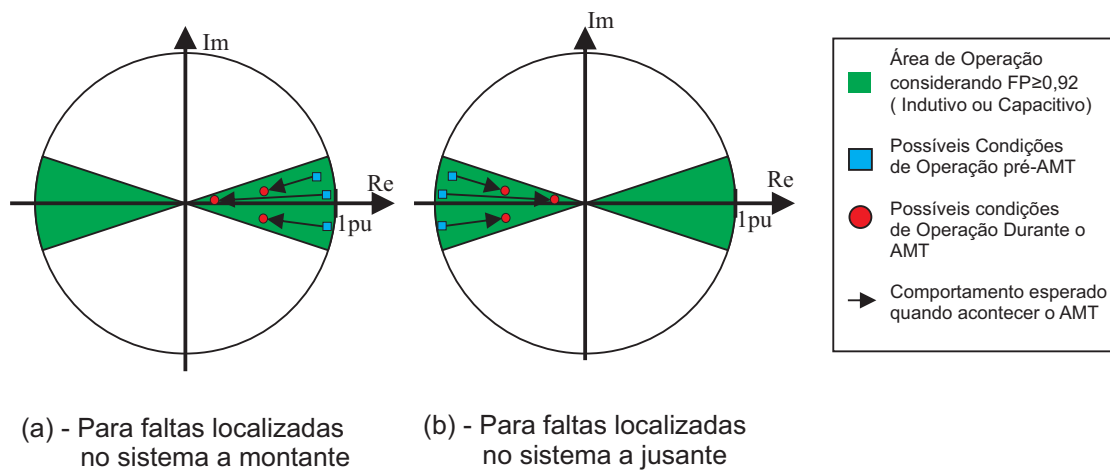


Figura 15 – Possíveis comportamentos do lugar geométrico da potência complexa durante o AMT para sistemas com fonte em apenas um dos lados da fronteira.

A maioria dos sistemas elétricos reage ao AMT conforme os comportamentos do fluxo de potência complexa ilustrados nas Figura 12 e 15. Portanto, tais possíveis comportamentos foram utilizados para a criação do conjunto de lógicas condicionais capazes de localizar a fonte do AMT. Entretanto, existem alguns poucos casos diferentes, considerados atípicos. Antes de apresentar a solução para localizar a fonte do AMT para essas exceções, é importante o entendimento do comportamento do fluxo de potência para alguns equipamentos específicos, assim como, o entendimento de tais casos com comportamento atípico e os motivos para os quais eles se tornam atípicos.

3.3.6.2 Comportamento do Fluxo de Potência - Equipamentos Específicos e Casos Atípicos

O sistema representado na Figura 14 é muito comum, pois representa grande parte dos sistemas elétricos compostos por concessionária alimentando o cliente industrial sem cogeração. Assim, através de uma breve análise, ao acontecer uma falta a montante da fronteira entre a concessionária e a indústria, o comportamento previsto para o fluxo de potência complexa corresponderia ao comportamento ilustrado pelas possibilidades da Figura 15 (a). Essa afirmação poderia ser um padrão caso a característica tipo impedância constante fosse predominante nas cargas da indústria. Porém, na maioria dos casos, as indústrias possuem MITs, sendo estes caracterizados como cargas do tipo potência constante. Na verdade, o comportamento do fluxo de potência dependerá diretamente do comportamento dos MITs e de seus respectivos sistemas de acionamento. Portanto, a análise do comportamento esperado nestes caso pode resultar em particularidades. Considerando que os MITs sejam conectados diretamente ao sistema através de contadores ou disjuntores, dependendo da potência do motor e da carga mecânica acionada, o fluxo de potência ativa pode ficar constante ou diminuir durante o AMT. O mesmo não acontece com a potência reativa, pois, em geral, ocorre redução de reativo consumido pelo MIT durante o AMT. Por outro lado, cada vez mais, acionamentos controlados baseados em sistemas eletrônicos são utilizados na indústria. Na maioria dos casos de acionamentos de motores de pequeno e médio porte, quando ocorre o AMT com certa severidade, por segurança, o sistema eletrônico desliga o acionamento, resultado na redução repentina da potência consumida pelo motor (PEDRA; CORCOLES; SUELVE, 2005) e (LEE; VENKATARAMANAN; JAHNS, 2008). Esse efeito vai ao encontro do comportamento padrão ilustrado pela Figura 15 (a). Entretanto, outro fenômeno associado aos MITs pode ser aqui destacado. Sabe-se que durante os primeiros ciclos de um AMT (causado por falta) o MIT se comporta como um gerador fornecendo potência reativa para o ponto de falta. Assim, durante os primeiros ciclos do AMT, o sistema industrial se comporta como se tivesse cogeração. Para tais casos, o comportamento esperado corresponde às possibilidades ilustradas na Figura 12.

Um dos casos atípicos de comportamento do fluxo de potência na fronteira considerada, consiste na combinação de faltas eletricamente distantes e sistemas malhados.

Sendo o sistema malhado, ao acontecer uma falta distante capaz de causar AMT, em geral, o mesmo será considerado raso. Essa pequena variação de tensão nos barramentos do transformador de fronteira e a possibilidade do fluxo de potência fluir por outros caminhos do sistema malhado podem resultar num comportamento atípico do fluxo de potência durante o AMT registrado.

Outro fenômeno atípico consiste na possível maior redução no fornecimento de reativo por um banco de capacitores ligado a um barramento durante o AMT em relação à redução do consumo de reativo de todas as cargas indutivas deste mesmo barramento. Caso isso aconteça, o saldo do fluxo de potência reativa indutiva consumida pelo barramento será maior durante o AMT do que na condição pré-AMT. Essa possibilidade é rara, pois em geral, os sistemas elétricos são predominantemente indutivos.

É importante destacar que erros inerentes ao processo de estimação baseado nas medições de tensão e dados de placa do transformador podem ocorrer. Sabe-se que as informações existentes na placa do transformador são obtidas de ensaios na fábrica e que nem sempre expressam os reais parâmetros do equipamento. Assim como, com o passar do tempo, as características elétricas sofrem alterações devido aos diversos esforços mecânicos, térmicos e elétricos. Outra fonte de erro no processo de estimação consiste nos erros associados à classe de exatidão dos transformadores de potencial (TPs) utilizados. Considerando os diversos erros durante o processo de estimação da potência complexa, Passos e Filho (2014) realizaram uma análise de erro contemplando variações de 10% na impedância do transformador e de 1,2% nas tensões monitoradas e verificaram que erros associados a impedância do transformador não acarretam em grandes erros na estimação da potência complexa. Apenas os erros relacionados a medição de tensão provocam relevantes variações na potência complexa estimada. Entretanto, considerando que os erros aplicados são muito maiores que os erros dos TPs, a estimação baseada nas medições de tensão são suficientes para a análise qualitativa realizada pelo método de localização do AMT desenvolvido. Variações de tape dos transformadores são contempladas pelo método ao considerar as posições do tape do primário e do secundário do transformador como dados de entrada. Sabe-se que a utilização dessas informações pelo algoritmo não são triviais, entretanto possíveis.

3.3.6.3 Conjunto de Lógicas Condicionais

O conjunto de lógicas condicionais foi definido para localizar a fonte do AMT considerando os comportamentos típicos esperados do fluxo de potência durante o evento, assim como, para os casos particulares de comportamento já descritos. O conjunto de lógicas condicionais é composto pelas equações (3.5) a (3.11).

$$QD = [(Q > 0) \cdot (QP \geq 0)] + [(Q < 0) \cdot (QP \leq 0)] \quad (3.5)$$

$$M1 = (PP \geq 0) \cdot (|Q| < |QP|) \cdot QD \quad (3.6)$$

$$J1 = (PP \leq 0) \cdot (|Q| < |QP|) \cdot QD \quad (3.7)$$

$$M2 = \overline{J1} \cdot (\Delta Q < 0) \quad (3.8)$$

$$J2 = \overline{M1} \cdot (\Delta Q > 0) \quad (3.9)$$

$$M = M1 + M2 \quad (3.10)$$

$$J = J1 + J2 \quad (3.11)$$

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 de AMT;
- (QD) é a variável booleana que indica não transição da potência reativa;
- $(M1)$ é a primeira variável booleana que indica fonte do AMT a montante. Representa a condição com apenas uma fonte no sistema, ou seja, se a potência ativa está sendo exportada para o lado jusante, a potência reativa diminui e não acontece transição, concluindo-se que a fonte do AMT está do lado montante;
- $(J1)$ é a primeira variável booleana que indica fonte do AMT a jusante. Representa a condição com apenas uma fonte no sistema, ou seja, se a potência ativa está sendo importada para o lado montante, a potência reativa diminui e não acontece transição, concluindo-se que a fonte do AMT está do lado jusante;
- $(M2)$ é a variável booleana que garante que a falta aconteceu a montante devido ao aumento do valor negativo da potência reativa e garantindo que a condição prevista por $J1$ não aconteceu;

- $(J2)$ é a variável booleana que garante que a falta aconteceu a jusante devido ao aumento do valor positivo da potência reativa, garantindo ainda que a condição prevista por $M1$ não aconteceu;
- (M, J) variáveis booleanas que indicam localização da fonte do AMT a montante ou a jusante, respectivamente.

A relação entre as grandezas e equações do algoritmo de localização da fonte do AMT pode ser melhor compreendida através da ilustração da Figura 16.

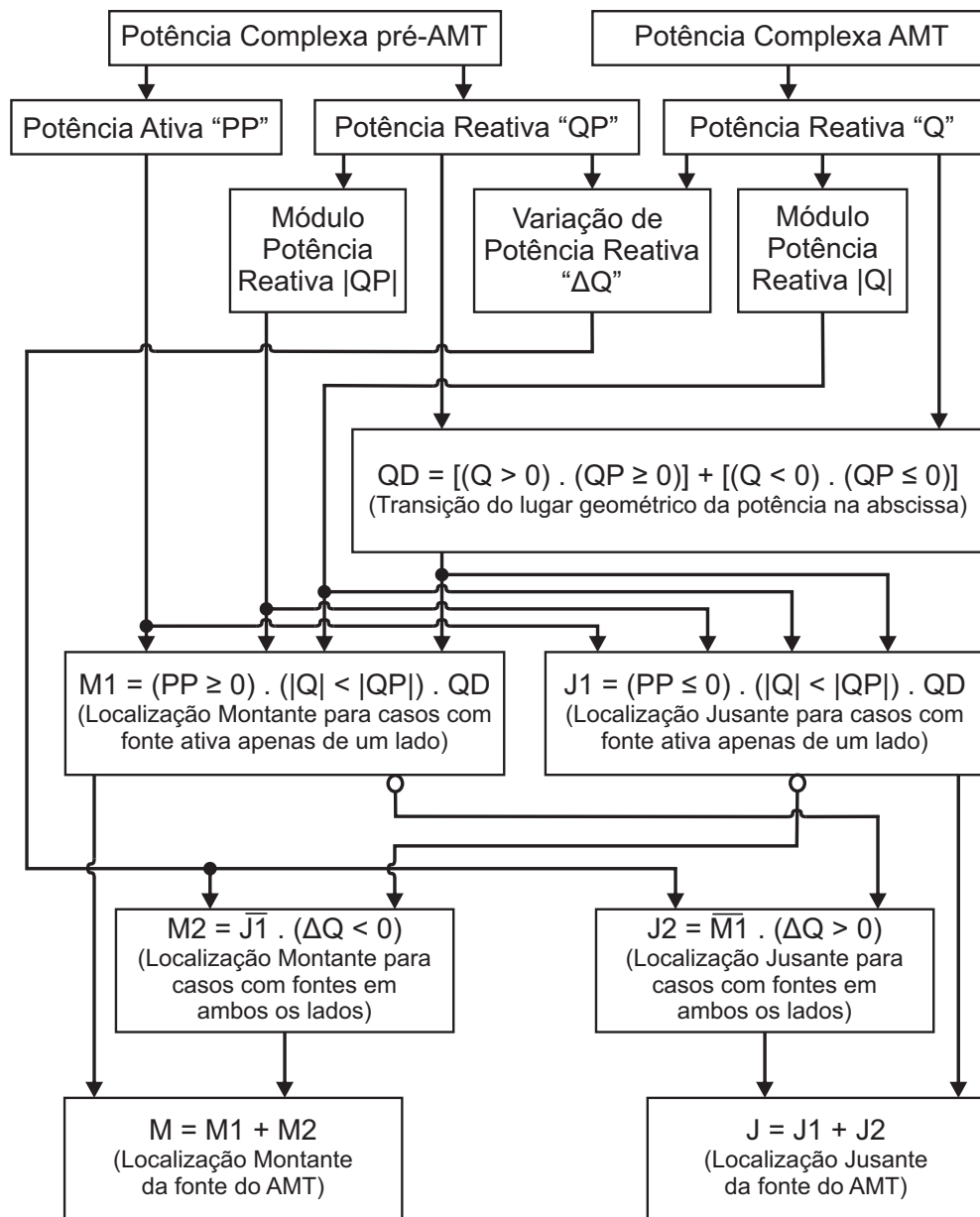


Figura 16 – Relação entre grandezas e equações do algoritmo de localização da fonte do AMT desenvolvido.

O algoritmo utiliza a potência complexa pré-AMT para obter as potências ativa e reativa. O comportamento da potência ativa durante o AMT é imprevisível, portanto,

apenas a potência reativa durante o AMT é utilizada pelo algoritmo. Os módulos das potências reativas antes e durante o AMT são calculados, assim como a variação da potência reativa antes e durante o AMT. O algoritmo verifica a transição ou não do lugar geométrico da potência no eixo da abscissa, ou seja, verifica se não aconteceu inversão de sentido do fluxo de reativo durante o AMT. Essa verificação é fundamental para o bom desempenho do método, pois permite que o algoritmo reconheça se existe ou não fonte de ambos os lados do sistema. Caso ocorra inversão no fluxo de reativo monitorado, provavelmente existirão fontes em ambos os lados da fronteira. Isso garante que o comportamento esperado seja corretamente considerado. Neste caso, as equações (3.6) e (3.7) ou as equações (3.8) e (3.9) são utilizadas. Se durante o AMT não ocorrer inversão de reativo, o algoritmo avalia o fluxo de potência ativa pré-AMT e a redução ou não do fluxo de reativo. Essa avaliação permite ao algoritmo localizar a fonte do AMT considerando o comportamento ilustrado pelas possibilidades apresentadas na Figura 15. Se acontecer inversão de fluxo de reativo ou o comportamento monitorado não for semelhante às possibilidades da Figura 15, o algoritmo apenas avalia se ocorreu aumento de reativo nos quadrantes 1° e 2° ou nos quadrantes 3° e 4° para localizar o AMT. Se o fluxo de reativo aumentar durante o AMT nos 1° ou 2° quadrantes, a fonte do AMT é localizada a jusante, por outro lado, se o fluxo de reativo aumentar durante o AMT nos 3° e 4° quadrantes, localiza a fonte do AMT a montante da fronteira.

Para melhor ilustrar as possibilidades de comportamento retratados nas equações condicionais (3.5) a (3.11), são apresentados na Figura 17 os comportamentos esperados para a ocorrência de falta a montante da fronteira. Já, na Figura 18, são ilustradas as possibilidades de comportamento para faltas localizadas a jusante da fronteira.

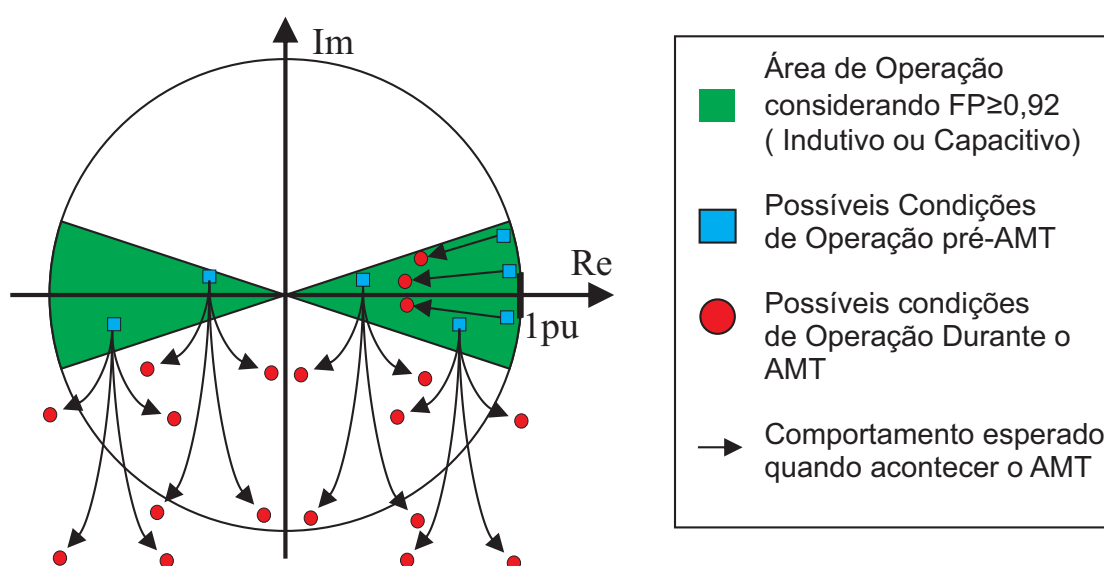


Figura 17 – Possibilidades de comportamento esperado para faltas localizadas a montante da fronteira.

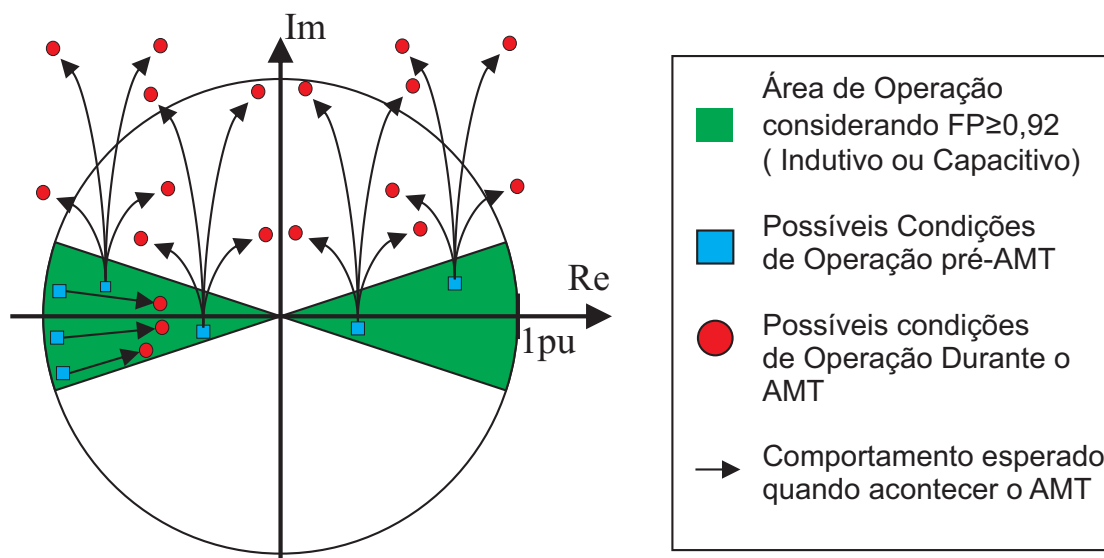


Figura 18 – Possibilidades de comportamento esperado para faltas localizadas a jusante da fronteira.

3.4 Alternativa para o Método Desenvolvido quando sinais de Tensão e Corrente estão Disponíveis

O método desenvolvido para localizar a fonte do AMT apresentado nesta tese considera como premissa a utilização apenas de sinais de tensão nos terminais de transformadores de fronteira. A robustez alcançada no desenvolvimento do método permitiu a utilização de informações do fluxo de potência estimado através dos sinais de tensão e dados de placa do transformador. Sem avaliar os méritos e vantagens dessa abordagem, vale destacar que o método proposto também pode ser implementado a partir de medições de tensão e de corrente. Basicamente, a alternativa consiste em substituir todos os elementos utilizados para estimar a corrente e, conseqüentemente, o fluxo de potência na fronteira, pela medição das tensões e corrente e o cálculo direto do fluxo de potência. Neste caso, o fluxograma correspondente é apresentado na Figura 19.

É importante destacar que esse método alternativo representado no fluxograma da Figura 19 não será avaliado nesta tese. Entretanto, espera-se que o desempenho seja igual ou superior ao método implementado, dado que o fluxo de potência obtido por medição tem maior exatidão que o fluxo de potência estimado. Para isso, as medições de corrente devem ser obtidas a partir de Transformadores de Corrente (TCs) de proteção visando minimizar problemas associados à saturação devido às correntes de curto-circuito.

O método proposto torna-se genérico, permitindo utilizar correntes estimadas ou efetivamente medidas. Ao considerar as duas possibilidades de aplicação, o método desenvolvido é uma solução viável para metodologias de localização da fonte do AMT que utilizam apenas medição de tensões ou medições de tensão e corrente.

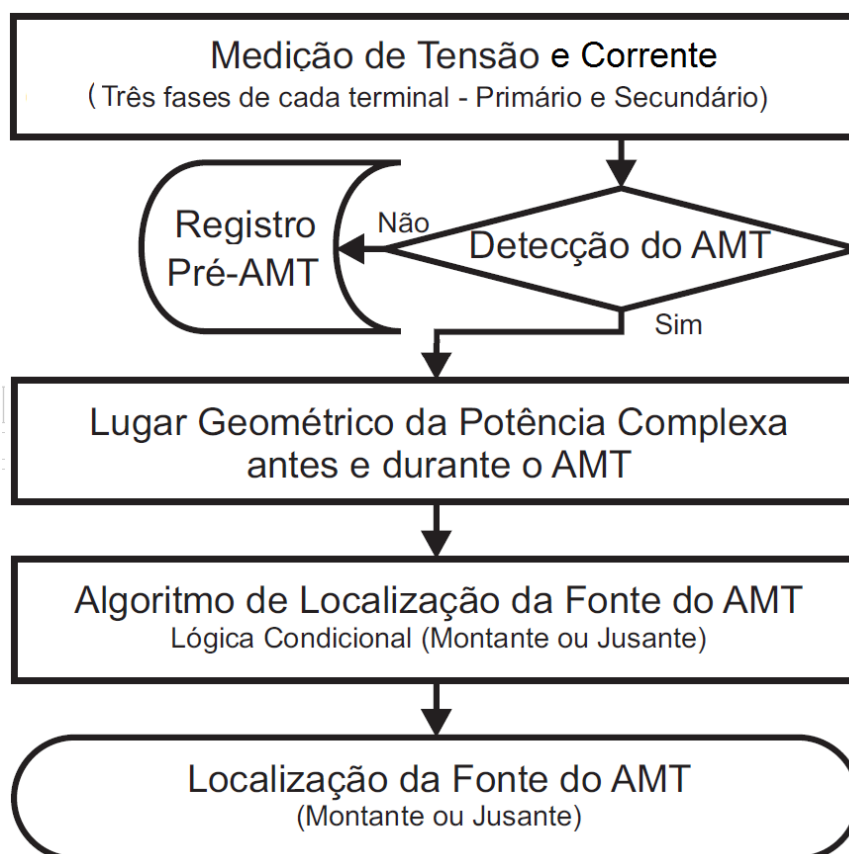


Figura 19 – Fluxograma alternativo para o método de localização da fonte do AMT, considerando medições de Tensões e Corrente Disponíveis.

3.5 Considerações Finais

Os fundamentos e o desenvolvimento do método de localização da fonte do AMT foram apresentados nesse capítulo, visando solucionar alguns dos problemas identificados nos métodos de localização existentes. Algumas premissas foram definidas para que o método seja robusto e eficaz considerando a maioria dos tipos de sistemas elétricos, sob diversas condições de falta e avaliando o comportamento do fluxo de potência antes e durante o AMT. As premissas adotadas consistem na:

- Avaliação qualitativa do fluxo de potência complexa na fronteira antes e durante o AMT;
- Utilização de conjunto de lógicas condicionais para tomada de decisão do local da fonte do AMT;
- Utilização apenas de sinais de tensão do primário e secundário de transformador instalado na fronteira entre sistemas e nas informações contidas na placa do transformador.

A estrutura geral do método foi apresentada destacando a sequência de execução para a localização da fonte do AMT, assim como, detalhou-se os fundamentos e as estruturas de cada elemento que compõe o método de localização da fonte do AMT. Os comportamentos esperados para o fluxo de potência complexa na fronteira quando acontece o AMT foram ilustrados, dando destaque a dois principais padrões de comportamento. O primeiro conjunto de possibilidades de comportamento esperado é típico de sistemas elétricos com fontes em ambos os lados da fronteira e o outro, típico de sistemas elétricos com apenas uma fonte em um dos lados do transformador. O comportamento do fluxo de potência em dispositivo específico e alguns comportamentos atípicos foram descritos. Finalmente, o conjunto de lógicas condicionais foi apresentado com as respectivas relações entre as variáveis e equações utilizadas.

Focando nas principais características do elemento destinado à localização da fonte do AMT, pode ser destacado que:

- A potência ativa durante o AMT é irrelevante, pois não foi possível definir padrões qualitativos de comportamento durante o AMT;
- É fundamental avaliar se na mudança da condição pré-AMT para a condição com AMT ocorre inversão no fluxo de potência reativa, pois isso define o tipo de comportamento típico esperado para o sistema;
- O lugar geométrico pré-AMT é fundamental na definição da localização da origem do AMT quando há fonte em apenas um dos lados do sistema;
- O fluxo de potência reativa aumentará em direção ao lado da fronteira onde ocorreu o curto-circuito se existir fonte em ambos os lados do sistema.

Finalizando o Capítulo 3, uma generalização do método foi apresentada quando são disponibilizados na fronteira tanto os sinais de tensão, como os de corrente. Portanto, o método desenvolvido poderá utilizar correntes estimadas ou efetivamente medidas.

4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM SISTEMA ELÉTRICO DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

4.1 Considerações Iniciais

Após a apresentação do método desenvolvido, as premissas utilizadas e suas características, o método de localização da fonte do AMT será avaliado neste capítulo através de simulações.

Buscou-se uma modelagem mais próxima possível de sistemas elétricos do mundo real, de modo que os fenômenos transitórios (faltas, AMTs e outros) fossem bem reproduzidos para fins de avaliação da metodologia proposta. As características elétricas dos sistemas modelados são descritas neste capítulo. Os pontos de monitoramento, bem como as indicações das localizações dos pontos de falta relativas a cada monitor são apresentados para facilitar a análise dos resultados. Os locais de falta foram definidos de modo a proporcionar o maior número de casos distintos durante o conjunto de simulações.

Também neste capítulo faz-se a descrição dos procedimentos de simulação de todas as etapas do fluxograma da Figura 4, descrevendo-se em um formato apropriado as importantes variáveis e os resultados alcançados, dando-se destaque ao desempenho do método após as análises pertinentes. Finalizando o capítulo, uma análise comparativa entre o desempenho do método desenvolvido e do método apresentado por Yonghai et al. (2012) é realizada com o intuito de avaliar as suas vantagens e limitações.

4.2 Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição Simulado

Sendo o AMT um evento aleatório, a realização de testes em campo para uma primeira avaliação do localizador da fonte do AMT desenvolvido não é trivial. O tempo necessário para a coleta de um número significativo de informações de AMTs inviabilizaria qualquer estudo na área de afundamentos de tensão. Desse modo, modelos computacionais capazes de simular os fenômenos envolvidos durante o AMT são comumente utilizados para estudos destes fenômenos. A fidelidade da reprodução dos fenômenos reais no modelo computacional dependerá, obviamente, da fidelidade do modelo e da exatidão dos dados utilizados.

Para avaliar o desempenho do localizador da fonte de AMT desenvolvido, realizou-

se um conjunto de simulações em um sistema elétrico de transmissão e distribuição real brasileiro, conforme diagrama unifilar apresentado na Figura 20, o qual foi modelado no ATP (*Alternative Transient Program*).

O sistema consiste em linhas longas e subcompensadas nos níveis de tensão 230 e 138 kV com elevadas distâncias entre os centros de carga e geração. As principais características do sistema são: (i) parque de geração constituído de usinas hidroelétricas e termoelétricas a gás natural e bagaço de cana; (ii) 93 subestações de transformação com 2.076 MVA de potência instalada; (iii) 6.619 km de linhas de transmissão em 230 e 138 kV. Este sistema possui ainda um parque gerador composto por diversas concessionárias, autoprodutores e produtores independentes, com aproximadamente 1.643 MVA de capacidade de geração e 467 MW de cargas modeladas como impedância constante. Existem medidores instalados em 7 pontos do sistema, sendo 5 medidores nas fronteiras entre os sistemas de 230/138kV (M1, M2, M3, M4 e M5), 1 medidor no transformador Dy do sistema de 138/13,8kV (M6) e 1 medidor no transformador Estrela - Delta do sistema de 230/230kV (M7), conforme também mostrado no diagrama unifilar da Figura 20. O trecho do sistema de 230kV compreendido entre o transformador associado a M7 e o ponto onde é simulada a falta F6 foi alterado em relação ao sistema real com o objetivo de contemplar conexões com defasamento angular no sistema de transmissão.

Foram definidos um total de 12 pontos para simulações de faltas, sendo 8 pontos (F1, F2, F3, F4, F5, F9, F10 e F11) localizados no sistema de 138 kV, 3 pontos (F6, F7 e F8) no sistema de 230 kV e, finalmente, 1 ponto (F12) situado no sistema de média tensão (13,8kV).

Em cada ponto foram simuladas faltas trifásicas e monofásicas, todas com duração de 70ms e ângulo de incidência de falta de 0° . Para cada tipo foram utilizados oito valores de resistência de falta (R_f) diferentes: 0,001; 0,1; 1; 5; 10; 20; 40 e 80Ω . Tais combinações proporcionaram 192 casos de faltas, avaliados nos 7 pontos de medição, totalizando 1344 casos para teste do método. O resultado de cada simulação irá proporcionar a indicação do lado de origem do AMT em relação ao medidor correspondente, logo após o mesmo detectar o AMT.

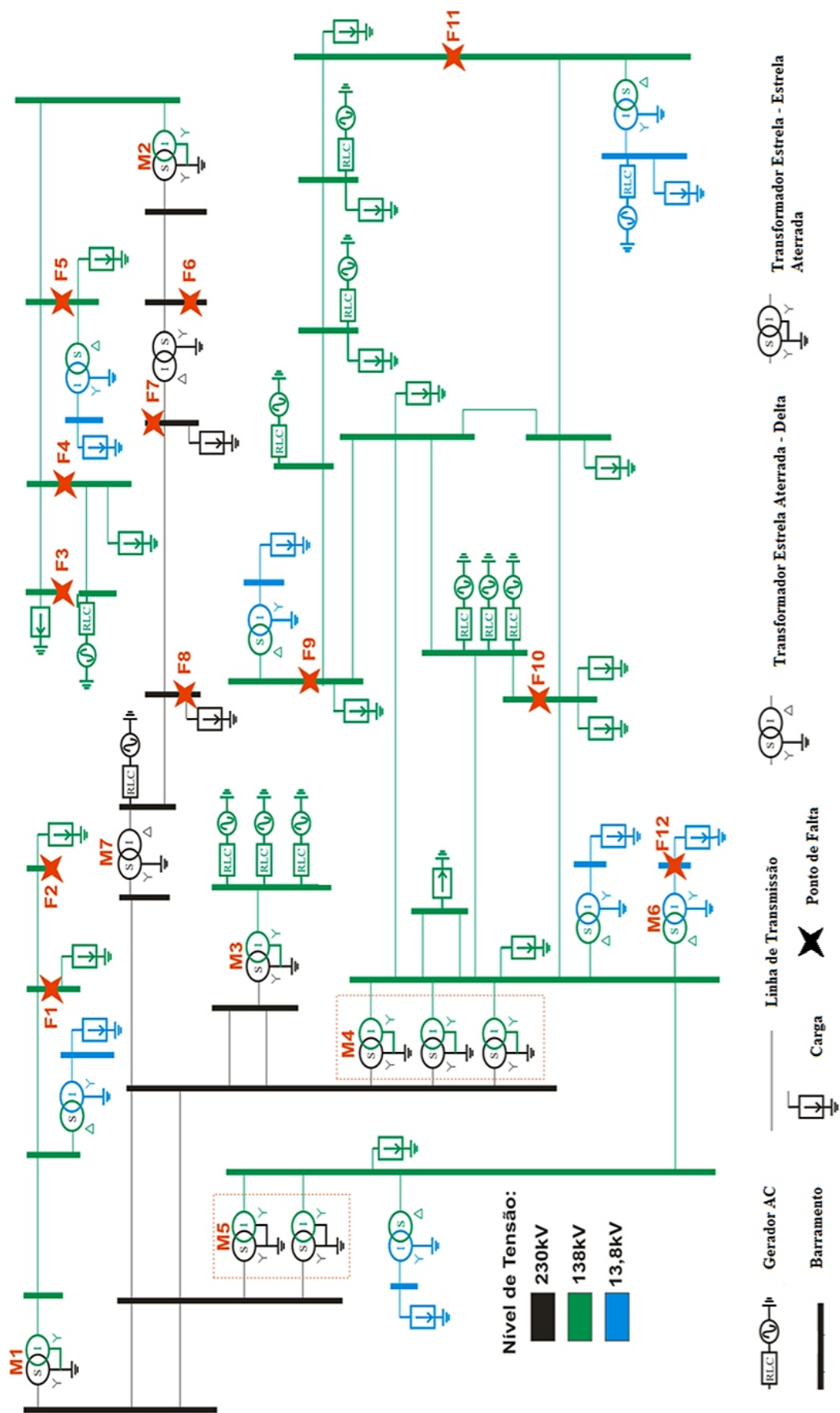


Figura 20 – Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição Real Modelado.

A Figura 21 ilustra, de forma simplificada, a topologia do sistema constituída pelos diversos subsistemas, as fronteiras, as localizações dos medidores e as indicações dos pontos de falta considerados.

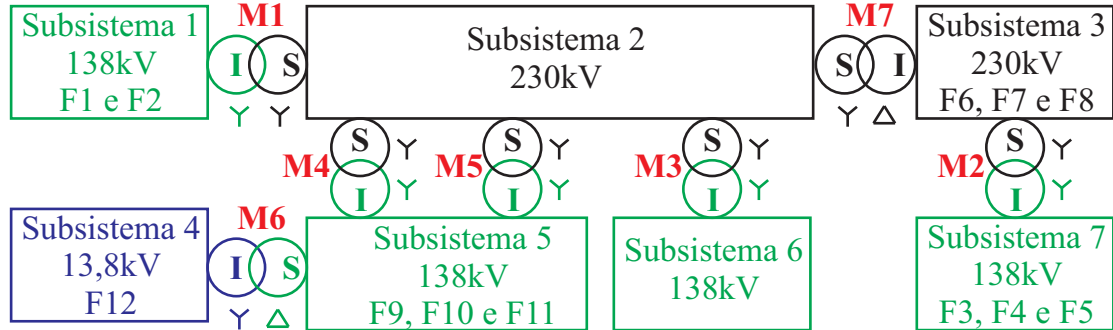


Figura 21 – Topologia do Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição Modelado.

A Tabela 2 apresenta o lado correto da fonte do AMT que cada medidor deverá localizar quando sensibilizado pelo evento, por sua vez causado pelas faltas simuladas. A letra “P” indica fonte do AMT do lado primário do transformador de fronteira e a letra “S” fonte do AMT do lado secundário do mesmo transformador. Os dados dos transformadores onde os medidores estão instalados encontram-se na Tabela 3 e o terminal primário será sempre o lado com maior nível de tensão.

Tabela 2 – Correta Localização da Fonte do AMT no Sistema Elétrico de Transmissão e Distribuição

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

Tabela 3 – Dados dos Transformadores de Potência com medidores instalados.

Medidor	S_n [MVA]	Z % [%]	X/R	$V_p - V_s$ [kV]	Conexão
M1	50	8,4	40	230 - 138	Yy0
M2	100	8,7	38	230 - 138	Yy0
M3	300	6	22	230 - 138	Yy0
M4	3 x 100	8,3	39	230 - 138	Yy0
M5	2 x 100	8,3	113	230 - 138	Yy0
M6	25	12,5	41	138 - 13,8	Dy1
M7	100	3,8	120	230 - 230	Yd11

O tempo de simulação considerado para cada caso foi de 250 ms (15 ciclos), resultando em 4809 amostras de tensão por sinal medido ao longo da simulação, o que representa uma taxa de amostragem de 320 amostras por ciclo. Cada simulação gerou um arquivo (".pl4") com todas as três tensões de fase dos dois barramentos associados a cada um dos 7 transformadores monitorados, totalizando 42 sinais monitorados por simulação.

Considerando as simulações realizadas no ATP, arquivos do tipo (".atp") foram criados para cada caso. Considerando a elevada quantidade de casos simulados, foi desenvolvido um procedimento automático para criar os diversos arquivos utilizando a ferramenta de programação disponível no "Word" do "Office". O conjunto de casos simulados (arquivos ".atp") são executados automaticamente, resultando nos arquivos (".pl4") que são utilizados pelo programa desenvolvido no MATLAB.

Todo o método de localização da fonte do AMT foi desenvolvido no MATLAB, utilizando sua programação básica. O tratamento dos sinais obtidos no ATP, a detecção do AMT, a definição dos instantes "pré-AMT" e "AMT", a estimação das correntes, o registro e apresentação do comportamento das diversas grandezas elétricas utilizadas pelo método e das variáveis booleanas, foram todas implementadas via programação desenvolvida no MATLAB.

Portanto, para cada um dos 1344 casos simulados (192 faltas avaliadas nos 7 medidores), o programa implementado executa todos os passos do método desenvolvido, conforme o fluxograma da Figura 4, e apresenta algumas informações pertinentes através de um relatório individual contendo: (i) os gráficos das tensões monitoradas durante o evento; (ii) indicação do instante pré-AMT; (iii) indicação do instante AMT; (iv) comportamento dos fasores da corrente estimada em componentes simétricos; (v) comportamento da potência complexa estimada; (vi) registro e a agregação de fase do AMT; (vii) valores digitais das diversas variáveis booleanas consideradas no método ao longo do evento; (viii) localização da fonte do AMT e, finalmente, (ix) comparação com os dados da Tabela 2 para verificação do acerto ou não do localizador. Ao final da execução de todos os casos, uma tabela resumo apresenta o resultado de acerto ou erro de localização da fonte do AMT para cada caso e a porcentagem de acertos e erros totais. Cabe mencionar que o próprio MATLAB foi usado para automatizar a execução de todos os casos simulados, bem como para registrar todas as informações pertinentes. Os resultados foram exportados para os programas do pacote *Office* para apresentação gráfica dos resultados de todos os testes realizados.

As Figuras 22 à 27 ilustram o registro das informações pertinentes para um único caso que considera falta no ponto F10, monitorado no medidor M4, sendo a falta monofásica sólida, ou seja, com resistência de falta de $0,001\Omega$. A Figura 27 ilustra o relatório individual com todas as informações pertinentes a um único caso avaliado. Esse relatório individual permite uma análise criteriosa do comportamento do sistema elétrico

no ponto de monitoramento para cada falta ocorrida (comportamento das tensões antes e durante o AMT, as correntes e a potência complexa estimadas), assim como todo o comportamento do método proposto e o respectivo resultado (variáveis booleanas utilizadas no método, a localização da fonte do AMT e a respectiva conferência com o resultado correto de localização indicado na Tabela 2).

Apenas para exemplificar uma análise gráfica, pode-se observar na Figura 22 que uma das tensões nos terminais secundários do transformador sofreu um AMT mais severo que as tensões nos terminais do primário e que, durante o AMT, foi pequena a variação angular dos fasores de tensão.

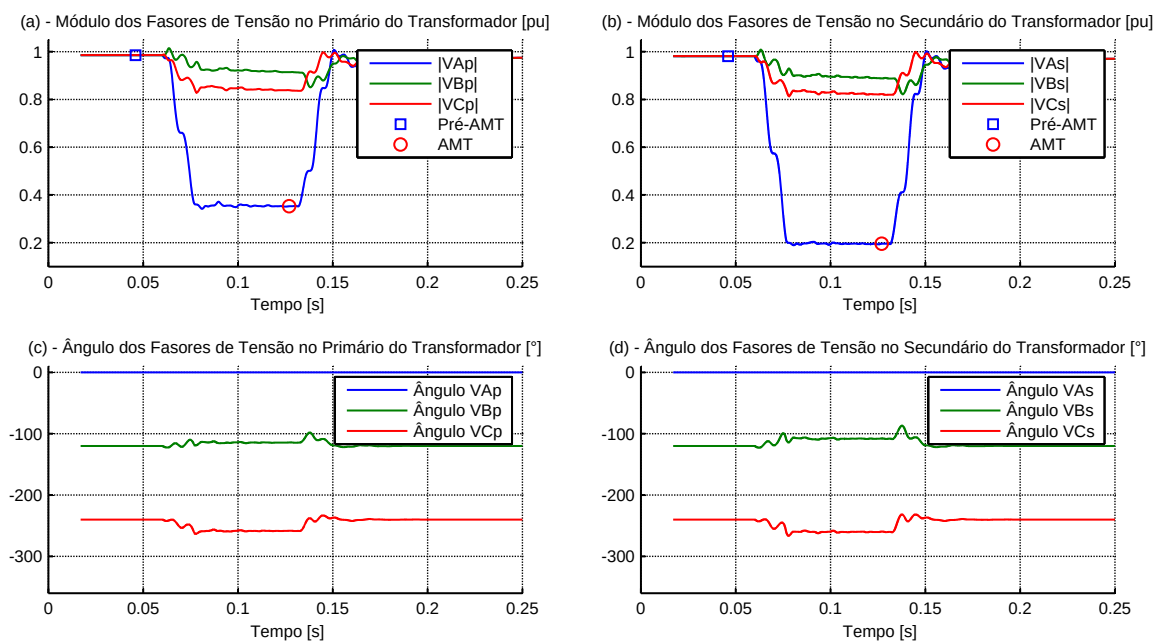


Figura 22 – Tensões monitoradas ao longo do evento com a indicação do instante pré-AMT e do instante AMT - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

Já na Figura 23 verifica-se, corretamente, a estimativa apenas da componente de sequência positiva nos instantes pré-AMT, pois se considera o sistema equilibrado. Durante o AMT, também passa a existir as componentes de sequência negativa e zero. Este resultado é esperado, considerando que a fonte do AMT é uma falta assimétrica (fase-terra).

Por sua vez, uma análise simultânea do comportamento do fluxo de potência estimado ao longo do tempo e no plano complexo pode ser feita através da Figura 24 (a) e Figura 24 (b), respectivamente. Em ambos os gráficos é possível identificar o instante pré-AMT considerado, a condição pré-AMT do fluxo de potência e o comportamento durante todo o evento registrado. Neste caso exemplo é possível verificar o aumento significativo do fluxo de potência reativa exportada e a redução do fluxo de potência ativa exportada.

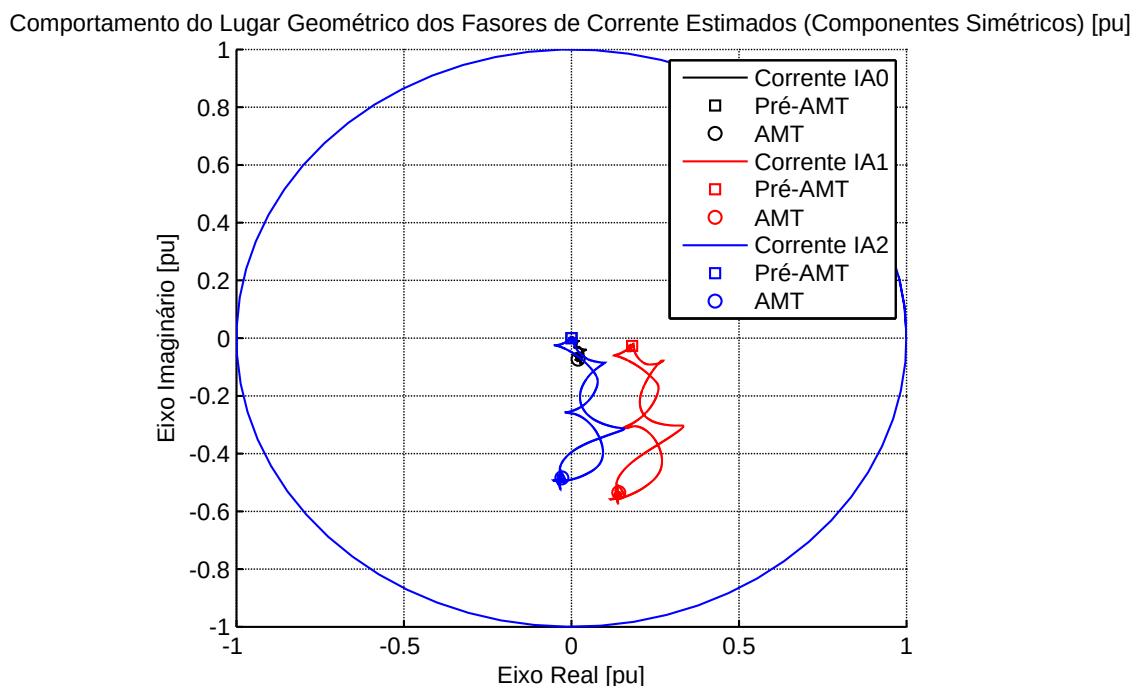


Figura 23 – Comportamento dos fasores de corrente em componentes simétricos estimados durante o evento - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

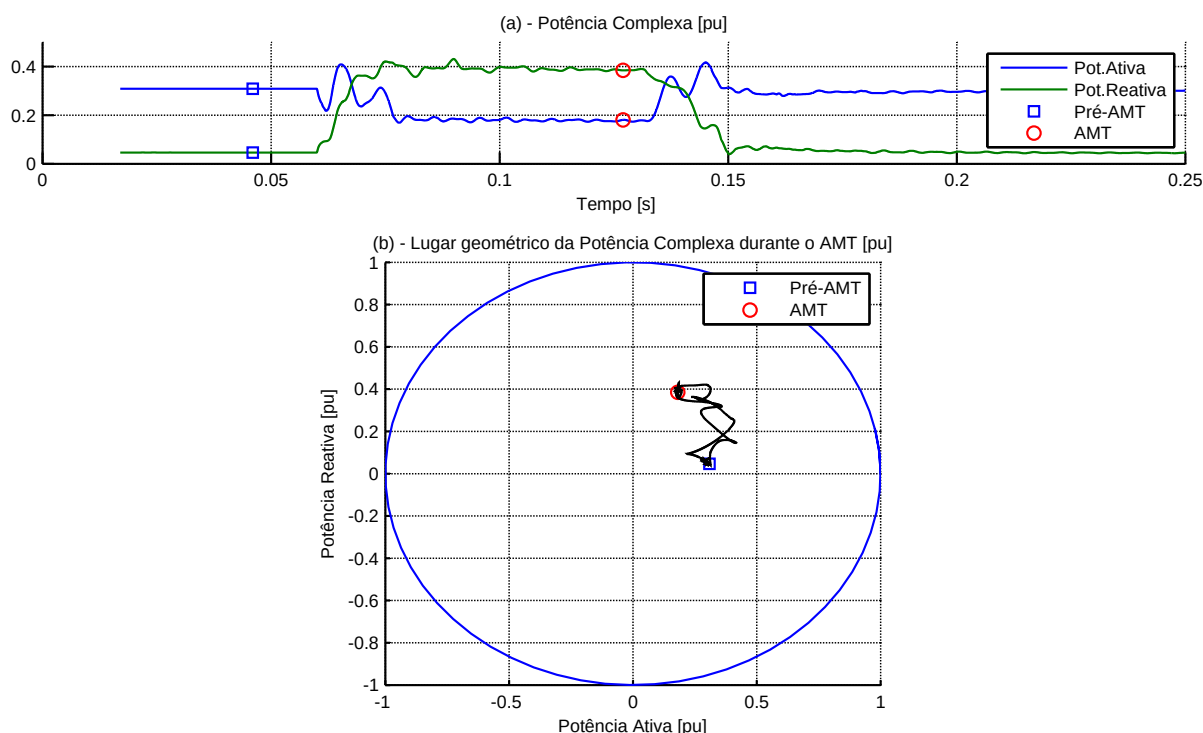


Figura 24 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

Outra informação importante consiste no registro do AMT, ao longo do tempo, em todos os seis fasores monitorados e a agregação de fases realizada. Na Figura 25 é possível

identificar os instantes que cada valor RMS da tensão de fase monitorada violou o valor de 0,9 pu. A agregação de fase permitiu que o AMT fosse registrado continuamente durante todo o tempo entre o instante ao qual ocorreu o primeiro registro de AMT na primeira fase, até o instante ao qual o fasor da última fase registrou tensão RMS maior que 0,9pu.

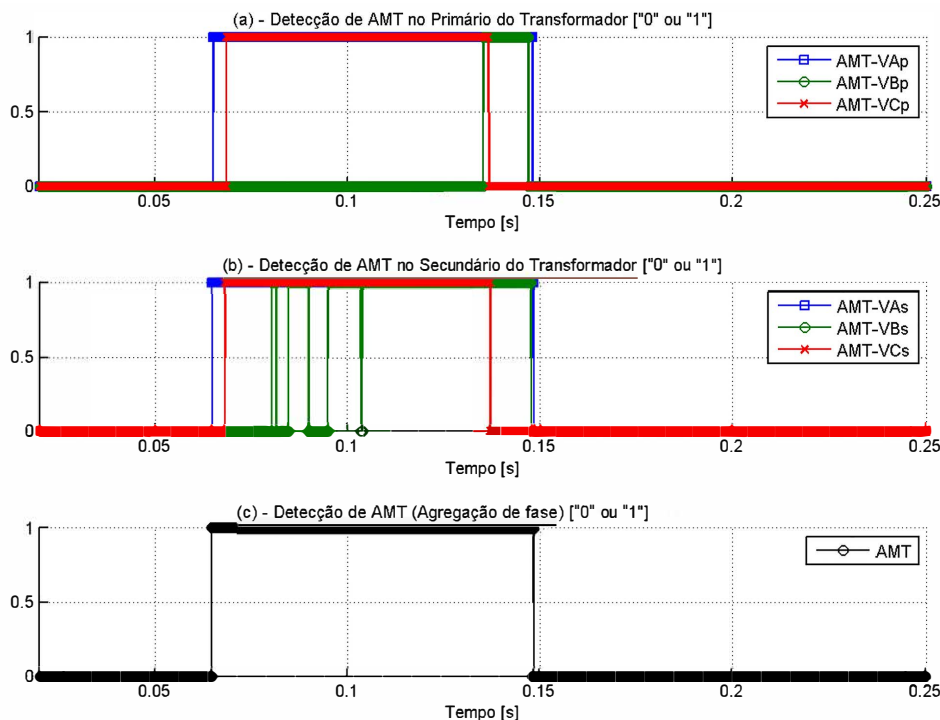


Figura 25 – Detecção do AMT nos terminais do transformador na fronteira e agregação de fase - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

Os valores das variáveis booleanas utilizadas nas equações condicionais (3.5 à 3.11) são apresentados ao longo do tempo na Figura 26. Através desses gráficos é possível avaliar o desempenho do método desenvolvido considerando, sobretudo, o comportamento de cada variável booleana relacionando-as ao comportamento do fluxo de potência registrado. Por exemplo, é possível afirmar que não ocorreu inversão de fluxo de potência reativa e que o método foi capaz de identificar que o sistema tem fontes em ambos os lados da fronteira monitorada e a localização da fonte do AMT foi a jusante. Tais afirmações são feitas com base nas variáveis booleanas “QD”, “J2” e “J”, as quais foram sensibilizadas durante o AMT, conforme visto nas Figuras 26 (a), (e) e (g).

Por fim, a Figura 27 apresenta o resumo dos resultados. Nela podem ser vistos todos os gráficos descritos anteriormente numa única imagem, possibilitando uma avaliação completa do caso simulado.

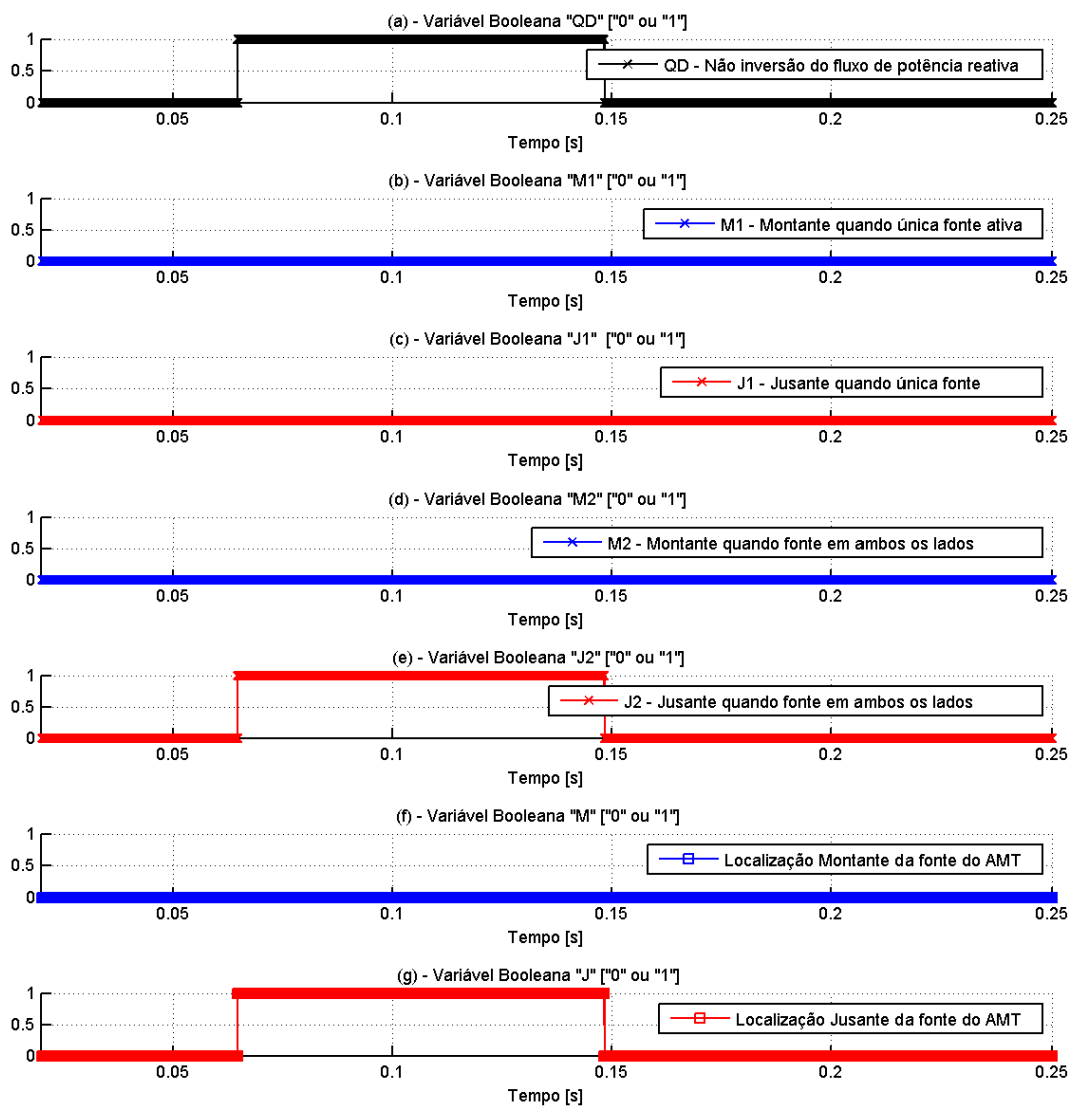


Figura 26 – Comportamento das variáveis booleanas conforme equações (3.5) à (3.11) - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

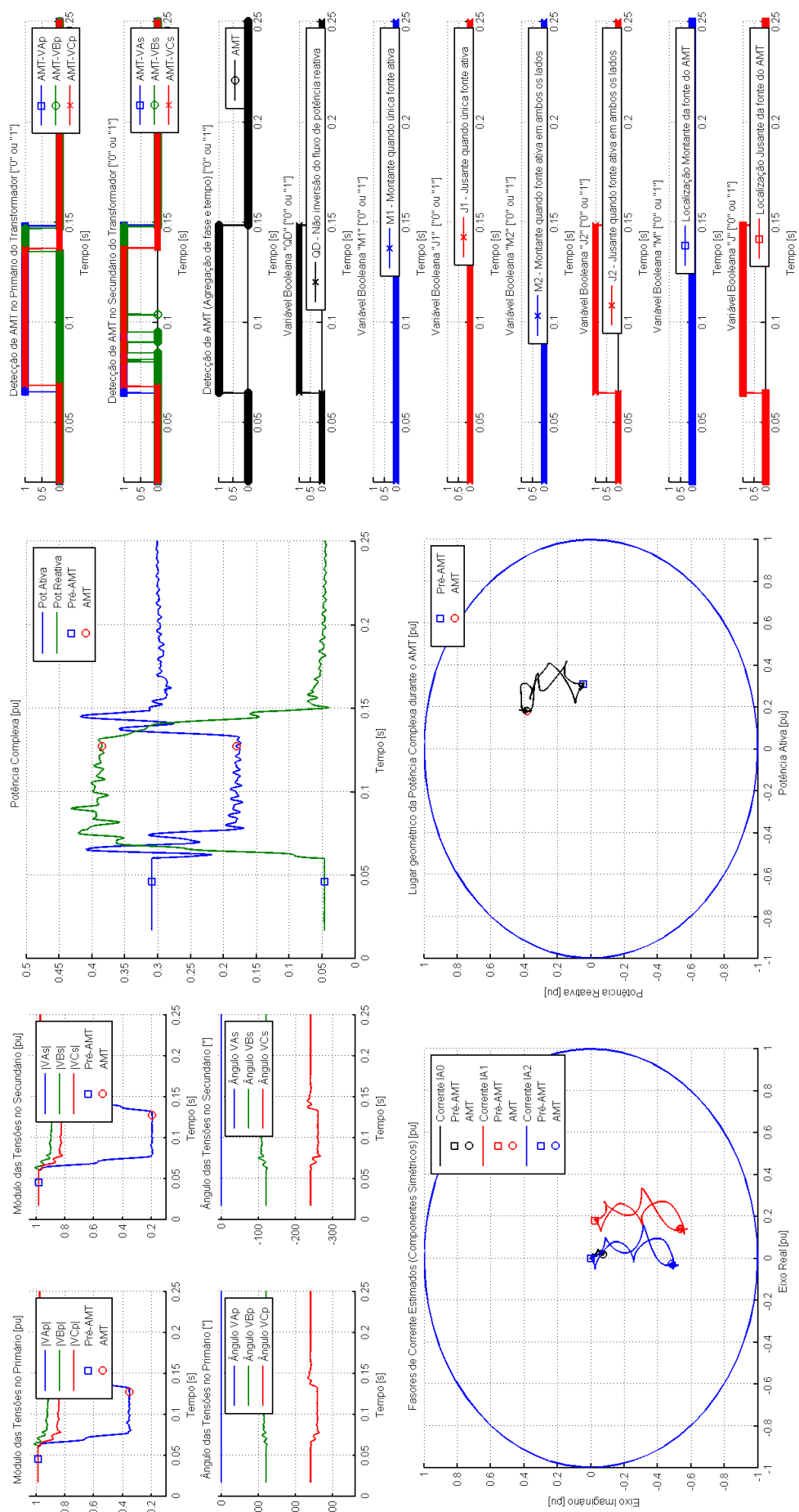


Figura 27 – Resumo - Falta monofásica em F10 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

4.3 Resultados Obtidos pelo Localizador da Fonte do AMT Desenvolvido

As 192 faltas simuladas resultaram em 504 registros de AMTs, representando uma média de 2,6 eventos por falta. A Tabela 4 apresenta o número de AMTs registrados em cada monitor considerando as 96 faltas trifásicas simuladas (12 pontos de falta e 8 valores de resistência de falta). De forma semelhante, a Tabela 5 apresenta o número de AMTs registrados em cada monitor considerando as 96 faltas monofásicas.

Tabela 4 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta trifásica simulada.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
M1	8	8	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
M2	0	0	8	8	8	8	8	8	0	7	5	0
M3	0	0	0	0	0	0	0	8	0	7	6	0
M4	0	0	0	0	6	8	8	8	6	8	7	3
M5	0	0	0	0	0	0	0	8	0	7	5	0
M6	0	0	0	0	7	8	8	8	7	8	8	3
M7	0	0	0	8	8	8	8	8	0	7	6	0

Tabela 5 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta monofásica simulada.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
M1	8	8	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
M2	0	0	8	8	8	8	8	8	0	6	0	0
M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0
M4	0	0	0	0	0	8	6	8	5	7	7	2
M5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
M6	0	0	0	0	0	8	8	8	6	8	8	3
M7	0	0	0	0	7	8	8	8	0	6	0	0

É possível verificar que o número de AMTs devido à ocorrência de faltas trifásicas (287 ocorrências) é maior que o número de AMTs resultantes de faltas monofásicas (217 ocorrências). Essa diferença pode ser explicada pela intensidade da falta, pois é natural que faltas trifásicas com mesma resistência de falta demandem maior fluxo de potência, sobretudo a reativa, em direção ao ponto de falta. Observa-se que apenas faltas localizadas em F10 foram capazes de sensibilizar a maioria dos monitores do sistema. Também, constata-se que a ocorrência de faltas em alguns pontos só sensibiliza um único monitor, como por exemplo, em F1 e F2. As diferentes propagações do AMT dependem da topologia, da característica do sistema elétrico sob análise, bem como da distância elétrica relativa entre o ponto de monitoramento e o ponto de falta.

As Tabelas 6 e 7 apresentam as taxas de sucesso de localização da fonte do AMT obtida em cada monitor, para faltas trifásicas (Tabela 6) e faltas monofásicas (Tabela 7).

Taxa de sucesso é calculada como sendo a relação entre número de localizações corretas da fonte do AMT e o número de AMTs detectados pelo respectivo monitor.

Tabela 6 – Taxa de sucesso de localização da fonte do AMT para faltas trifásicas.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
M1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
M2	-	-	1	1	1	1	1	1	-	1	1	-
M3	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	-
M4	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
M5	-	-	-	-	-	-	-	1	-	0,86	0,8	-
M6	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
M7	-	-	-	1	1	1	1	1	-	1	1	-

Tabela 7 – Taxa de sucesso de localização da fonte do AMT para faltas monofásicas.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
M1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
M2	-	-	1	1	1	1	1	1	-	1	-	-
M3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
M4	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
M5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,83	-	-
M6	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
M7	-	-	-	-	1	1	1	1	-	1	-	-

Os resultados apresentados confirmam que o método de localização da fonte do AMT localizou corretamente 501 dos 504 AMTs detectados. Esse resultado corresponde à 99,4% de sucesso na localização da fonte do AMT.

Na sequência serão destacados alguns casos que mostram os comportamentos típicos esperados, sendo todos os relatos de casos ao qual o localizador desenvolvido obteve sucesso na localização da fonte do AMT.

A Figura 28 apresenta o comportamento da potência complexa estimada durante o AMT no medidor M1, provocado por falta trifásica no ponto F2, com resistência de falta de $0,001\Omega$. Tal comportamento é típico para faltas a jusante próximas à fronteira entre dois sistemas radiais e com fonte somente no sistema a montante. Nesse caso, o aumento no fluxo de potência reativa em direção ao sistema a jusante é evidente. Vale destacar que a potência ativa durante o AMT sofreu um pequeno aumento. Dependendo do tipo de carga no sistema a jusante da fronteira, a potência ativa poderia apresentar outro comportamento. Observa-se que a potência reativa indutiva estava sendo importada e, durante o AMT, ocorreu a inversão e um aumento considerável do fluxo em direção a falta localizada no sistema a jusante.

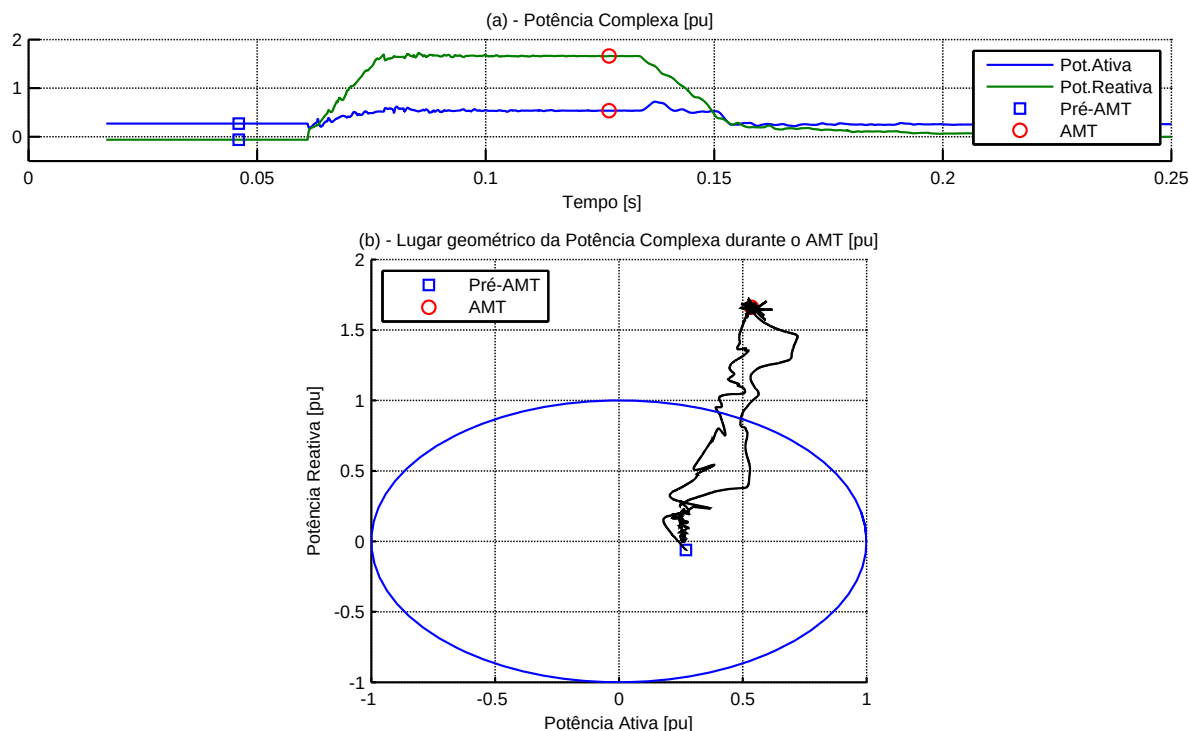


Figura 28 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F2 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M1.

A Figura 29 mostra o comportamento da potência complexa estimada durante o AMT no monitor M2, provocado pela falta trifásica no ponto F8 (localização a montante do monitor), com resistência de falta de $0,001\Omega$. Já a Figura 30 apresenta o comportamento da potência complexa estimada durante o AMT no medidor M2, provocado por uma falta trifásica no ponto F4 (localização a jusante do monitor). É possível perceber, com base no comportamento do fluxo de potência apresentado na Figura 29, que não ocorreu contribuição à falta pelo sistema jusante ao monitor M2. Durante a falta em F8 aconteceu uma considerável redução nos fluxos de potência ativa e reativa exportados em M2 e a fonte no sistema jusante não contribuiu para a falta. Nesses casos, o fluxo de potência ativa pré-AMT é fundamental para a correta localização da fonte do AMT. Com base nos resultados, verifica-se que para falta em F4 (Figura 30) ocorre inversão do fluxo de potência reativa e aumento no seu valor no primeiro quadrante, indicando corretamente fonte do AMT a jusante.

A Figura 31 apresenta o comportamento da potência complexa no monitor M4 para falta trifásica com resistência de falta de $0,001\Omega$ em F11 e a Figura 32 apresenta o comportamento da potência complexa no mesmo monitor M4, para o mesmo tipo de falta, localizada em F12. Devido às diferentes características dos sistemas onde as faltas aconteceram (F11 - sistema de 138kV) e (F12 - sistema de 13,8kV), o comportamento da potência ativa foi distinto durante a falta. Para falta no sistema de 138kV, o monitor M4 registrou aumento no fluxo de potência ativa exportada e para a falta F12, no sistema de

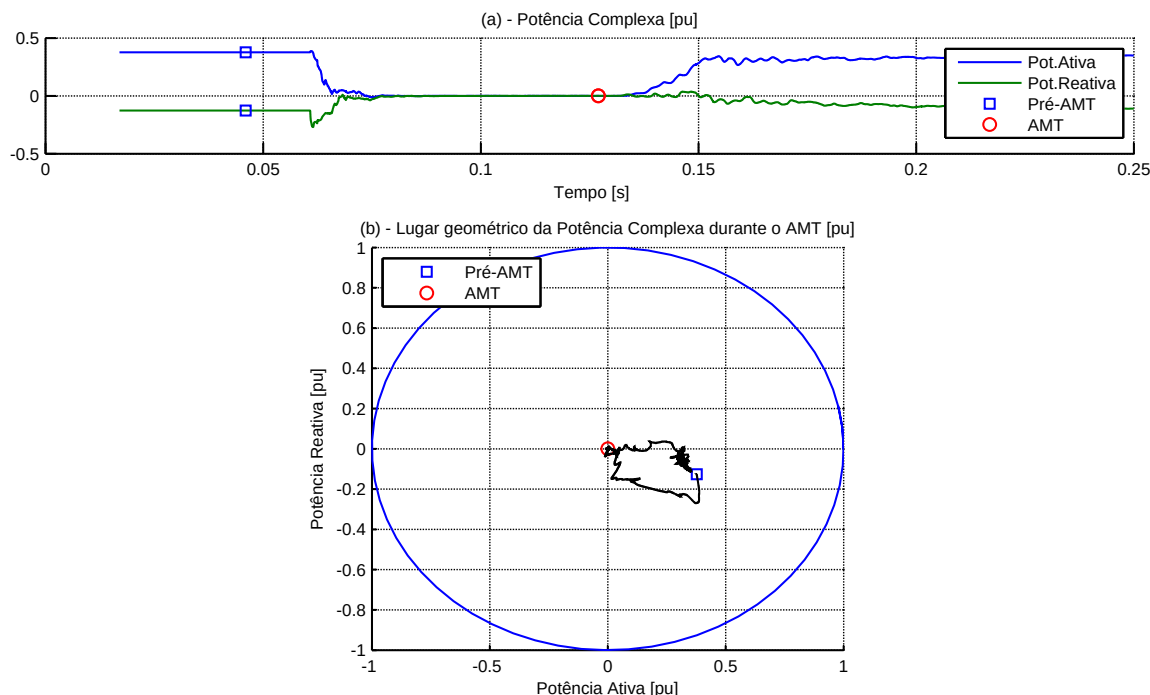


Figura 29 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F8 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M2.

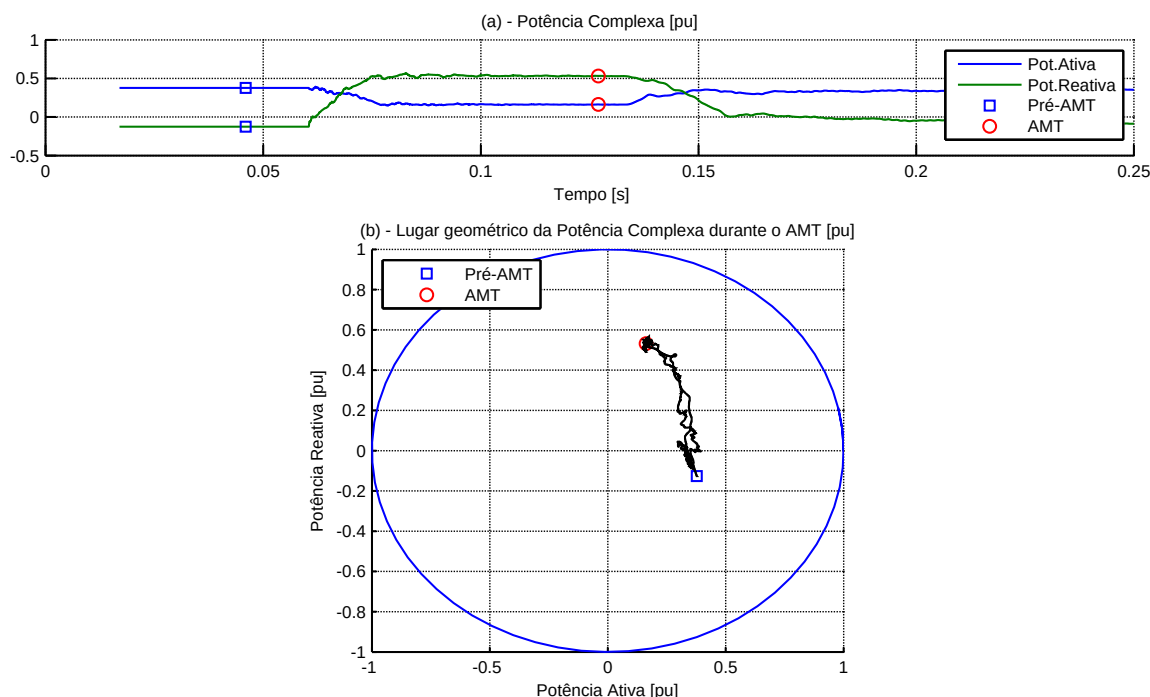


Figura 30 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F4 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M2.

média tensão, ocorreu redução no fluxo de potência ativa. Mesmo com comportamentos distintos do fluxo de potência ativa durante o AMT, o localizador em M4 obteve sucesso na localização da fonte do AMT, ou seja, a jusante. Isso confirma que o método de localização

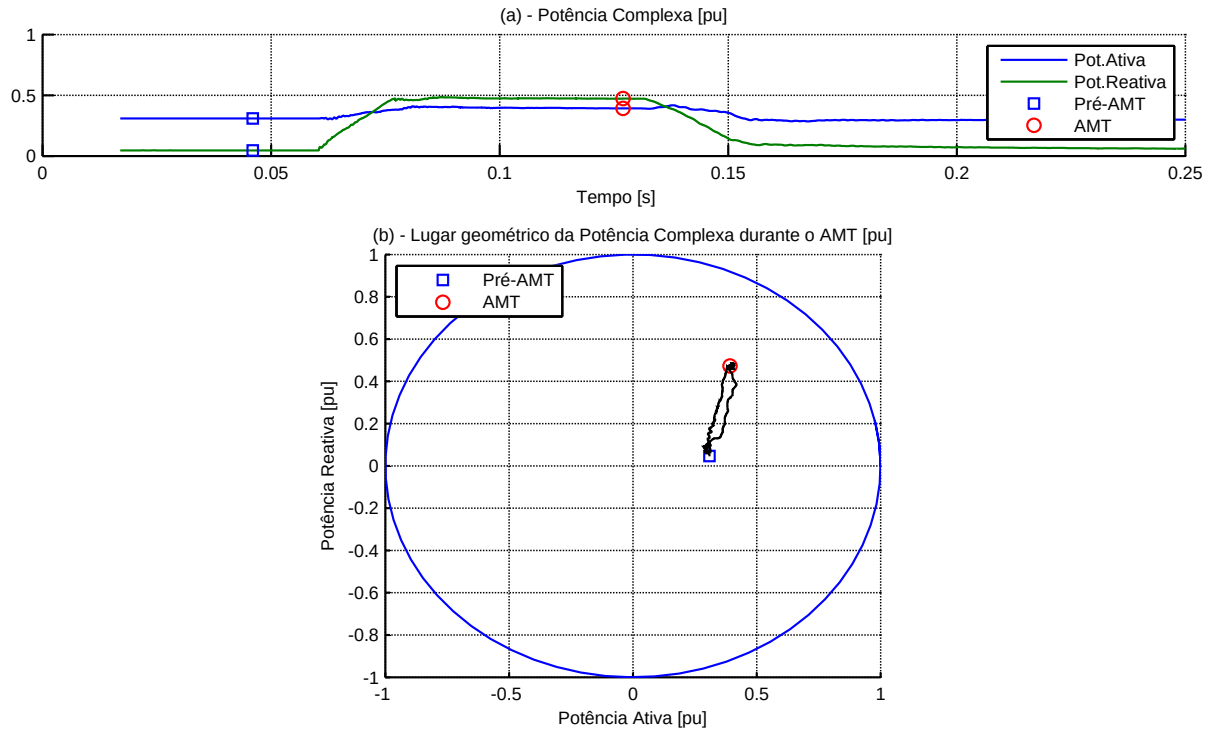


Figura 31 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F11 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

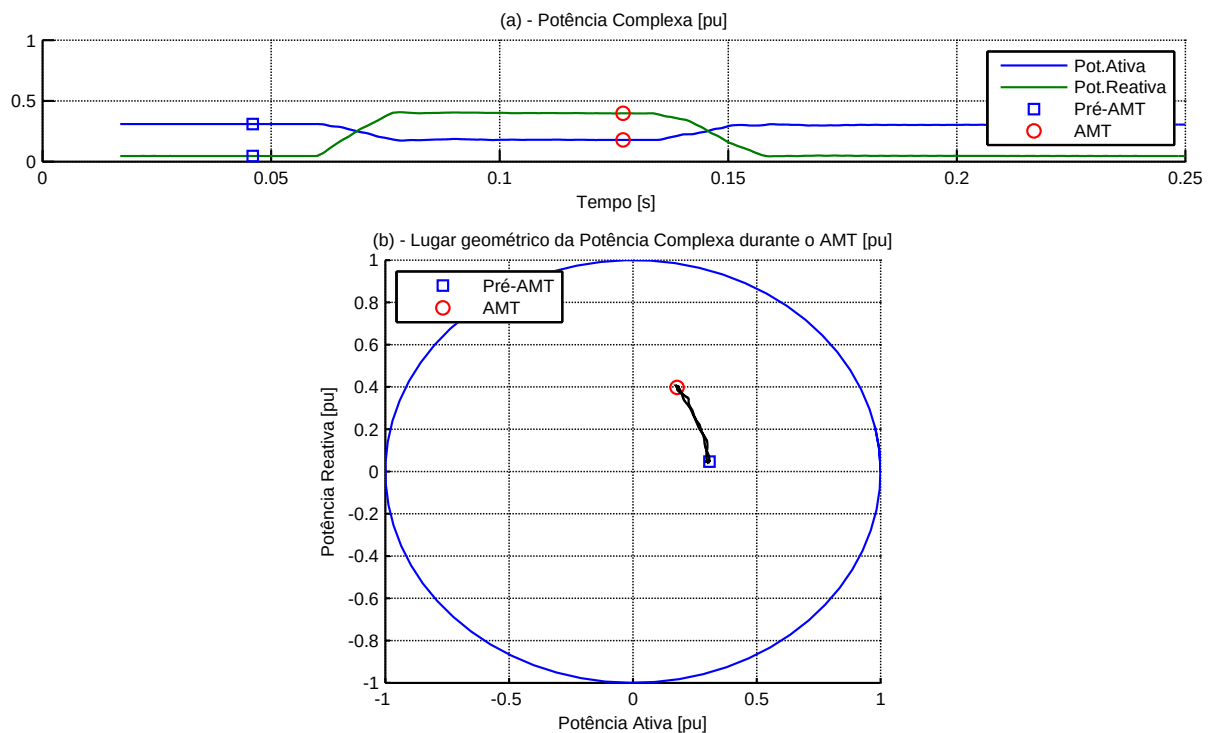


Figura 32 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F12 ($R_f=0,001\Omega$) registrada pelo monitor M4.

desenvolvido não depende do comportamento da potência ativa. Fica evidente em ambas as Figuras 31 e 32 que o fluxo de potência reativa aumentou em direção ao sistema jusante,

garantindo o correto desempenho do método de localização desenvolvido.

De todos os casos simulados, apenas três eventos resultaram em localização equivocada da fonte do AMT: AMT registrado por M5 para falta trifásica em F11 com resistência de falta de 10Ω ; AMT registrado por M5 para falta trifásica em F10 com resistência de falta de 40Ω e AMT registrado por M5 para falta monofásica em F10 com resistência de falta de 20Ω . No sistema elétrico de transmissão e distribuição modelado é possível verificar que os pontos das faltas F10 e F11 estão relativamente distantes do monitor M5. Também, verifica-se que o sistema elétrico é consideravelmente malhado na região próxima ao monitor. Esses dois fatores combinados resultaram em AMTs pouco severos em ambos os lados do transformador, além de pequena variação do fluxo de potência na fronteira do medidor M5 durante as faltas F10 e F11. Como exemplo, a tensão registrada durante o AMT no monitor M5 foi de 0,88 pu (AMT pouco severo) para falta trifásica com resistência de 10Ω em F11, conforme mostra a Figura 33. Também, verifica-se na Figura 34 pouca variação do fluxo de potência complexa, o que dificultou o método localizar satisfatoriamente a fonte do AMT. O mesmo fenômeno aconteceu para os outros dois casos já citados, que localizaram equivocadamente falta a montante do monitor M5, conforme ilustrado nas Figuras 35 e 36.

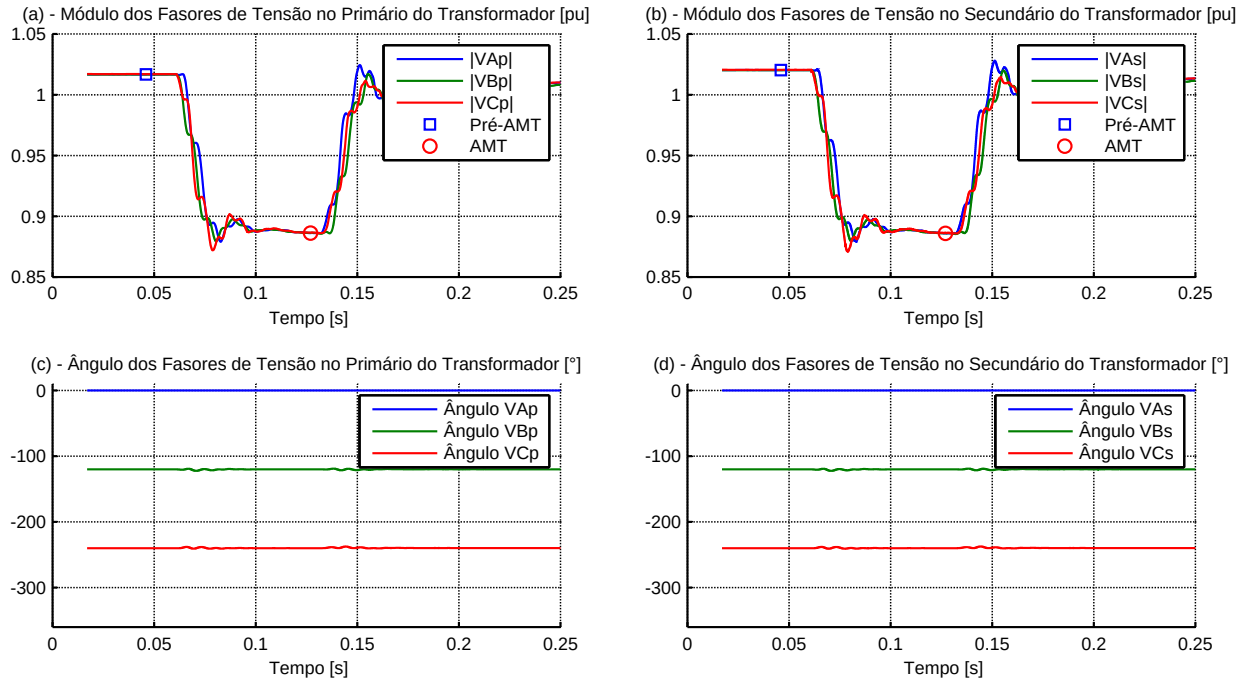


Figura 33 – Comportamento das tensões monitoradas no monitor M5 durante falta trifásica em F11 ($R_f = 10\Omega$).

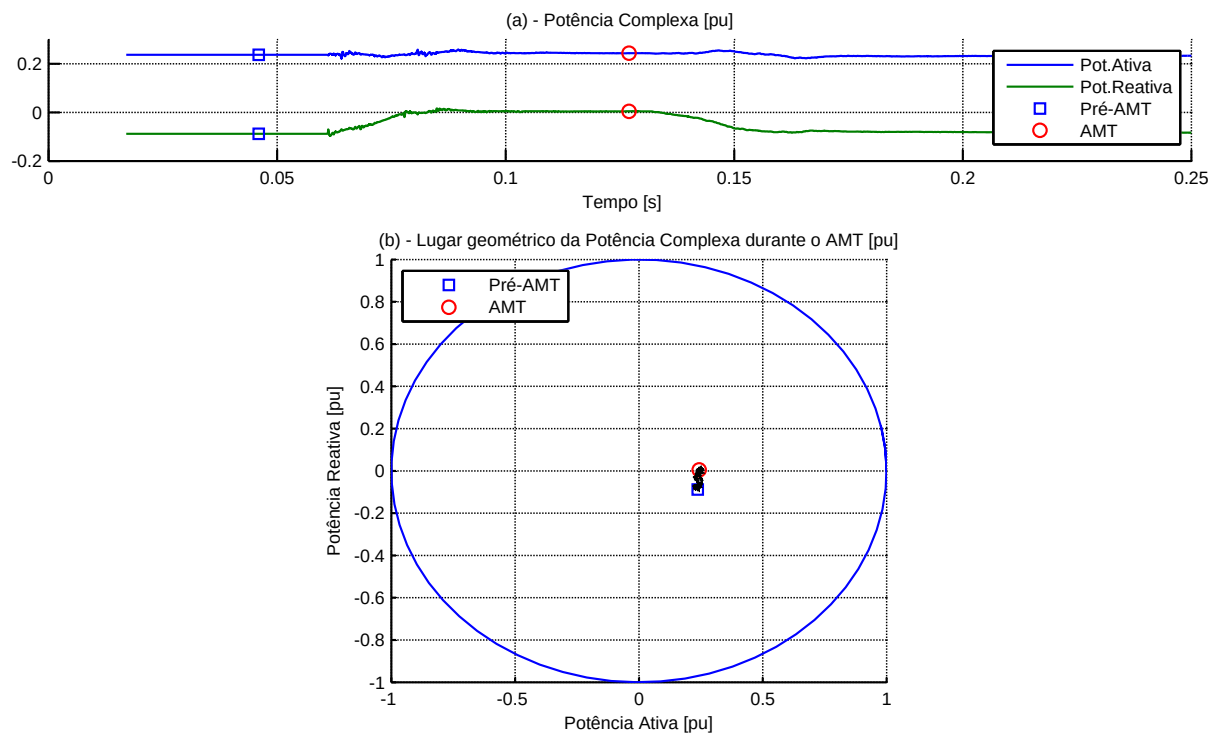


Figura 34 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F11 ($R_f=10\Omega$) registrada pelo monitor M5.

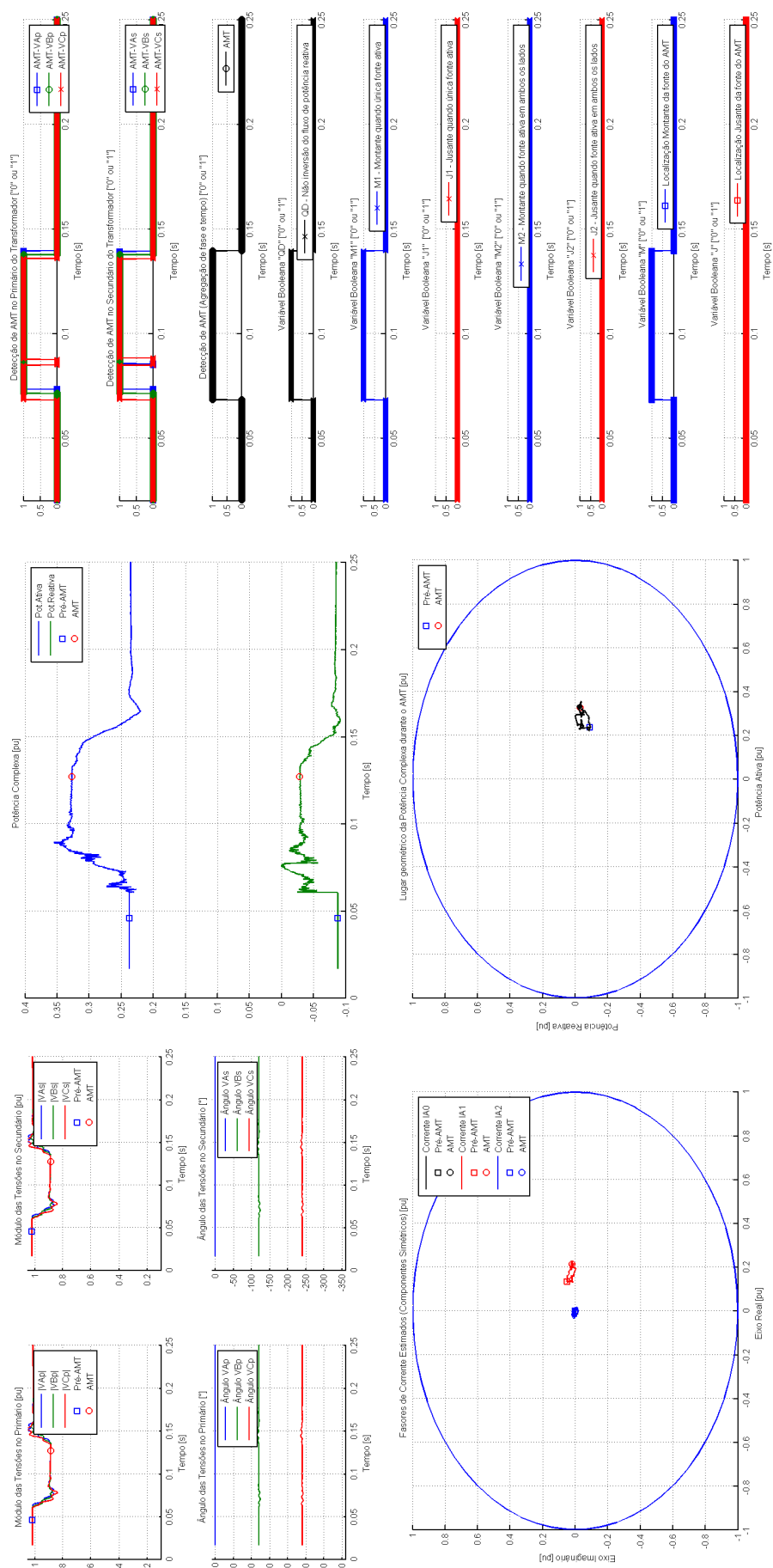


Figura 35 – Resumo - Falta trifásica em F10 ($R_f=40\Omega$) registrada pelo monitor M5.

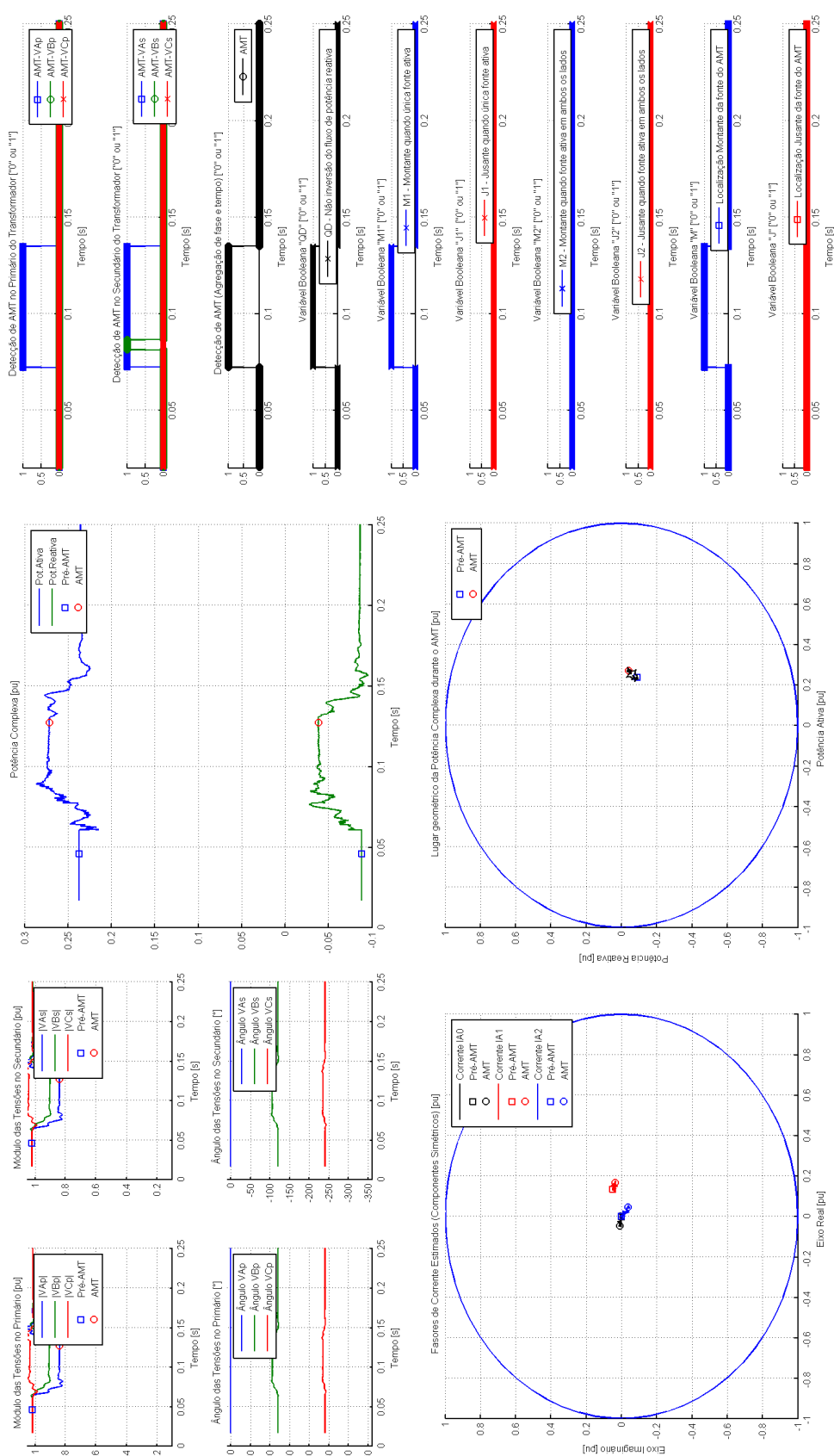


Figura 36 – Resumo - Falta monofásica em F10 ($R_f=20\Omega$) registrada pelo monitor M5.

4.4 Comparação de Desempenho entre o Método Desenvolvido e Método de Impedância Vista Aprimorado

No Capítulo 2 foram apresentados diversos métodos de localização baseados tanto em medição de tensão, como métodos baseados em medição de tensão e corrente. Dentre eles, o método proposto por Yonghai et al. (2012) destacou-se pelo bom desempenho, apesar de não ser um método baseado apenas em medição de tensão. Neste contexto, decidiu-se implementar o método proposto por Yonghai et al. (2012) e comparar os resultados com o método desenvolvido nessa tese.

Após utilizar o mesmo conjunto de casos simulados, 423 dos 504 AMTs registrados foram localizados corretamente. Esse resultado representa 83,9% de acerto na localização da fonte do AMT. Os 90 casos para os quais o localizador não obteve sucesso ocorreram principalmente devido às dificuldades em determinar um limiar entre os casos considerados eventos a montante ou a jusante. Os limites para a tomada de decisão propostos pelos autores (-40% para o índice da variação da impedância vista e 25° para o índice da variação do ângulo da impedância vista) não foram adequados para o sistema de transmissão e distribuição utilizado como caso teste. A Figura 37 demonstra que a definição de um limiar nos dois parâmetros monitorados não é trivial para o sistema simulado, pois não foi possível classificar convenientemente os resultados em grupos que identifiquem eventos a montante ou a jusante.

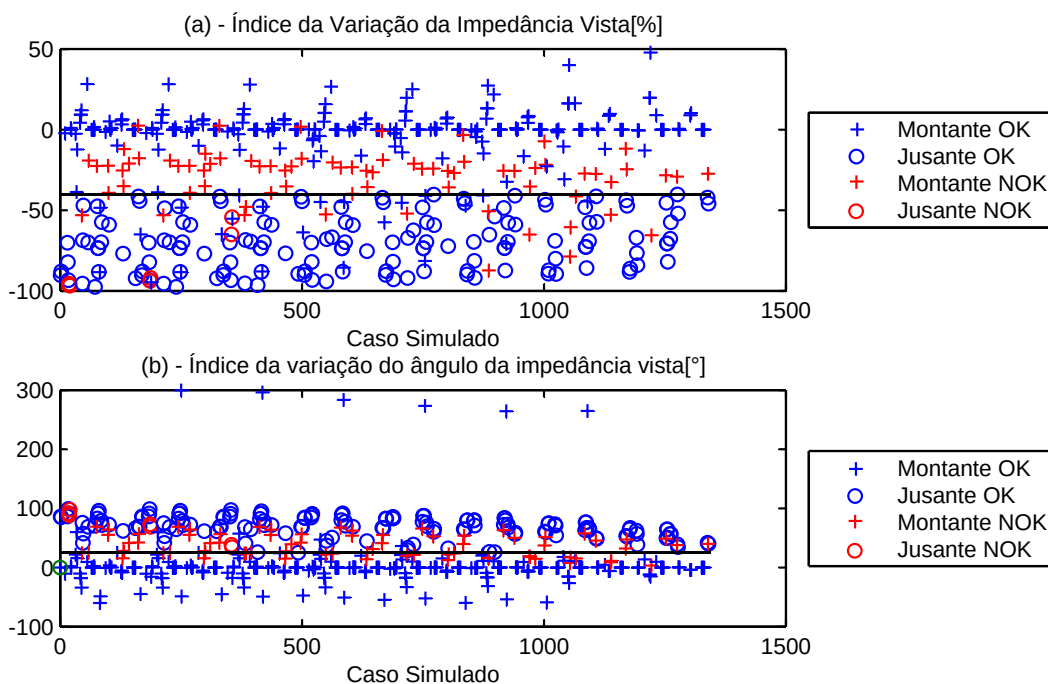


Figura 37 – Resultados do método de localização da fonte do AMT baseado na impedância vista modificada - índice da variação da impedância vista e índice da variação do ângulo da impedância vista.

Ao comparar os desempenhos obtidos pelo método desenvolvido nessa tese e o método baseado na impedância vista modificada, constata-se considerável melhoria. A Figura 38 apresenta um gráfico comparativo com a taxa de acerto de ambos os métodos. Pode-se concluir que a utilização de valores limites para classificar uma condição de localização da fonte do AMT a montante ou a jusante não é simples para sistemas complexos como o simulado. As diversas variáveis envolvidas e as possíveis alterações topológicas dos sistemas reais ao longo do tempo resultam em grandes limitações para o método proposto por Yonghai et al. (2012). Portanto, o método desenvolvido nessa tese apresentou um desempenho melhor, pois incrementou a taxa de acerto de 83,9% para 99,4%. Tal resultado confirma a eficácia e robustez do localizador da fonte do AMT desenvolvido.

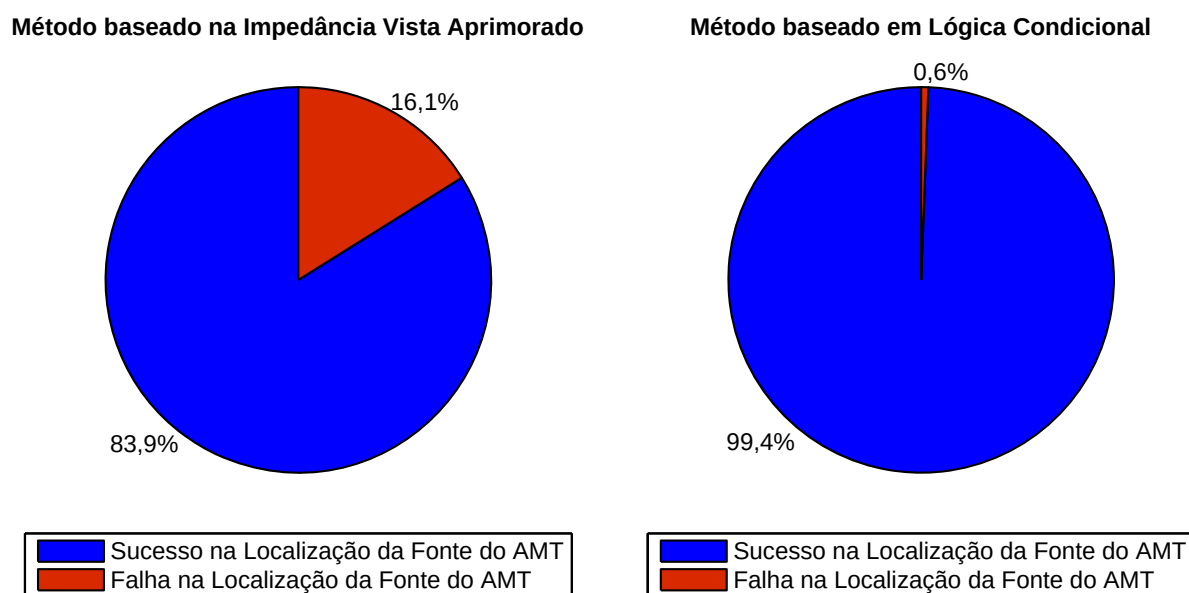


Figura 38 – Comparação entre os desempenhos obtidos pelo método desenvolvido e o método baseado na impedância vista modificada.

4.5 Considerações Finais

Os resultados apresentados neste capítulo foram de grande importância para comprovação do bom desempenho do método de localização da fonte do AMT desenvolvido. Após o conjunto de testes realizados, verificaram-se bons resultados para o sistema elétrico de transmissão e distribuição simulado. Devido às diversas características contempladas no sistema elétrico modelado, foi possível avaliar se o localizador da fonte do AMT desenvolvido foi capaz de solucionar alguns problemas apontados no Capítulo 2, resultando nos seguintes avanços:

- É possível utilizar apenas medições de tensão para localizar a fonte do AMT, pois, ao utilizar corretamente os parâmetros do transformador na fronteira, obtêm-se a estimação do fluxo de potência complexa com exatidão e precisão suficientes para o bom desempenho do método;
- O método desenvolvido foi capaz de localizar a fonte do AMT independente do tipo de falta ocorrida. Diferentemente da maioria dos métodos de localização da fonte do AMT existentes, o desempenho para faltas simétricas e assimétricas foi similar;
- O método que utiliza o algoritmo de relé de distância e o respectivo aprimoramento, não obteve o mesmo sucesso que o método desenvolvido nessa tese, por, possivelmente, utilizar valores de referência para a tomada de decisão (-40% para o índice da variação da impedância vista e 25° para o índice da variação do ângulo da impedância vista). Tais valores de referência podem ser adequados à um sistema e inadequados para outros, tornando o método pouco robusto e genérico;
- As possíveis inversões no fluxo de potência em relação à condição pré-AMT e os desafios de localização oriundos da topologia de sistemas elétricos malhados foram contemplados e o método de localização desenvolvido obteve bom desempenho considerando tais questões;
- Utilizar um conjunto de lógicas condicionais para tomada de decisão da localização da fonte do AMT baseado em comportamento qualitativo do fluxo de potência complexa na fronteira antes e durante o AMT resultou em bom desempenho do método;
- Foram registrados diversos casos aos quais ocorreram pequena variação de fluxo de potência durante o AMT, entretanto, apenas 03 casos resultaram em equívoco de localização (0,59%). Isso demonstrou que o localizador desenvolvido tem bom desempenho mesmo para os casos com pequenas variações da potência complexa estimada.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados de um conjunto de testes realizados em um sistema elétrico com características distintas do atual, ou seja, um sistema de distribuição alimentando um sistema elétrico industrial. Isto permitirá avaliar se o comportamento e desempenho do método poderão ou não ser generalizados para diferentes sistemas.

5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, o método de localização da fonte do AMT desenvolvido será avaliado num sistema elétrico com características típicas de plantas industriais com cogeração. O capítulo se inicia com a apresentação do sistema modelado, contemplando as informações da topologia e dos elementos que o compõe. Os pontos de monitoramento, os locais e os tipos de faltas são definidos. Na sequência, os resultados obtidos nas simulações, assim como, as análises pertinentes são apresentadas. Finalizando, uma análise comparativa entre o desempenho do método desenvolvido e o método de localização apresentado por (YONGHAI et al., 2012) é realizada.

5.2 Sistema Elétrico Industrial Modelado

O sistema elétrico em questão corresponde a uma refinaria de petróleo, conforme diagrama unifilar apresentado na Figura 39. Ele é composto por 13 barramentos principais com níveis de tensão de 138 e 13,8 kV, 5 transformadores delta-estrela com resistência de baixo valor no neutro (20Ω), totalizando 85MVA de capacidade instalada que alimenta aproximadamente 70MW de cargas, 5 turbogeradores totalizando potência de geração de 81MVA na média tensão. As cargas são compostas, tipicamente, por impedância constante (60%) e potência constante (40%) e 2 bancos de capacitores.

Cinco (5) medidores foram instalados nos transformadores nas fronteiras entre os sistemas de 138/13,8 kV (M1, M2, M3, M4 e M5), conforme mostrado no diagrama unifilar da Figura 39. Foram definidos um total de 9 pontos para simulações de faltas, sendo 4 pontos (F1, F2, F3 e F4) localizados no sistema de 138 kV e 5 pontos (F5, F6, F7, F8 e F9) no sistema de média tensão 13,8 kV.

Em cada ponto foram simuladas faltas trifásicas e monofásicas, todas com duração de 70ms e ângulo de incidência de falta de 0° . Tais combinações proporcionaram 18 casos de falta, avaliados nos 5 pontos de medição, totalizando 90 casos. O resultado de cada simulação é usado para obter, através do método implementado, a indicação do lado de origem do AMT em relação ao medidor correspondente, logo após o mesmo detectar o evento.

A Figura 40 ilustra, de forma simplificada, a topologia do sistema elétrico constituído pelos diversos subsistemas, as fronteiras, as localizações dos medidores e as indicações dos

pontos de falta considerados.

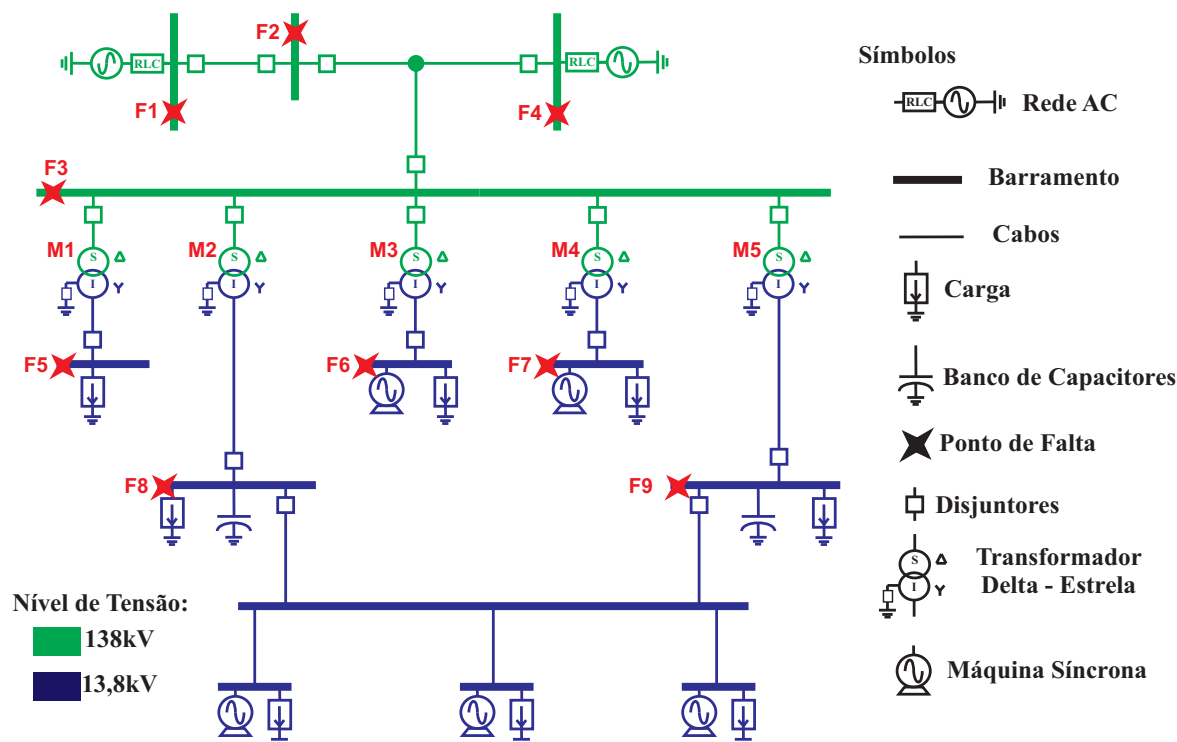


Figura 39 – Sistema Elétrico Industrial Modelado.

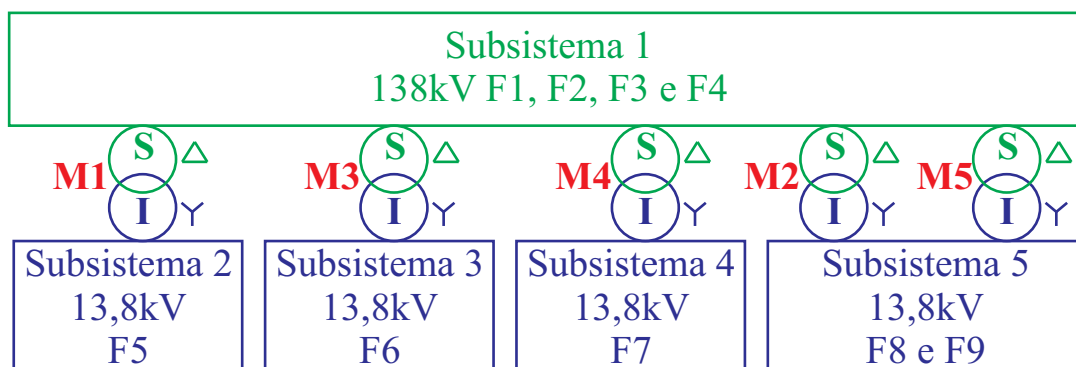


Figura 40 – Topologia do Sistema Elétrico Industrial Modelado.

A Tabela 8 apresenta o lado correto da fonte do AMT que cada medidor deverá localizar quando sensibilizado pelo evento, por sua vez causado pelas faltas simuladas. A letra “P” indica fonte do AMT do lado primário do transformador de fronteira e a letra “S” fonte do AMT do lado secundário do mesmo transformador. Os dados dos transformadores onde os medidores estão instalados encontram-se na Tabela 9.

O modelo foi criado no ATP para obtenção das tensões nos barramentos primário e secundário de cada um dos 5 transformadores monitorados e para cada uma das 18 faltas simuladas. O tempo de simulação considerado foi de 250 ms (15 ciclos), resultando em

Tabela 8 – Correta Localização da Fonte do AMT no Sistema Elétrico Industrial

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
M1	P	P	P	P	S	P	P	P	P
M2	P	P	P	P	P	P	P	S	S
M3	P	P	P	P	P	S	P	P	P
M4	P	P	P	P	P	P	S	P	P
M5	P	P	P	P	P	P	P	S	S

Tabela 9 – Dados dos Transformadores de Potência com medidores instalados.

Medidor	S_n [MVA]	Z % [%]	X/R	V_p - V_s [kV]	Conexão
M1	20	6	22,4	138 - 13,8	Dy1
M2	20	14,2	16,2	138 - 13,8	Dy1
M3	40	17	22,3	138 - 13,8	Dy1
M4	40	17,5	22,4	138 - 13,8	Dy1
M5	20	15,1	22,4	138 - 13,8	Dy1

4809 amostras de tensão por sinal medido ao longo da simulação, que representa uma taxa de amostragem de 320 amostras por ciclo. Cada simulação gerou um arquivo “.pl4” com todas as três tensões de fase dos dois barramentos de cada um dos 5 transformadores monitorados, totalizando 30 sinais monitorados por simulação.

5.3 Resultados Obtidos pelo Localizador da Fonte do AMT

As simulações das 18 faltas resultaram em 54 registros de AMT, representando uma média de 3,0 AMTs por falta. As Tabelas 10 e 11 apresentam a detecção do AMT registrado em cada monitor, considerando a ocorrência de todas as 9 faltas trifásicas e monofásicas simuladas, respectivamente.

Tabela 10 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta trifásica simulada - Sistema Elétrico Industrial.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
M1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
M2	1	1	1	1	0	0	0	1	1
M3	1	1	1	1	0	1	0	0	0
M4	1	1	1	1	0	0	1	0	0
M5	1	1	1	1	0	0	0	1	1

Os valores apresentados nas Tabelas 10 e 11 confirmam que todas as faltas ocorridas no sistema de 138kV ocasionaram AMTs em todos os monitores, conforme era esperado. Por outro lado, as faltas ocorridas nos diversos barramentos dos subsistemas de 13,8kV, na maioria dos casos, não sensibilizaram os monitores adjacentes. Tal resultado é explicado ao

Tabela 11 – Registros de AMTs em todos os monitores para cada falta monofásica simulada - Sistema Elétrico Industrial.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
M1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
M2	1	1	1	1	0	0	0	1	1
M3	1	1	1	1	0	1	0	0	0
M4	1	1	1	1	0	0	1	0	0
M5	1	1	1	1	0	0	0	1	1

considerar a elevada potência de curto-circuito no barramento primário dos transformadores, somada a existência de geração própria em alguns barramentos de média tensão.

As Tabelas 12 e 13 apresentam a taxa de sucesso de localização da fonte do AMT para cada monitor. A Tabela 12 apresenta as taxas de sucesso para as simulações de faltas trifásicas e a Tabela 13 para as faltas monofásicas.

Todos os AMTs detectados pelos respectivos monitores foram localizados corretamente, resultando em sucesso de localização de 100% dos casos.

Tabela 12 – Taxa de sucesso na localização da fonte do AMT em cada monitor - faltas trifásicas - Sistema Elétrico Industrial.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
M1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
M2	1	1	1	1	-	-	-	1	1
M3	1	1	1	1	-	1	-	-	-
M4	1	1	1	1	-	-	1	-	-
M5	1	1	1	1	-	-	-	1	1

Tabela 13 – Taxa de sucesso na localização da fonte do AMT em cada monitor - faltas monofásicas sólidas - Sistema Elétrico Industrial.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
M1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
M2	1	1	1	1	-	-	-	1	1
M3	1	1	1	1	-	1	-	-	-
M4	1	1	1	1	-	-	1	-	-
M5	1	1	1	1	-	-	-	1	1

Iniciando pela Figura 41, a mesma apresenta o comportamento da potência complexa durante o AMT no medidor M1 provocado por falta trifásica no ponto F1. Tal comportamento é típico para faltas no sistema a montante sem fonte no sistema a jusante. Nesse caso, ocorre a redução do fluxo de potência ativa e reativa em direção à origem do plano complexo.

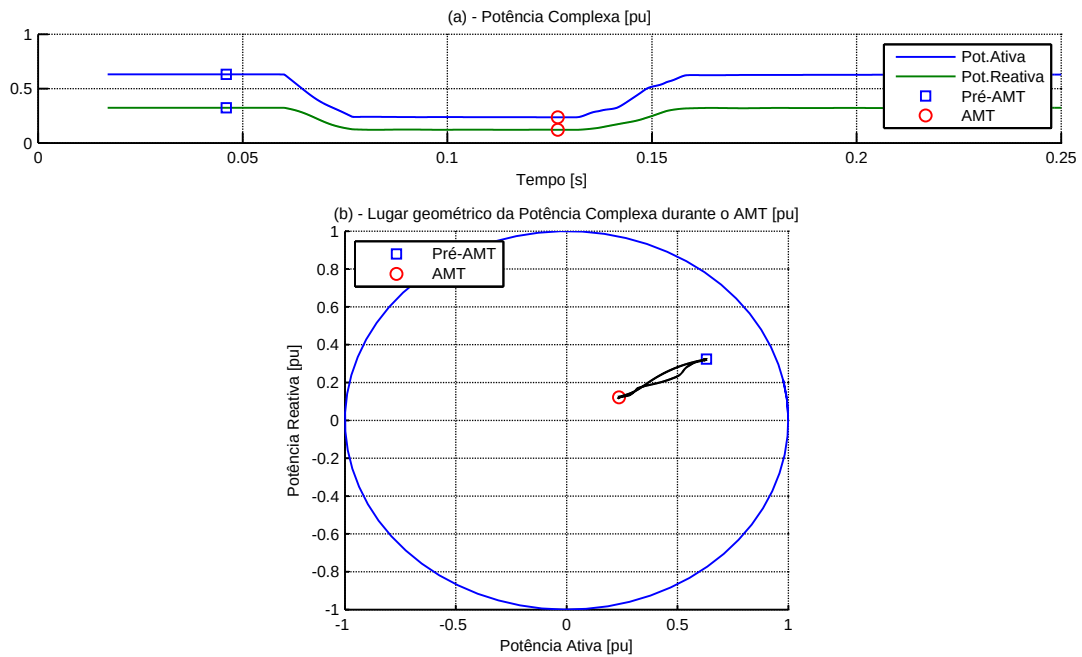


Figura 41 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F1 registrada pelo monitor M1.

A Figura 42 apresenta o comportamento do fluxo de potência complexa no monitor M1 para falta trifásica no ponto F5 (jusante). Verifica-se que ocorreu um aumento significativo na potência reativa indutiva exportada, pois todas as fontes localizadas a montante contribuem para a falta em F5.

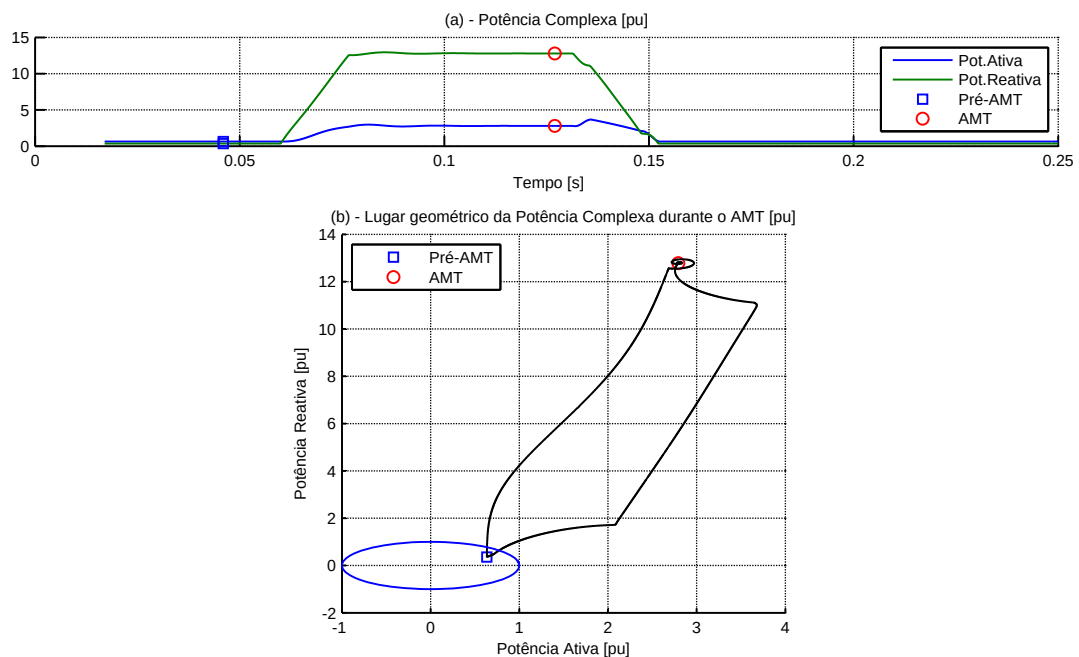


Figura 42 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F5 registrada pelo monitor M1.

Já na Figura 43, verifica-se que o fluxo de potência estimada pré-AMT no monitor M2 é pequeno tanto para potência ativa exportada, quanto para a potência reativa indutiva, nesse caso, importada. Esse pequeno fluxo de potência é explicado pela existência de cogeração no subsistema a jusante do monitor M2, que o torna praticamente autosuficiente em geração. Durante a falta é possível perceber que as fontes a jusante do monitor M2 fornecem potência para a falta localizada em F1 (3° quadrante do plano complexo). O conjunto de lógicas condicionais estabelecidas prevê esse tipo de comportamento e localiza corretamente a falta a montante do monitor M2.

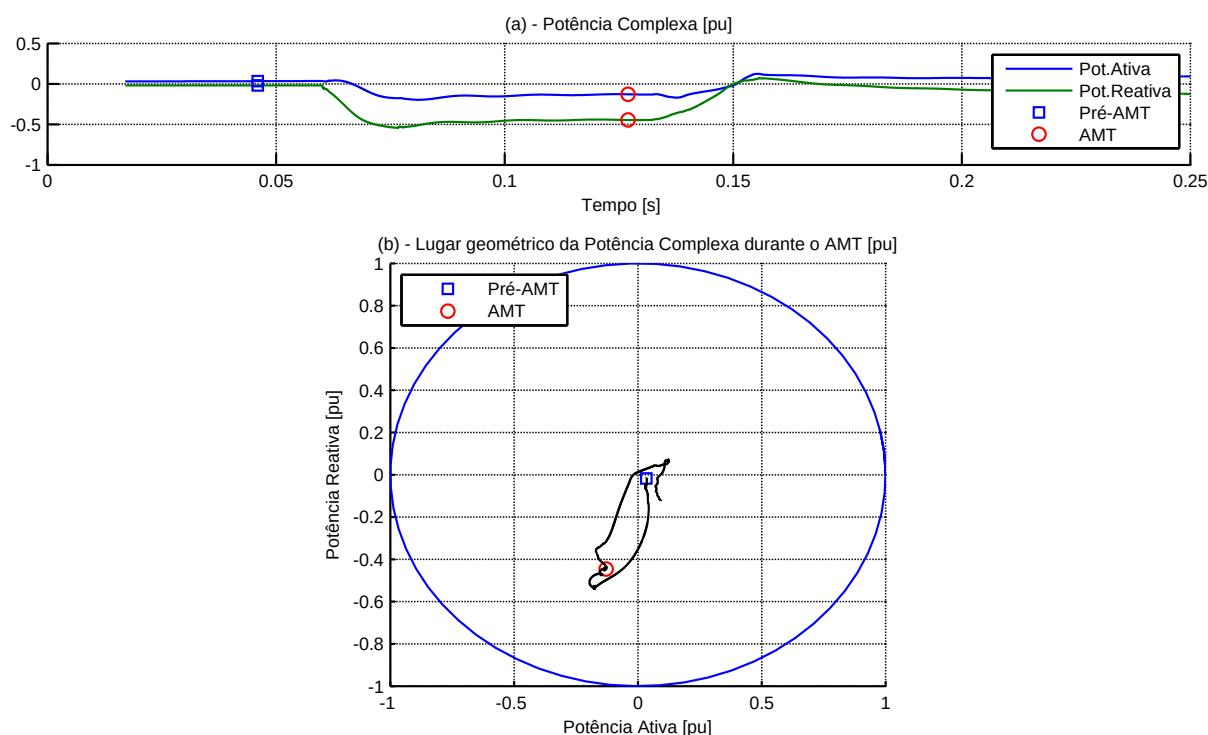


Figura 43 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F1 registrada pelo monitor M2.

A Figura 44, apresenta o comportamento do fluxo de potência no monitor M2 quando ocorre falta em F8. Verifica-se mais uma vez um aumento considerável no fluxo de potência no 1° quadrante, comportamento típico de falta no sistema a jusante.

Já na Figura 45 é apresentado o comportamento do fluxo de potência no monitor M2 quando ocorre falta monofásica em F1. Ao comparar com o comportamento do fluxo de potência, quando ocorre falta trifásica da Figura 43, verifica-se uma menor contribuição para a falta. A contribuição de sequência zero não ocorre pelo transformador devido ao fechamento dos enrolamentos primário e secundário (Dy1), consequentemente, o fluxo de potência registrado pelo monitor foi menor. Entretanto, a tendência do comportamento foi a mesma e possibilitou ao monitor localizar corretamente a fonte do AMT no sistema a montante.

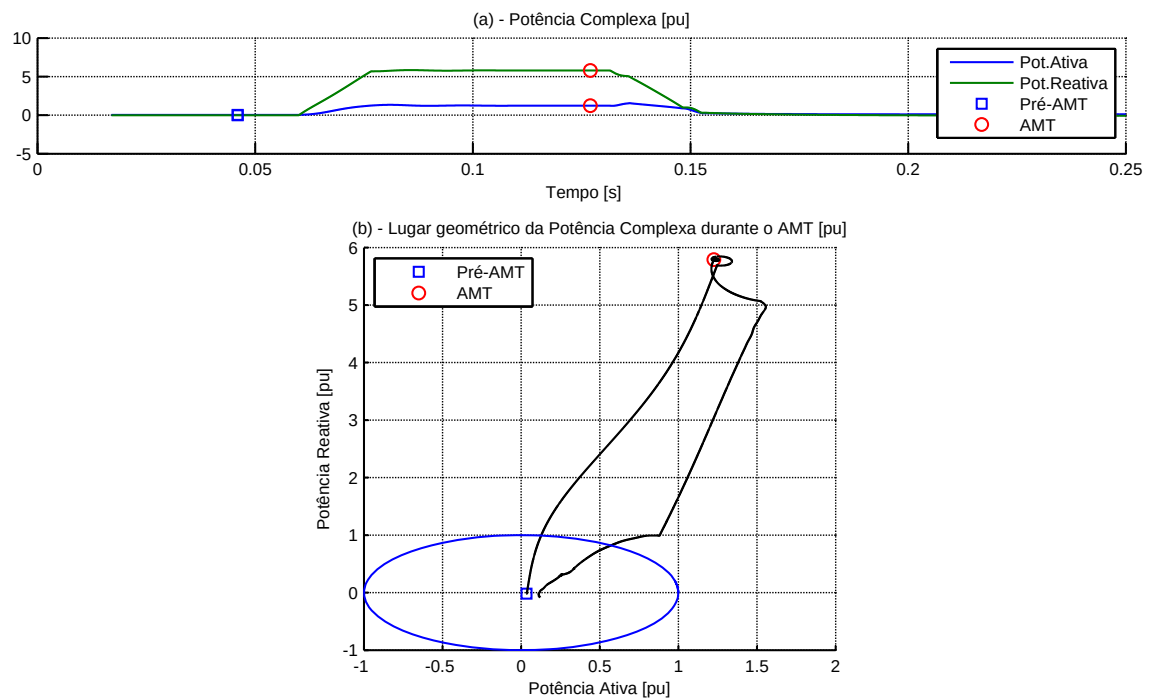


Figura 44 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta trifásica em F8 registrada pelo monitor M2.

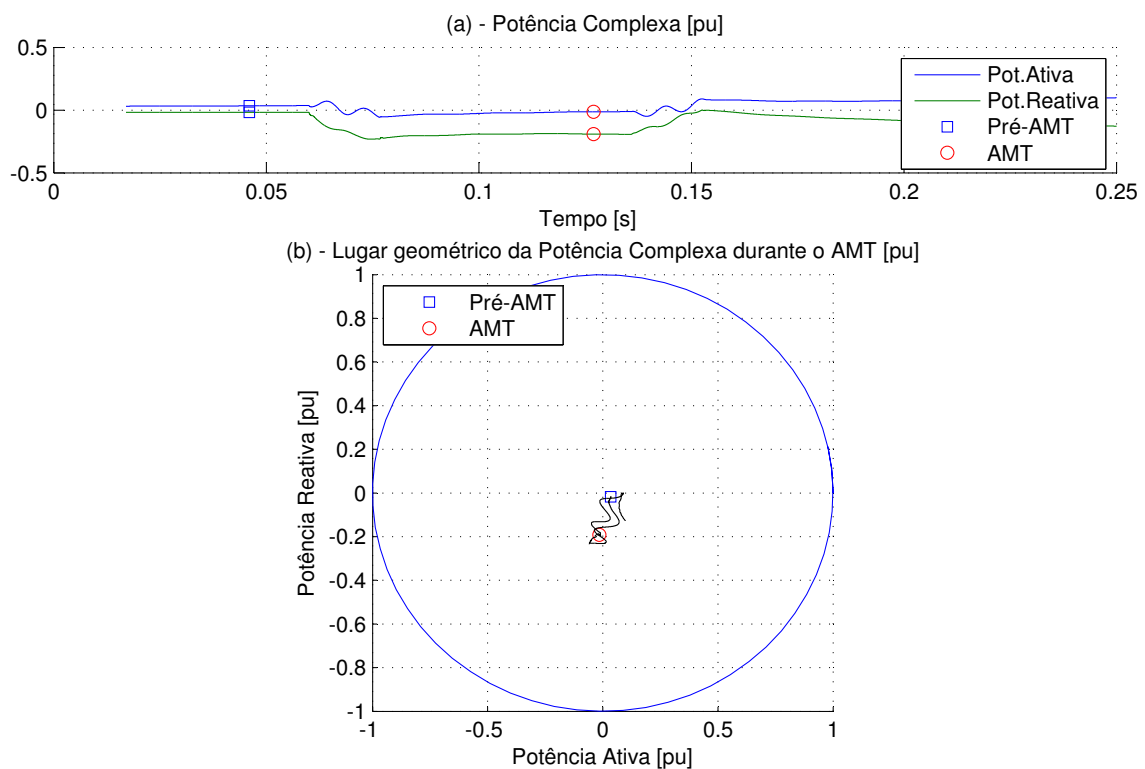


Figura 45 – Comportamento da potência complexa durante o evento - Falta monofásica em F1 registrada pelo monitor M2.

5.4 Comparação de Resultados com o Localizador baseado no Método de Impedância Vista Aprimorado

Novamente, a exemplo do que ocorreu na capítulo 4, o desempenho do método desenvolvido nessa tese foi comparado com o método proposto por Yonghai et al. (2012).

Após utilizar o mesmo conjunto de casos simulados já descritos, observa-se que 45 dos 54 AMTs registrados foram localizados corretamente pelo método de Yonghai et al. (2012). Esse resultado representa 83,3% de acerto na localização da fonte do AMT. Novamente, os 9 casos, os quais o localizador não obteve sucesso, ocorreram devido à dificuldade em determinar um limiar apropriado para tomada de decisão, com base nos índices de variação da impedância e de ângulo da impedância vista, somado à incapacidade do método de considerar o fluxo de potência pré-AMT sendo importado (condição comum em sistemas com cogeração). Apenas o limite de 25° para o índice da variação do ângulo da impedância vista foi capaz de separar adequadamente os casos montante e jusante de localização, conforme Figura 46 (b).

Os casos para os quais o localizador não obteve sucesso foram:

- Falta trifásica em F3 registrada pelo monitor M1;
- Falta trifásica em F2 registrada pelo monitor M4;
- Falta trifásica em F3 registrada pelo monitor M4;
- Falta monofásica em F5 registrada pelo monitor M1;
- Falta monofásica em F1 registrada pelo monitor M2;
- Falta monofásica em F1 registrada pelo monitor M4;
- Falta monofásica em F2 registrada pelo monitor M4;
- Falta monofásica em F3 registrada pelo monitor M4;
- Falta monofásica em F4 registrada pelo monitor M4;

A maioria das falhas de localização ocorreram no monitor M4, devido à condição do fluxo de potência pré-AMT no 3° quadrante do plano complexo. O método proposto não foi capaz de considerar essa condição de fluxo de potência pré-AMT, resultando em falha na localização da origem do evento. As duas falhas relacionadas ao monitor M1 ocorreram devido ao severo AMT no barramento monitorado. Especificamente para esses casos, o valor tão pequeno da impedância vista durante a falta permitiu que pequenos erros inerentes ao processo de aquisição e filtragem dos sinais simulados resultassem num

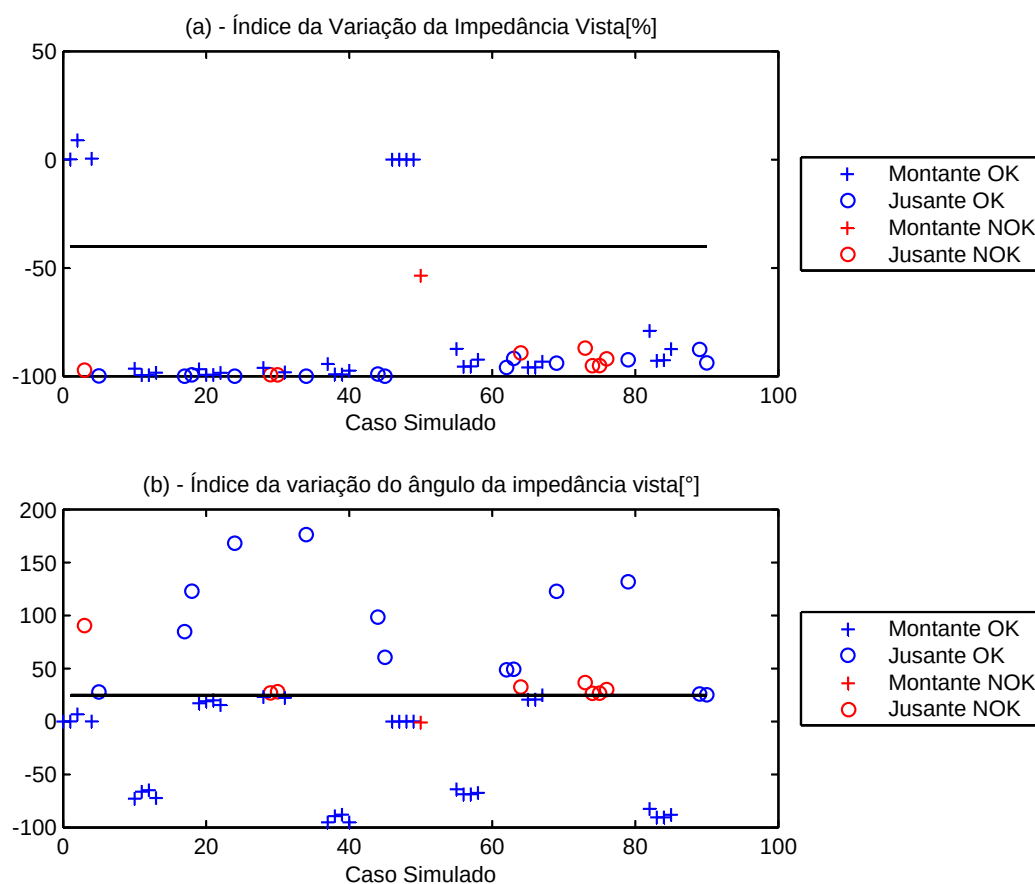


Figura 46 – Resultados do método de localização da fonte do AMT baseado na impedância vista modificada - índice da variação da impedância vista e índice da variação do ângulo da impedância vista - Sistema Elétrico Industrial

valor de resistência negativa. Tal problema poderia ser sanado caso o algoritmo utiliza-se o recurso da tensão de memória.

A comparação entre os desempenhos obtidos pelo método desenvolvido e o método baseado na impedância vista aprimorada é considerável. A Figura 47 apresenta em forma gráfica a comparação das taxas de acerto de ambos os métodos. As diversas variáveis envolvidas e as possíveis diferentes condições pré-AMT dos sistemas reais ao longo do tempo resultam em grandes limitações para o método proposto por Yonghai et al. (2012). Assim como mostrado no capítulo anterior, o método da impedância vista modificado (o melhor encontrado na literatura), não se mostrou efetivo também para o sistema analisado neste capítulo 5. Por sua vez, o método desenvolvido acertou em todos os casos simulados. Tal resultado confirma a eficácia e robustez do localizador da fonte do AMT desenvolvido.

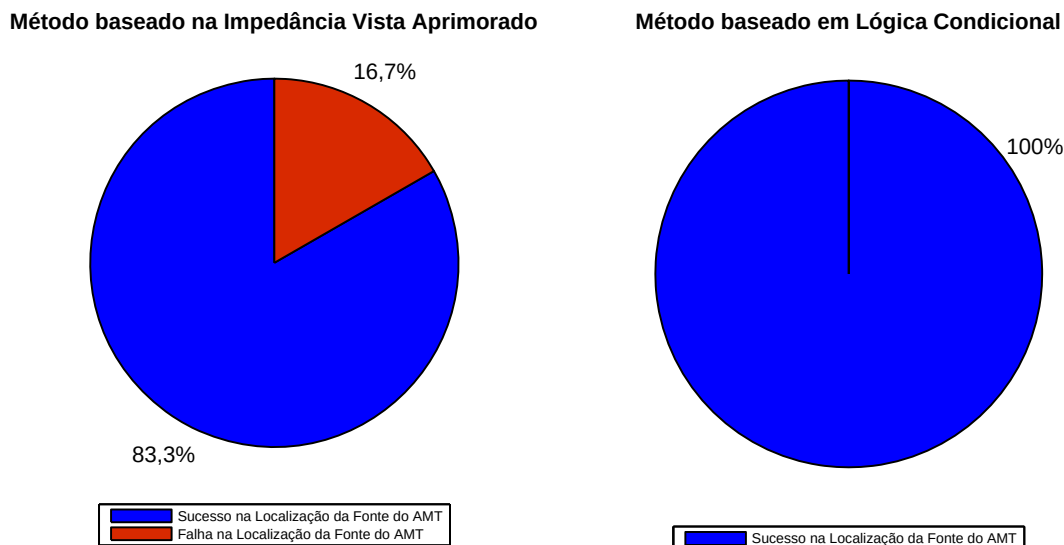


Figura 47 – Comparação entre os desempenhos obtidos pelo método desenvolvido e o método baseado na impedância vista modificada - Sistema Elétrico Industrial.

5.5 Considerações Finais

Os resultados apresentados neste capítulo também foram de grande importância para a validação do método de localização da fonte do AMT desenvolvido. O mesmo foi testado para outro tipo de sistema elétrico bastante característico, ou seja, um sistema industrial conectado a um sistema de distribuição. Após o conjunto de testes realizados, verificaram-se bons resultados também para este sistema simulado. Considerando as diferentes particularidades do mesmo, o qual inclui cargas rotativas com dinâmicas diversas de comportamento mecânico e elétrico e sistemas de cogeração controlados, foi possível avaliar se o localizador da fonte do AMT desenvolvido resolveu alguns problemas apontados no Capítulo 2, destacando-se:

- As possíveis inversões no fluxo de potência em condição pré-AMT foram contempladas e o método de localização desenvolvido obteve bom desempenho considerando tal questão;
- O comportamento dinâmico de algumas cargas no sistema elétrico industrial não acarretou em erros de localização, mesmo considerando apenas o comportamento qualitativo da variação do fluxo de potência estimado.

O conjunto de testes realizados no sistema elétrico industrial permitiu análises de diversas questões não solucionadas pelos métodos existentes e apresentados na literatura. As avaliações foram positivas, pois o método foi capaz de localizar a fonte do AMT em 100% dos casos simulados.

6 CONCLUSÃO

6.1 Conclusões Gerais

Para concluir este trabalho de tese faz-se necessária uma síntese das principais questões avaliadas, apresentadas e discutidas nos capítulos anteriores. Todo trabalho teve como meta o desenvolvimento de um novo algoritmo de localização da fonte de Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMTs). Este algoritmo é baseado apenas em medições de tensão (primário e secundário) do transformador de fronteira entre sistemas elétricos, bem como na análise qualitativa do comportamento do fluxo de potência estimado antes e durante um AMT. Destaca-se que o desenvolvimento de um novo método de localização da fonte do AMT, contribui de forma científica, tendo em vista inclusive uma inovação tecnológica (protótipo em *hardware* e patente), para os esforços relacionados à identificação do agente causador de AMTs. Algumas questões são aqui enfatizadas:

No Capítulo 1 foi apresentada a importância do fenômeno denominado AMT, levando em consideração os problemas e prejuízos que ele causa, sobretudo em consumidores industriais. A carência de índices de desempenho e normatização do fenômeno favorece o desentendimento entre os agentes do sistema elétrico, durante o processo de definição das responsabilidades pela ocorrência dos AMTs, suas consequências, bem como os prejuízos causados. Nesse ponto, a justificativa e o motivo para o desenvolvimento desta tese foram apresentados, com a premissa de que localizar a fonte do AMT, através de dados concretos obtidos por técnicas de localização confiáveis, é fundamental para o embasamento das discussões ora apresentadas.

Através de uma ampla revisão bibliográfica (apresentada no Capítulo 2) diversas metodologias de localização da fonte do AMT foram analisadas. A abordagem foi realizada considerando os tipos de sinais de monitoramento utilizados (tensão, corrente ou ambos) e cada técnica foi descrita evidenciando o princípio de funcionamento, as suas vantagens e as suas limitações. Foi destacado que, mesmo diante do razoável desempenho de alguns dos métodos de medição sistêmica de tensão, existe na prática uma limitação de aplicação devido às dificuldades inerentes à troca das informações entre agentes distintos do sistema elétrico, sendo esta troca de informações algo de grande importância para localizar a fonte do AMT. Também, foi descrito que existem métodos de localização baseados em medição pontual de tensão, ou de corrente ou de ambos, normalmente na fronteira. Os métodos baseados em medição de corrente, em sua grande maioria, têm como objetivo a localização exata de faltas (*pin-point*) em linhas de transmissão, com pouca aplicação relacionada aos propósitos desta tese. O mesmo vale para os métodos que utilizam sinais

de alta frequência (localização de faltas em linhas de transmissão usando ondas viajantes). Constatou-se que a maioria das técnicas de localização da fonte do AMT utilizam os sinais de tensão e de corrente. Dentre os diversos métodos avaliados, verificou-se o desempenho inadequado diante faltas assimétricas, em sistemas malhados e cargas com comportamentos dinâmicos. Tais características dificultam a correta localização da fonte do AMT. O método aprimorado baseado na impedância vista (YONGHAI et al., 2012) solucionou o problema relacionado a ausência de variação da impedância vista durante o AMT para faltas a montante quando não há fontes a jusante. Ao utilizar índices sensíveis a esse fenômeno, tal limitação foi sanada parcialmente, pois a utilização de valores de referência para tomada de decisão acarretou outra limitação. Dependendo do tipo de sistema, os limites considerados pelos autores podem não classificar adequadamente a origem do AMT, se a montante ou a jusante do ponto monitorado.

Uma vez confirmado que ainda existem desafios a serem superados sobre localização da fonte do AMT, foi desenvolvido um método de localização completamente diferente dos existentes. Nesse sentido, o Capítulo 3 deste texto, apresentou todas as premissas e os princípios de funcionamento da técnica desenvolvida, assim como todos os elementos que compõem o algoritmo concebido. A utilização do comportamento qualitativo do fluxo de potência antes e durante o AMT permitiu que o método se tornasse robusto o suficiente para lidar com grandezas associadas a algum tipo de incerteza. Isso permitiu que apenas medições das tensões nos terminais do transformador na fronteira entre dois sistemas fossem utilizadas para estimar a potência complexa, pois erros inerentes aos dados de placa do transformador não proporcionam erros relevantes na estimativa da potência (PASSOS; FILHO, 2014). O algoritmo é fundamentado na utilização de lógicas condicionais capazes de avaliar o comportamento esperado para o fluxo de potência quando ocorre um AMT originado por faltas nos sistemas. Para localizar a fonte do AMT, o algoritmo considera os comportamentos típicos do fluxo de potência na fronteira, sendo capaz de discriminar comportamentos distintos quando os sistemas elétricos possuem fonte de um único lado da fronteira ou em ambos os lados.

Após a concepção do método, vários testes foram realizados com o objetivo de avaliar o seu desempenho. Estes testes foram possíveis a partir de dados de simulação. Dois sistemas reais foram modelados e simulados no ATP, obtendo-se assim os sinais de tensão necessários para avaliar o desempenho do localizador.

No Capítulo 4, o foco foi dado a um sistema de transmissão e suas fronteiras com um sistema de distribuição. As estratégias de simulação, os motivos para a escolha do sistema de transmissão e distribuição, assim como os dados do sistema simulado foram apresentados.

Após realizar diversas simulações, foi constatado o bom desempenho do método de localização, com 99,4% de sucesso, frente aos AMTs gerados por faltas simétricas

e assimétricas. Também, foi realizada uma comparação de desempenho com o método aprimorado de localização baseado na impedância vista e, verificou-se que após aplicar o mesmo conjunto de testes, tal método alcançou um menor índice de acertos, ou seja, 83,9% de sucesso. Esse resultado confirmou a robustez e eficácia do método desenvolvido nesta tese. Contudo, cabe mencionar que o método errou em três casos simulados. A explicação para estes poucos casos de insucesso está relacionada ao fato de ter ocorrido um AMT pouco severo, ocasionado por faltas eletricamente distantes em relação ao ponto de monitoramento, provocando pequena variação do fluxo de potência estimado, sendo tal variação insuficiente para uma correta localização da fonte do AMT. Vale destacar que dentre os diversos AMTs poucos severos, foram poucos aqueles que o método teve insucesso e dificilmente esse tipo de AMT causará prejuízos.

Para demonstrar a efetividade e funcionalidade do método desenvolvido, o mesmo foi também testado para outro tipo de sistema elétrico. Assim, o foco do Capítulo 5 foi usar um sistema de distribuição conectado a um sistema industrial contendo cogeração. O objetivo foi avaliar o desempenho do localizador diante de sistemas com diferentes tipos de cargas, a exemplo de motores de indução trifásicos (MITs), bem como outras cargas (potência constante, impedância constante, etc.). Mais uma vez, tal sistema foi modelado e simulado no ATP, sendo os sinais obtidos usados no algoritmo do localizador da fonte dos AMTs. Após simulação de vários casos de faltas simétricas e assimétricas, foi constatado o bom desempenho do localizador, com 100% de sucesso, confirmando assim a robustez e eficácia do método desenvolvido.

Os comportamentos avaliados nos Capítulos 4 e 5 são esperados para os sistemas de transmissão e distribuição constituídos de geração síncrona. Entretanto, vale destacar que os comportamentos de sistemas com predominância de geração distribuída (geração eólica e fotovoltaica) e dispositivos FACTS não foram avaliados nesse trabalho.

Em resumo, ao avaliar o desempenho do método de localização da fonte do AMT desenvolvido, considerando dois diferentes sistemas elétricos (sistema de transmissão / distribuição e sistema de distribuição / sistema industrial), foram detectados ao todo 558 AMTs, dos quais o método obteve sucesso em 555 casos (99,46% de acerto).

Pode-se então concluir que o método de localização da fonte do AMT desenvolvido, avaliado e apresentado nesta tese, é uma alternativa de solução para apurar responsabilidades locais do fenômeno em sistemas elétricos radiais ou malhados, seja na transmissão, na distribuição ou em consumidores industriais típicos. Ressalta-se ainda que tal algoritmo pode ser incorporado como uma nova funcionalidade nos relés de proteção ou nos monitores de QEE. Por fim, destaca-se que o localizador desenvolvido pode utilizar apenas medição de tensão ou, em caso de disponibilidade, também a medição das correntes. Este trabalho focou o caso em que apenas tensões no ponto de fronteira são usadas, sem com isso, perder a habilidade desejada.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Embora os objetivos traçados nessa tese tenham sido alcançados, ações relacionadas à melhoria do método e a avaliação de desempenho devem ser realizadas. Para dar sequência ao trabalho desta tese, propõem-se as seguintes atividades complementares:

- Avaliar o desempenho do método através de simulação de um sistema elétrico com características que contemplem elementos tais como, fontes alternativas de energia, sobretudo a eólica, e compensadores estáticos no sistema de transmissão e seus respectivos sistemas eletrônicos de controle e proteção;
- Avaliar o desempenho do método desenvolvido considerando os diversos modelos de carga (impedância, corrente e potência constantes) e tipos de cargas (MITs alimentados diretamente ou através de acionamentos com frequência variável);
- Avaliar o desempenho do método desenvolvido para outras fontes causadoras de AMT, por exemplo, partida de motores de grande porte e energização de transformadores;
- Avaliar a utilização de *Phasor Measurement Units* - PMU para aquisição dos sinais de tensão;
- Desenvolver um protótipo do localizador da fonte do AMT;
- Avaliar o desempenho do protótipo através de um Simulador Digital em Tempo Real (*Real Time Digital Simulator* - RTDS);
- Instalar alguns protótipos desenvolvidos num sistema elétrico real (sistema de transmissão, distribuição e/ou industrial);
- Avaliar a possibilidade de aplicação do localizador em transformadores de três circuitos.

Referências

- ABRACE, A. B. de Grandes Consumidores Industriais de Energia e C. L. *Contribuições referentes à Consulta Pública Nº 018/2014*. 2014. <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Abrace20CP018_2014.pdf>. Acesso: 16/10/2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.
- ABRADEE, A. B. de Distribuidores de E. E. *Contribuições referentes à Consulta Pública Nº 018/2014*. 2014. <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/ABRADEE20CP20018_2014.pdf>. Acesso: 16/10/2015. Citado na página 18.
- AHN, S.-J. et al. Determination of the relative location of voltage sag source according to event cause. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 620–625 Vol.1. Citado na página 31.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - PRODIST*. 2015. <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisao_6_Retificacao_1.pdf>. Acesso: 12/08/2015. Citado na página 18.
- BABAEI, E.; KANGARLU, M.; SABAHI, M. Mitigation of voltage disturbances using dynamic voltage restorer based on direct converters. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 4, p. 2676–2683, Oct 2010. ISSN 0885-8977. Citado na página 17.
- BLAABJERG, F. et al. The future of electronic power processing and conversion. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 41, n. 1, p. 3–8, Jan 2005. ISSN 0093-9994. Citado na página 16.
- BLANCO, J.; PETIT, J.; ORDONEZ, G. Algorithm for relative location of voltage sags and capacitor switching transients based on voltage measurements only. In: *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 833–837. Citado na página 23.
- BOLLEN, M. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. [S.l.]: Wiley, 2000. (IEEE - TP 139-0). ISBN 9780780347137. Citado na página 17.
- BOSE, B. Global energy scenario and impact of power electronics in 21st century. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 60, n. 7, p. 2638–2651, July 2013. Citado na página 16.
- CHANG, G. et al. On tracking the source location of voltage sags and utility shunt capacitor switching transients. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 4, p. 2124–2131, Oct 2008. ISSN 0885-8977. Citado na página 23.
- CHEN, P.-C. et al. Sensitivity analysis of voltage sag based fault location with distributed generation. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 6, n. 4, p. 2098–2106, July 2015. ISSN 1949-3053. Citado na página 23.
- DAS, S.; KARNIK, N.; SANTOSO, S. Distribution fault-locating algorithms using current only. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 27, n. 3, p. 1144–1153, July 2012. ISSN 0885-8977. Citado na página 28.

- DAS, S. et al. Distribution fault location using short-circuit fault current profile approach. In: *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–7. ISSN 1944-9925. Citado na página 28.
- DELFINO, B.; FORNARI, F.; PROCOPIO, R. An effective ssc control scheme for voltage sag compensation. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 3, p. 2100–2107, July 2005. ISSN 0885-8977. Citado na página 17.
- DONG, Y.; ZHENG, C.; KEZUNOVIC, M. Enhancing accuracy while reducing computation complexity for voltage-sag-based distribution fault location. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 28, n. 2, p. 1202–1212, April 2013. ISSN 0885-8977. Citado na página 23.
- DUGAN, R. et al. *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2012. (McGraw-Hill's AccessEngineering). ISBN 9780071761550. Citado na página 16.
- ESPINOSA-JUAREZ, E.; HERNANDEZ, A.; OLGUIN, G. An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 4, p. 2034–2042, Oct 2009. ISSN 0885-8977. Citado na página 22.
- FAU, F. de A. U. *Relatório Técnico - Revisão Bibliográfica*. 2014. <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota20TC3A9cnica_0105_SRD-Anexo20I20_RelatC3B3rio_1_FINAL.pdf>. Acesso: 16/10/2015. Citado na página 18.
- GALIJASEVIC, Z.; ABUR, A. Fault location using voltage measurements. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 17, n. 2, p. 441–445, Apr 2002. ISSN 0885-8977. Citado na página 23.
- GOMEZ, J. et al. A novel methodology to locate originating points of voltage sags in electric power systems. In: *Electricity Distribution, 2005. CIRED 2005. 18th International Conference and Exhibition on*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–3. Citado na página 24.
- GOMEZ, J. et al. Distributed generation: impact on protections and power quality. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, v. 11, n. 1, p. 460–465, Feb 2013. ISSN 1548-0992. Citado na página 16.
- GOSWAMI, A.; GUPTA, C.; SINGH, G. Voltage sag assessment in a large chemical industry. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 48, n. 5, p. 1739–1746, Sept 2012. ISSN 0093-9994. Citado na página 17.
- HAMZAH, N.; MOHAMED, A.; HUSSAIN, A. A new approach to locate the voltage sag source using real current component. *Electric Power Systems Research*, v. 72, n. 2, p. 113–123, 2004. ISSN 0378-7796. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.
- HAMZAH, N.; MOHAMED, A.; HUSSAIN, A. Locating voltage sag source at the point of common coupling in industrial distribution systems. In: *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 532–537. Citado na página 32.

- IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)*, p. c1–81, June 2009. Citado na página 16.
- KANG, N.; LIAO, Y. Fault location estimation using current magnitude measurements. In: *IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon), Proceedings of the*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 214–217. Citado na página 28.
- KANOKBANNAKORN, W.; SAENGSIWAN, T.; SIRISUKPRASERT, S. Unbalanced voltage sag source location identification based on superimposed quantities and negative sequence. In: *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 617–620. Citado na página 31.
- KHOSRAVI, A. et al. A hybrid method for sag source location in power network. In: *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–6. Citado na página 23.
- KIM, K.-N. et al. A method to determine the relative location of voltage sag source for pq. In: *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 3, p. 2192–2197 Vol. 3. Citado na página 31.
- KONG, W.; DONG, X.; CHEN, Z. Voltage sag source location based on instantaneous energy detection. *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 11, p. 1889 – 1898, 2008. ISSN 0378-7796. Citado na página 31.
- LEBORGNE, R.; KARLSSON, D.; DAALDER, J. Voltage sag source location methods performance under symmetrical and asymmetrical fault conditions. In: *Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6. Citado na página 34.
- LEE, K.; VENKATARAMANAN, G.; JAHNS, T. Modeling effects of voltage unbalances in industrial distribution systems with adjustable-speed drives. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 44, n. 5, p. 1322–1332, Sept 2008. ISSN 0093-9994. Citado na página 52.
- LEE, W. C.; LEE, D. M.; LEE, T. K. New control scheme for a unified power-quality compensator-q with minimum active power injection. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 2, p. 1068–1076, April 2010. ISSN 0885-8977. Citado na página 17.
- LI, C. et al. Method for voltage-sag-source detection by investigating slope of the system trajectory. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 150, n. 3, p. 367–372, May 2003. ISSN 1350-2360. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.
- LIAO, Y. Fault location using sparse current measurements. In: *Power Symposium, 2007. NAPS '07. 39th North American*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–6. Citado na página 28.
- LOPES, F.; FERNANDES, D.; NEVES, W. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, July 2013. ISSN 0885-8977. Citado na página 30.
- LOPES, F. et al. Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 30, n. 3, p. 1067–1076, June 2015. ISSN 0885-8977. Citado na página 30.

- MACII, D.; PETRI, D.; ZORAT, A. Accuracy analysis and enhancement of dft-based synchrophasor estimators in off-nominal conditions. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, v. 61, n. 10, p. 2653–2664, Oct 2012. ISSN 0018-9456. Citado na página 40.
- MAKALIKI, R.; LEBORGNE, R. Voltage sag source location: Case study in zambian grid. In: *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica '07. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–5. Citado na página 26.
- MELO, M.; CAVALCANTI, G. Evaluation of the impacts of electric power quality costs in industrial production: Case studies in northeast brazil. In: *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 470–475. ISSN 1540-6008. Citado na página 16.
- PARSONS, A. et al. A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 3, p. 1081–1086, Jul 2000. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.
- PASSOS, F. O.; FILHO, J. de C. Power flow estimation based on power transformer plate data and voltage measurement. In: *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 352–356. Citado 3 vezes nas páginas 44, 53 e 93.
- PEDRA, J.; CORCOLES, F.; SUELVE, F. Effects of balanced and unbalanced voltage sags on vsi-fed adjustable-speed drives. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 1, p. 224–233, Jan 2005. ISSN 0885-8977. Citado na página 52.
- PEREIRA, R. et al. Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 2, p. 852–862, April 2009. ISSN 0885-8977. Citado na página 23.
- PHADKE, A. et al. A microcomputer based symmetrical component distance relay. In: *Power Industry Computer Applications Conference, 1979. PICA-79. IEEE Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1979. p. 47–55. Citado na página 41.
- POLAJZER, B.; RTUMBERGER, G.; DOLINAR, D. Instantaneous positive-sequence current applied for detecting voltage sag sources. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 9, n. 4, p. 319–327, 2015. ISSN 1751-8687. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- POLAJZER, B. et al. Generalization of methods for voltage-sag source detection using vector-space approach. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 45, n. 6, p. 2152–2161, Nov 2009. ISSN 0093-9994. Citado na página 34.
- POPOVIC-GERBER, J.; FERREIRA, J.; WYK, J. Quantifying the value of power electronics in sustainable electrical energy systems. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 12, p. 3534–3544, Dec 2011. ISSN 0885-8993. Citado na página 16.
- POURAHMADI-NAKHLI, M.; SAFAVI, A. Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 2, p. 772–781, April 2011. ISSN 0885-8977. Citado na página 29.

- PRADHAN, A.; ROUTRAY, A. Applying distance relay for voltage sag source detection. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 1, p. 529–531, Jan 2005. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 34.
- QIAN-QIAN, G. et al. Comparison of methods for voltage sag source location in distribution system. In: *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 499–503. ISSN pending. Citado na página 34.
- RAUF, A.; KHADKIKAR, V. An enhanced voltage sag compensation scheme for dynamic voltage restorer. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 62, n. 5, p. 2683–2692, May 2015. ISSN 0278-0046. Citado na página 17.
- REID, W. Power quality issues-standards and guidelines. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 32, n. 3, p. 625–632, May 1996. ISSN 0093-9994. Citado na página 16.
- SANTOSO, S. et al. Characterization of distribution power quality events with fourier and wavelet transforms. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 1, p. 247–254, Jan 2000. ISSN 0885-8977. Citado na página 29.
- SCHLABBACH, J.; ROFALSKI, K. *Power System Engineering: Planning, Design, and Operation of Power Systems and Equipment*. [S.l.]: Wiley, 2014. ISBN 9783527412600. Citado na página 48.
- SHAO, Z.; PENG, J.; KANG, J. Locating voltage sag source with impedance measurement. In: *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. Citado na página 32.
- SHAREEF, H.; MOHAMED, A. An alternative voltage sag source identification method utilizing radial basis function network. In: *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–4. Citado na página 23.
- SIDHU, T.; ZHANG, X.; BALAMOUGAN, V. A new half-cycle phasor estimation algorithm. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 2, p. 1299–1305, April 2005. ISSN 0885-8977. Citado na página 41.
- SRD, S. de Regulação dos Serviços de D. *Nota Técnica 0105/2014*. 2014. <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota20TC3A9cnica_0105_SRD.pdf>. Acesso: 16/10/2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.
- TAYJASANANT, T.; LI, C.; XU, W. A resistance sign-based method for voltage sag source detection. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 4, p. 2544–2551, Oct 2005. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.
- VEGUNTA, S.; MILANOVIC, J. Estimation of cost of downtime of industrial process due to voltage sags. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 2, p. 576–587, April 2011. ISSN 0885-8977. Citado na página 17.
- WANG, B.; VENKATARAMANAN, G. Dynamic voltage restorer utilizing a matrix converter and flywheel energy storage. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 45, n. 1, p. 222–231, Jan 2009. ISSN 0093-9994. Citado na página 17.
- YILIN, Y.; YONGHAI, X. Research of method for voltage sag source detection in power distribution network. In: *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 485–488. ISSN pending. Citado na página 33.

YONGHAI, X. et al. Research of method for voltage sag source location in power system. In: *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012 IEEE 15th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 816–822. ISSN 1540-6008. Citado 8 vezes nas páginas 33, 60, 79, 80, 82, 89, 90 e 93.

YU, C.-S.; HUANG, Y.-S.; JIANG, J.-A. A full- and half-cycle dft-based technique for fault current filtering. In: *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 859–864. Citado na página 41.

APÊNDICE A – Artigos Publicados

Esta tese de doutorado gerou o seguinte artigo publicado em periódico classificado no Qualis B1 da CAPES:

PASSOS, F. et al. An alternative approach to locating voltage sag source side at the point of common coupling based on power-flow information. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer US, v. 26, n. 5, p. 579–587, 2015.

Além do artigo publicado em periódico, foram publicados em conferência internacional os seguintes artigos:

PASSOS, F. O.; FILHO, J. de C. Power flow estimation based on power transformer plate data and voltage measurement. In: *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 352–356.

PASSOS, F. O.; FILHO, J. de C.; SILVEIRA, P. da. Real time digital simulation of utility and industrial co-generation system interconnection - evaluating a new approach of voltage sag source locator. In: *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 14–18.