

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1218

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DE OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA
PARA TESTES EM RELÉS DE DISTÂNCIA**

JOHNNY SOUZA ANDRADE

DATA DA DEFESA: 15/12/2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DE OSCILAÇÕES DE
POTÊNCIA PARA TESTES EM RELÉS DE DISTÂNCIA**

JOHNNY SOUZA ANDRADE

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia de Potência.
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Clever Sebastião Pereira Filho.

BELO HORIZONTE
DEZEMBRO – 2020

A533c	<p>Andrade, Johnny Souza. Caracterização e modelagem de oscilações de potência para testes em relés de distância [recurso eletrônico] / Johnny Souza Andrade. - 2020. 1 recurso online (vii, 114 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 109-114.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Impedância (Eletricidade) - Teses. 3. Relés elétricos - Teses. I. Pereira Filho, Clever Sebastião. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 621.3(043)

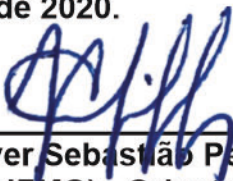
**"Caracterização e Modelagem de Oscilações de Potência Para
Testes Em Relés de Distância"**

JOHNNY SOUZA ANDRADE

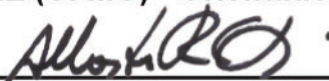
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 15 de dezembro de 2020.

Por:



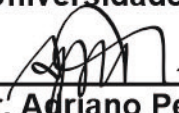
Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Alberto Resende De Conti
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho
DEELT (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)



Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes
PPGEE (UFSM - Universidade Federal de Santa Maria)

*“That's one small step for a man, one giant
leap for mankind.” Neil Armstrong*

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me conceder saúde, motivação e sabedoria, imprescindíveis à realização deste trabalho.

Aos meus familiares, especialmente meus pais, José Maria e Maria Aparecida, e ao meu irmão Johnatha Souza, que não mediram esforços para me apoiar e incentivar, mesmo estando distantes geograficamente.

Ao meu orientador Clever Sebastião Pereira Filho pela dedicação no desenvolvimento de ideias e definição de metodologia científica para elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Alberto De Conti, pelas importantes contribuições às soluções no domínio do tempo empregadas, em especial o modelo RL trifásico acoplado, e pela coautoria nos artigos científicos resultantes desta pesquisa.

Aos meus colegas do PPGEE que auxiliaram na revisão dos artigos e da dissertação, em especial, Adilton Júnio (parceria firmada desde os tempos da graduação), Débora Coelho, Geraldo Rodrigues, Henrique dos Reis e Mateus Franco.

Aos meus colegas da CEMIG GT pelas contribuições práticas dadas à metodologia de testes dos algoritmos destinados ao bloqueio e disparo por oscilação de potência.

À CEMIG GT pela concessão de jornada de trabalho flexível, em regime de compensação, essencial à participação das aulas em horários comerciais.

Resumo

As perturbações sistêmicas que afetam o balanço carga-geração podem ocasionar a aceleração ou o atraso do ângulo do rotor dos geradores síncronos em relação à frequência síncrona, dando origem às oscilações de potência. O impacto deste fenômeno nos terminais das linhas de transmissão consiste essencialmente em flutuações dos valores de tensão e corrente, podendo ocasionar atuação indevida da função de distância (ANSI 21) em relés de proteção. De forma a impedir esta situação, a detecção do fenômeno e a tomada de decisão são feitas por meio de funções específicas destinadas ao bloqueio (ANSI 68) e disparo (ANSI 78) por oscilação de potência. Com o objetivo de se analisar a ocorrência do fenômeno e possibilitar a execução de testes de algoritmos das funções 68-78, foram realizados neste trabalho a caracterização das principais grandezas que são afetadas durante oscilações de potência e o equacionamento analítico e numérico de dois modelos de teste destinados à geração de sinais de tensão e corrente.

A caracterização compreendeu implementação no MATLAB® e validação no *Alternative Transients Program* (ATP) das grandezas instantâneas e fasoriais corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, impedância e velocidade da impedância, durante oscilações. A geração de sinais de oscilação de potência em *softwares* não-comerciais é geralmente limitada, pois a parametrização de tempos, velocidades de impedância e trajetórias podem não estar disponíveis. Os dois modelos (sistemas teste) equacionados neste trabalho possibilitam simulação de oscilações de potência estáveis, instáveis e em especial com trajetórias editáveis, de forma parametrizável pelo usuário.

A leitura dos sinais gerados e a posterior tomada de decisão (bloqueio, desbloqueio ou *trip*) é realizada pelas funções de proteção 68-78, implementadas por meio dos algoritmos “Método das Características Concêntricas” e “Método da Variação da Tensão do Centro Elétrico”, os quais são comparados. Os resultados obtidos demonstraram-se satisfatórios, nos diversos casos simulados, dado que os sinais instantâneos gerados conseguiram realizar a trajetória de impedância parametrizada e o fenômeno pôde ser corretamente identificado por ambos algoritmos.

Palavras-chave: Bloqueio por oscilação de potência. Modelo de oscilação de potência. Perda de Sincronismo. Taxa de variação da impedância. Trajetória da impedância.

Abstract

Systemic disturbances that affect the load-generation balance may cause rotor angle acceleration or delay of the synchronous generators in relation to the synchronous frequency, giving rise to power swings. The impact of this phenomenon on the transmission line terminals consists essentially of fluctuations in voltage and current values, which may cause improper actuation of the distance function (ANSI 21) in protective relays. In order to prevent this situation, the phenomenon detection and decision-making is done through specific functions designed for power swing blocking (ANSI 68) and out-of-step tripping (ANSI 78). In order to analyze the occurrence of the phenomenon and enable the execution of tests of algorithms of functions 68-78, we performed the characterization of the main quantities that are affected during power swings, and the analytical and numerical equation of two models designed for voltage and current signals generation.

The characterization included implementation in MATLAB[®] and validation in the Alternative Transients Program (ATP) of instantaneous and phasor quantities current, voltage, active power, reactive power, impedance and impedance velocity during oscillations. Power swing signals generation in non-commercial software is generally limited as time, impedance velocity, and trajectory parameters may not be available. The two models (test systems) equated in this work allow simulation of stable, unstable and in special, editable trajectory power swings, which can be parameterized by the user.

The reading of the generated signals and the subsequent decision making (blocking, unblocking or tripping) is performed by the protection functions 68-78, implemented through the algorithms “Concentric Characteristics Method” and “Swing Center Voltage Method”, which are compared. The results were satisfactory in the simulated cases, since the instantaneous signals generated were able to perform the parameterized impedance path and both algorithms could correctly identify the phenomenon.

Keywords: Power swing blocking. Power swing model. Out-of-step. Rate of change of impedance. Impedance Trajectory.

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Considerações iniciais e relevância	1
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivos.....	5
1.4	Metodologia	5
1.5	Produção Bibliográfica	7
1.6	Organização do texto	7
2	Caracterização do fenômeno oscilação de potência	9
2.1	Sistema equivalente de duas máquinas	9
2.2	Solução analítica	10
2.3	Solução no domínio do tempo discreto.....	13
2.4	Efeito das oscilações de potência nos relés de distância.....	16
2.4.1	Estimação fasorial.....	16
2.4.2	Trajetória da impedância no plano RX.....	17
2.4.3	Cálculo da velocidade da impedância	22
2.4.4	Cálculo das potências ativa e reativa.....	24
2.5	Resultados da caracterização do fenômeno	26
2.5.1	Metodologia de testes	26
2.5.2	Sinais instantâneos de corrente, tensão e potência	27
2.5.3	Fasores corrente, tensão e potência ativa.....	28
2.5.4	Comparação da estimação fasorial	29
2.5.5	Plano RX	30
2.5.6	Velocidade da impedância.....	31

3	Modelos para geração de sinais de oscilação de potência.....	32
3.1	Considerações iniciais.....	32
3.2	Modelo para oscilações estáveis e instáveis	33
3.2.1	Modelo equivalente de duas máquinas com inclusão de faltas	33
3.2.2	Circuito RL Trifásico acoplado: modelo numérico.....	34
3.2.3	Cálculo de faltas no domínio do tempo	38
3.2.4	Parametrização de oscilação de potência instável	42
3.2.5	Parametrização de oscilação de potência estável	42
3.3	Modelo para oscilações de potência com trajetórias editáveis	45
3.3.1	Modelo equivalente de uma máquina.....	45
3.3.2	Parametrização da trajetória da impedância	45
3.3.3	Solução fasorial a cada instante.....	47
4	Algoritmos para detecção de oscilações de potência	51
4.1	Considerações iniciais.....	51
4.2	Método das Características Concêntricas (MCC).....	53
4.2.1	Filosofia de operação.....	53
4.2.2	Implementação computacional do MCC	55
4.3	Detector de faltas simétricas e assimétricas durante oscilações de potência	57
4.4	Método do duplo <i>blinder</i> (MDB).....	61
4.5	Método da Variação da Tensão do Centro Elétrico (MVTCE)	63
4.5.1	Tensão do centro elétrico (SCV)	63
4.5.2	Implementação computacional do MVTCE.....	68

5	Resultados e discussões	74
5.1	Considerações iniciais.....	74
5.2	Aplicação do modelo de duas máquinas.....	75
5.2.1	Oscilações de potência estáveis sem ocorrência de faltas	76
5.2.2	Faltas simétricas durante oscilações de potência estáveis	80
5.2.3	Faltas assimétricas durante oscilações de potência estáveis.....	85
5.2.4	Oscilações de potência instáveis.....	88
5.2.5	Faltas simétricas e assimétricas sem oscilação de potência	93
5.3	Aplicação do modelo de uma máquina.....	95
5.3.1	Oscilações de potência estáveis com trajetórias editáveis.....	96
5.3.2	Oscilações de potência instáveis com trajetórias editáveis	100
6	Conclusões e Propostas de Continuidade.....	103
6.1	Conclusões	103
6.1.1	Caracterização do fenômeno	103
6.1.2	Modelos para geração de sinais de oscilação de potência	104
6.1.3	Algoritmos MCC e MVTCE	105
6.2	Propostas de Continuidade.....	107
	Referências Bibliográficas	109

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais e relevância

O fenômeno de oscilação de potência caracteriza-se pela variação do fluxo de potência trifásico que ocorre quando o ângulo do rotor de um ou mais geradores do sistema de potência está em movimento de avanço ou atraso em relação à velocidade angular síncrona. Trata-se de um transitório eletromecânico de constante de tempo relativamente elevada, cuja ocorrência se dá mediante a variação da frequência das tensões em uma ou mais barras do sistema. Esse fenômeno é causado por variações de carga, tanto em módulo quanto em ângulo, chaveamento de linhas, perdas de geração, curtos-circuitos e outros distúrbios sistêmicos (IEEE PSRC WG D6, 2005).

A oscilação de potência resulta em flutuações/variações de tensão e corrente em linhas de transmissão. Como consequência, verifica-se uma alteração na trajetória da impedância aparente vista por relés de distância, que pode alcançar zonas de atuação da função 21 (distância) da *American National Standards Institute* (ANSI) e levar a uma atuação indevida. Nestes casos, funções adicionais de proteção destinadas ao bloqueio e disparo por oscilação de potência são necessárias.

O bloqueio da função 21 devido a oscilação de potência estável é definido pela função ANSI 68 – *Power Swing Blocking* (PSB). A função ANSI 78, *Out-of-step tripping* (OST), destina-se ao *trip* durante oscilações instáveis (IEEE PSRC WG D6, 2005). Pelo bloqueio, garante-se a segurança da rede e a seletividade do sistema de proteção durante oscilações estáveis. O disparo garante a separação do sistema de forma rápida e segura, quando da perda de sincronismo (ALVES et al., 2018).

Oscilações de potência estáveis caracterizam-se pela condição operativa aceitável em que os sistemas de controle dos geradores encontram um novo estado de equilíbrio. A oscilação instável, por sua vez, é a condição operativa não-aceitável em que há perda de sincronismo entre um ou mais geradores, e ações corretivas devem ser tomadas (IEEE PSRC WG D6, 2005).

A atuação indevida de relés de distância durante perturbações sistêmicas severas pode comprometer aspectos de seletividade e coordenação dos sistemas de proteção. Tendo em vista a propagação das perturbações, este fenômeno pode originar blecautes. Destaca-se neste contexto, grandes ocorrências sistêmicas no Brasil e no exterior (NERC, 2013), em que ocorreram desligamentos sequenciais, registrando-se elevada rejeição de carga.

Em 10 de janeiro de 2009, às 22h 13min iniciou-se um blecaute que culminou na interrupção de 24,436 GW no Brasil, representando cerca de 40% das cargas do Sistema Interligado Nacional (SIN). No tronco constituído de três circuitos de 765 kV que interliga as subestações Itaberá e Ivaiporã, ocorreram três curtos-circuitos monofásicos praticamente simultâneos, próximo à SE Itaberá, envolvendo fases distintas dos circuitos C1 e C2, e na barra A da SE Itaberá, conforme apresentado Figura 1.1 (ONS, 2009).

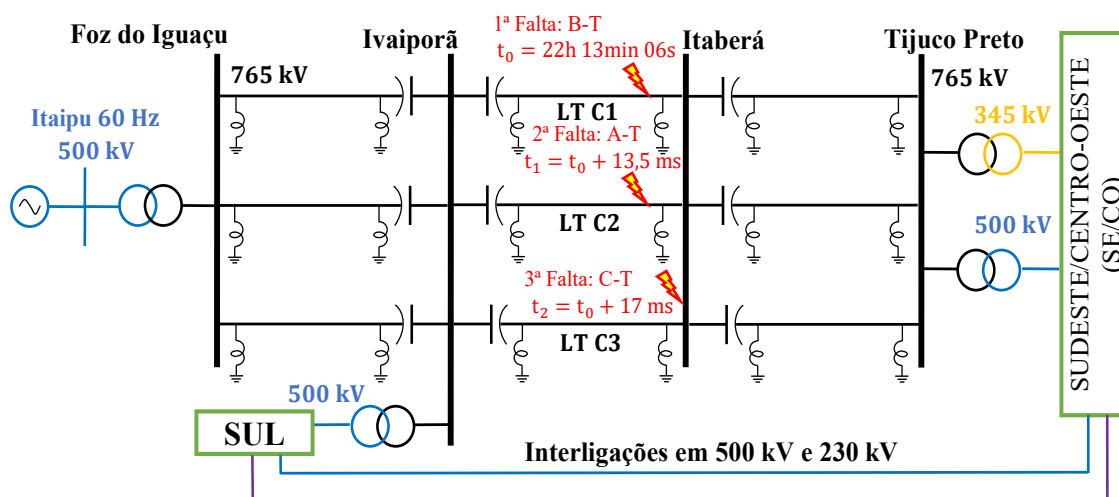


Figura 1.1- Tronco de 765 kV de interligação entre os subsistemas Sul e Sudeste/Centro-Oeste (adaptado de ONS 2009).

A eliminação das faltas nos circuitos C1, C2 e na barra A da SE Itaberá ocorreu após os tempos de 48 ms, 62,3 ms e 58,9 ms, respectivamente, promovendo a abertura total do tronco de 765 kV entre Itaberá-Ivaiporã. Após 251 ms da primeira falta são desligadas as unidades geradoras (UGs) 10, 12, 14 e 18 na UHE Itaipu - 60 Hz por atuação de lógicas do Esquema de Controle de Emergência (ECE). Depois de 225 ms deste último evento tem-se o desligamento da UG 18A, rejeitando o total 3,1 GW de geração (ONS,2009).

A abertura do tronco de 765 kV promoveu uma sobrecarga nas linhas de interligações entre as regiões Sul e Sudeste, levando à atuação, mesmo sem curtos-circuitos, da proteção de distância 21 das linhas 500 kV Bateias – Ibiúna C1 e C2, e de outras linhas de interligação no 230 kV e 138 kV, em tempos menores que 1 s. Posteriormente, verificou-se a elevação da frequência no subsistema Sul a 63,5 Hz e redução da frequência no subsistema Sudeste a 58,3 Hz (ONS, 2009).

Após estes desligamentos, a única interligação entre Sul e Sudeste compreendeu a LT 525 kV Londrina - Assis – Araraquara. Submetida a uma oscilação de potência com formação de centro elétrico, durante 20 s manteve o sistema fisicamente interligado, mas fora de sincronismo. Tal situação ocorreu porque apenas o bloqueio por oscilação (68) estava habilitado. Além disso, a oscilação teve velocidade compatível com o ajuste, permitindo assim sucessivos bloqueios e desbloqueios. Desta forma, constatou-se que a referida linha contribuiu significativamente para propagação da perturbação, dado que o sistema de 440 kV da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) foi desligado sob oscilação de potência (ANEEL, 2010).

Destaca-se ainda que, nas diversas linhas de 440 kV que foram desligadas por atuação da função de distância 21 durante oscilação de potência, conforme registros oscilográficos, não havia ou não estava habilitada a função de desligamento por perda de sincronismo (ANEEL, 2010).

Além do blecaute de 2009 no Brasil, grandes ocorrências sistêmicas no exterior experimentaram uma propagação da perturbação devido à atuação indevida de relés de proteção durante as oscilações de potência observadas. Cita-se como exemplo o blecaute ocorrido no Nordeste dos Estados Unidos e Sudeste do Canadá em 2003, que proporcionou a remoção de 50 GW de potência, afetando mais de 50 milhões de usuários (IEEE PSRC WG D6, 2005). Segundo (NERC, 2013), relés de proteção atuaram indevidamente em zonas 2 e 3, por não distinguir entre oscilações de potências estáveis e curtos-circuitos.

Neste contexto, percebe-se que as funções de bloqueio e disparo por oscilação de potência são relevantes para o sistema elétrico, cuja atuação correta pode reduzir a propagação dos efeitos colaterais de distúrbios sistêmicos. Assim, a compreensão do

fenômeno e dos modelos que podem representá-lo são fundamentais para avaliação dos algoritmos de relés de proteção e até interpretação de oscilografias.

1.2 Motivação

O submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (ONS) prevê que o sistema de proteção de linhas de transmissão deve possuir funções e lógicas de bloqueio (68 OSB) e disparo por oscilação de potência (78 OST).

O submódulo 11.7, por sua vez, define que os ajustes das proteções de caráter sistêmico são de responsabilidade do ONS, em conjunto com os agentes de operação (ONS, 2020). A partir dos estudos de expansão da transmissão, os testes de validação de relés de proteção são exigidos aos Agentes de Operação para aquelas linhas onde as funções 68 e 78 estejam habilitadas. É neste contexto que está inserido este trabalho.

Para validação dos ajustes e do funcionamento das funções 68 e 78, embarcadas ou não em *hardwares*, simulações de oscilações de potência são necessárias, exigindo-se, a princípio, o pleno conhecimento da caracterização do fenômeno. De forma a possibilitar a realização dos testes dessas funções de proteção, faz-se necessários sinais de tensão e corrente que representem as oscilações de potência, o que geralmente exige extenso trabalho modelagem do sistema elétrico em estudo.

Percebe-se ainda que, a geração de oscilações de potências a partir da ocorrência de faltas possibilita ao usuário um difícil controle do fenômeno, dado que a trajetória da impedância e sua velocidade dependem da dinâmica do sistema elétrico, tendo em vista parâmetros dos geradores síncronos e reguladores de velocidade, local de incidência da falta, entre outros. Assim, é comum a realização de várias simulações até que se obtenha a oscilação de potência desejada, o que pode demandar ajuste de reguladores, duração do tempo de falta, remoção de cargas, entre outros artificios.

A real dificuldade que existe para geração de oscilações de potência motivou neste trabalho a elaboração de modelos simples e práticos para geração de sinais de oscilações de potência, os quais possibilitem a parametrização da trajetória da impedância, frequência de deslizamento, velocidade, entre outros fatores pertinentes ao fenômeno. Os

sinais gerados podem ser aplicados a relés físicos, ou apenas em algoritmos virtuais, sendo esse último realizado neste trabalho.

Considerando-se ainda que nem todos os algoritmos de relés de proteção são disponibilizados para os usuários, identificou-se como essencial a implementação computacional de pelo menos dois algoritmos distintos das funções 68 e 78. Assim, é possível avaliar o funcionamento esperado sob simulações de diversas condições sistêmicas, integralmente em ambiente computacional.

1.3 Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo caracterizar e modelar oscilações de potência em linhas de transmissão. Para tanto, a obtenção de soluções numéricas será condição para a formulação dos sistemas teste. Como objetivos específicos, almeja-se neste trabalho:

- Caracterizar o fenômeno oscilação de potência por meio da análise das grandezas instantâneas e fasoriais envolvidas;
- Fornecer as soluções numéricas de dois modelos (sistemas teste) que possibilitem a geração dos sinais de tensão e corrente, e a parametrização do fenômeno oscilação de potência;
- Implementar computacionalmente dois algoritmos referentes às funções 68-78;
- Avaliar em ambiente computacional a atuação das funções 68-78 implementadas referente às ações de bloqueio ou disparo por oscilação de potência, e desbloqueio para faltas durante oscilações;

1.4 Metodologia

A caracterização das oscilações de potência inicia-se pela identificação das causas do fenômeno utilizando-se um sistema equivalente clássico de duas máquinas, considerando um escorregamento na frequência em uma das fontes. Para obtenção dos sinais instantâneos de corrente e tensão neste sistema é realizada a implementação

numérica no domínio do tempo discreto utilizando-se o *software* MATLAB®. Para o caso particular de tensões com mesmo módulo nas barras dos equivalentes é definida ainda a solução analítica do problema. Assim, é realizada a comparação dos sinais instantâneos obtidos com aqueles simulados pelo *software* ATP.

Dado que a maioria dos relés de proteção realizam cálculos a partir de fasores, neste trabalho é utilizada a técnica de estimação fasorial utilizando-se o algoritmo “Fourier de um ciclo não recursivo”. Utilizando-se formulações encontradas na literatura obtém-se no MATLAB® os fasores corrente e tensão, e valores de potência ativa, potência reativa, impedância, e velocidade de impedância. A validação destas grandezas fasoriais é feita no ATP por meio da plataforma MODELS.

A parametrização de oscilações de potência e posterior geração dos respectivos sinais instantâneos é feita por meio de dois modelos de sistema, descritos e equacionados neste trabalho. Considerando-se que são necessários sinais trifásicos para realização de testes das funções 68-78, é obtida a solução numérica para um circuito RL trifásico acoplado, cuja demonstração é apresentada. Obtém-se, com estas formulações, os sinais instantâneos de tensão e corrente referentes a oscilações estáveis, instáveis, com trajetórias editáveis, inclusive com ocorrência de faltas, sendo exportados em arquivo com extensão “.mat”.

A leitura dos sinais instantâneos gerados contidos neste arquivo é feita por dois algoritmos das funções 68 e 78, implementados no MATLAB®, sendo eles o “Método das Características Concêntricas (MCC)” e o “Método da Variação da Tensão do Centro Elétrico (MVTCE)”. O principal produto destes algoritmos é a avaliação das oscilações, apresentando instante de bloqueio e desbloqueio nos diversos casos simulados.

Por fim, 110 casos são simulados, contemplando oscilações estáveis, instáveis, com ocorrência de faltas simétricas, assimétricas, variando-se resistência de falta, tipo, local de aplicação, frequência de escorregamento no instante da falta, entre outros, com o intuito de se avaliar o comportamento das funções implementadas.

1.5 Produção Bibliográfica

Este trabalho gerou dois artigos, os quais foram apresentados e publicados em anais de evento nacional, conforme descrito a seguir:

ANDRADE, J. S.; PEREIRA, C. S. ; DE CONTI, A. R. . **Formulações analíticas e numéricas para caracterização do fenômeno oscilação de potência em linhas de transmissão.** In: SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2020, Santo André. Anais do SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2020. v. 1. p. 1-7.

ANDRADE, J. S.; PEREIRA, C. S. ; DE CONTI, A. R. . **Modelos para geração de sinais de oscilação de potência em linhas de transmissão para testes em relés de distância.** In: SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2020, Santo André. Anais do SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2020. v. 1. p. 1-6.

1.6 Organização do texto

Esta dissertação de mestrado está organizada em seis capítulos, no qual o presente capítulo contempla a introdução do assunto, relevância, motivação, objetivos, metodologia e produção bibliográfica.

No *Capítulo 2*, realiza-se a caracterização das oscilações de potência, constituindo-se da obtenção e análise das grandezas instantâneas e fasoriais envolvidas. As trajetórias da impedância em função de módulo e ângulo das tensões são obtidas juntamente com a velocidade da impedância, possibilitando interpretação visual do fenômeno no plano RX e seu impacto na função 21.

No *Capítulo 3*, faz-se o equacionamento de dois modelos (sistemas teste) destinados à geração de sinais de oscilação de potência parametrizáveis. As soluções numéricas empregadas são detalhadas, a fim de possibilitar a reprodução dos modelos. A formulação matricial para o cálculo de faltas no domínio do tempo, durante oscilações de potência, é apresentada.

O *Capítulo 4* contempla a implementação computacional dos dois métodos para bloqueio e disparo por oscilação de potência. Para cada algoritmo implementado é

apresentado o respectivo fluxograma, explicitando-se suas funcionalidades e variáveis necessárias.

No **Capítulo 5** encontram-se os resultados e discussões das simulações realizadas com os modelos e algoritmos implementados. As simulações contemplam oscilações estáveis, oscilações instáveis e com ocorrência de curtos-circuitos, avaliando-se a trajetória da impedância no plano RX em cada caso, e as atuações de bloqueio ou *trip*.

As principais conclusões e propostas de continuidade são apresentadas no **Capítulo 6**.

As referências bibliográficas citadas ao longo do texto se encontram listadas ao final.

2 Caracterização do fenômeno oscilação de potência

2.1 Sistema equivalente de duas máquinas

O sistema equivalente para o estudo de oscilações de potência empregado neste trabalho é apresentado na Figura 2.1, semelhante ao descrito por (KUNDUR, 1994). Ele corresponde a um modelo simplificado de dois equivalentes de Thévenin vistos das barras 1 e 2, separados por uma linha de transmissão. O sistema 2 apresenta velocidade síncrona de referência (ω_2), e o sistema 1 apresenta velocidade angular diferente (ω_1), podendo caracterizar sobrefrequência ou subfrequência, de forma similar à abordagem de (MAHAMED, B; FLETCHER, J.E.; 2020). As tensões de fase dos sistemas, considerando-se a fase “A”, são dadas por:

$$E_1(t) = E_{1m\acute{a}x} \cos(\omega_1 t + \beta_1) \quad (2.1)$$

$$E_2(t) = E_{2m\acute{a}x} \cos(\omega_2 t + \beta_2) \quad (2.2)$$

Onde:

$E_1(t)$ e $E_2(t)$ são as tensões de fase das fontes E_1 e E_2 , respectivamente;

$E_{1m\acute{a}x}$ e $E_{2m\acute{a}x}$ são as tensões de pico das fontes E_1 e E_2 , respectivamente;

β_1 e β_2 são os ângulos iniciais de fase das fontes E_1 e E_2 , respectivamente;

O modelo da Figura 2.1 simula a linha e os sistemas equivalentes utilizando parâmetros concentrados. Considera-se, portanto, que a linha é eletricamente curta, de forma que o efeito de propagação pode ser desprezado. A condição inicial de fluxo de

potência é dada pelos ângulos das tensões, representados por β_1 e β_2 , referentes aos sistemas 1 e 2 respectivamente. Visando à análise nodal de tensões e correntes, todas as tensões nodais são apresentadas na Figura 2.1, sendo elas: $E_1(t)$, $E_s(t)$, $V_1(t)$, $E_{12}(t)$, $V_2(t)$, $E_r(t)$ e $E_2(t)$.

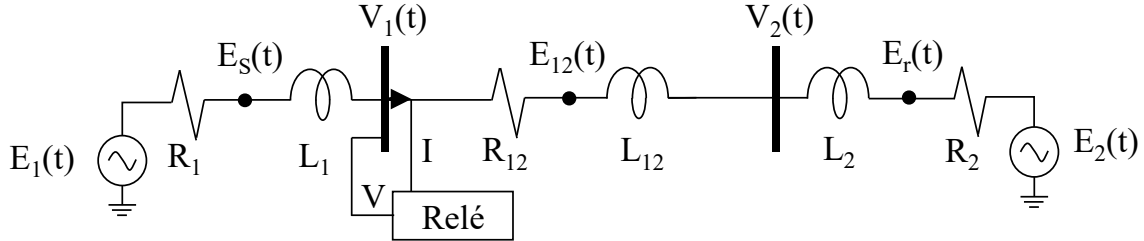


Figura 2.1- Modelo utilizado para caracterização de oscilações de potência.

2.2 Solução analítica

Considerando que a oscilação de potência é um fenômeno equilibrado por natureza, a forma da resposta para todas as fases é semelhante, porém com defasamento angular de 120° . Assim, os cálculos subsequentes são realizados apenas para a fase A. Como as fontes possuem frequências distintas, uma solução possível para o circuito elétrico da Figura 2.1 é dada pelo teorema da superposição, considerando-se a contribuição da fonte E_1 , $i_{E1}(t)$, e a contribuição da fonte E_2 , $i_{E2}(t)$. Assim, a corrente da fase A, $i_A(t)$, na linha de transmissão, pode ser calculada como:

$$i_A(t) = i_{E1}(t) - i_{E2}(t) \quad (2.3)$$

$$i_{E1}(t) = \frac{E_{1máx}}{|\dot{Z}_{T1}|} \left[\cos(\omega_1 t + \beta_1 - \theta_{T1}) - \cos(\beta_1 - \theta_{T1}) e^{-\frac{R_T}{L_T} t} \right] \quad (2.4)$$

$$i_{E2}(t) = \frac{E_{2máx}}{|\dot{Z}_{T2}|} \left[\cos(\omega_2 t + \beta_2 - \theta_{T2}) - \cos(\beta_2 - \theta_{T2}) e^{-\frac{R_T}{L_T} t} \right] \quad (2.5)$$

$$|\dot{Z}_{T1}| = \sqrt{(R_T)^2 + (X_{T1})^2} \quad (2.6)$$

$$|\dot{Z}_{T2}| = \sqrt{(R_T)^2 + (X_{T2})^2} \quad (2.7)$$

$$X_{T1} = \omega_1 L_T = \omega_1 (L_1 + L_{12} + L_2) \quad (2.8)$$

$$X_{T2} = \omega_2 L_T = \omega_2 (L_1 + L_{12} + L_2) \quad (2.9)$$

$$R_T = R_1 + R_{12} + R_2 \quad (2.10)$$

$$\theta_{T1} = \tan^{-1} \frac{X_{T1}}{R_T} \quad (2.11)$$

$$\theta_{T2} = \tan^{-1} \frac{X_{T2}}{R_T} \quad (2.12)$$

Onde:

\dot{Z}_{T1} e \dot{Z}_{T2} são as impedâncias totais vistas pelas fontes E_1 e E_2 , respectivamente;

θ_{T1} e θ_{T2} são os ângulos das impedâncias \dot{Z}_{T1} e \dot{Z}_{T2} , respectivamente

R_T é a resistência total e L_T é a indutância total do circuito;

R_1 , R_{12} e R_2 são as resistências do equivalente 1, da linha de transmissão e do equivalente 2, respectivamente;

L_1 , L_{12} e L_2 são as indutâncias do equivalente 1, da linha de transmissão e do equivalente 2, respectivamente;

X_{T1} e X_{T2} são as reatâncias indutivas totais vistas pelas fontes E_1 e E_2 , respectivamente;

Conseqüentemente, a tensão de fase na barra 1, $V_1(t)$, pode ser obtida por:

$$V_1(t) = E_1(t) - R_1 i_A(t) - L_1 \frac{di_A(t)}{dt} \quad (2.13)$$

Em regime permanente, a expressão da corrente $i_A(t)$ pode ser simplificada para:

$$i_A(t) = i_1(t) - i_2(t) \quad (2.14)$$

$$i_1(t) = I_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1 - \theta_{T1}) \quad (2.15)$$

$$i_2(t) = I_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2 - \theta_{T2}) \quad (2.16)$$

$$I_1 = \frac{E_{1m\acute{a}x}}{|\dot{Z}_{T1}|} \quad (2.17)$$

$$I_2 = \frac{E_{2m\acute{a}x}}{|\dot{Z}_{T2}|} \quad (2.18)$$

Onde:

$i_1(t)$ e $i_2(t)$ são as contribuições de corrente das fontes E_1 e E_2 , respectivamente, considerando o circuito em regime permanente;

I_1 e I_2 são os valores de pico das correntes de regime permanente $i_1(t)$ e $i_2(t)$, respectivamente;

Considerando o caso particular em que, $I_1 = I_2$ e utilizando-se as variáveis x , y , a e b , apenas para desenvolvimento de equações trigonométricas, tem-se que a corrente $i_A(t)$ pode ser reescrita da forma:

$$i_A(t) = I_1[\cos(x) - \cos(y)] \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} x = \omega_1 t + \beta_1 - \theta_{T1} = a + b \\ y = \omega_2 t + \beta_2 - \theta_{T2} = a - b \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} y = \omega_2 t + \beta_2 - \theta_{T2} = a - b \end{cases} \quad (2.21)$$

Utilizando-se as formulações trigonométricas tem-se que:

$$\begin{cases} \cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b) \\ \cos(a - b) = \cos(a) \cos(b) + \sin(a) \sin(b) \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\cos(a - b) = \cos(a) \cos(b) + \sin(a) \sin(b) \quad (2.23)$$

$$\cos(a + b) - \cos(a - b) = -2 \sin(a) \sin(b) \quad (2.24)$$

$$\cos(x) - \cos(y) = -2 \sin(a) \sin(b) \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} a = \frac{x + y}{2} \\ b = \frac{x - y}{2} \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} b = \frac{x - y}{2} \end{cases} \quad (2.27)$$

Substituindo-se (2.26) e (2.27) em (2.25), tem-se que:

$$\cos(x) - \cos(y) = -2 \sin\left(\frac{x + y}{2}\right) \sin\left(\frac{x - y}{2}\right) \quad (2.28)$$

Substituindo-se (2.20) e (2.21) em (2.28), e (2.28) em (2.19), tem-se a expressão analítica da corrente durante oscilação de potência, dada por:

$$i_A(t) = -2I_1 \sin(\alpha) \sin(\gamma) \quad (2.29)$$

$$\alpha = \frac{2\pi(f_1 + f_2)t}{2} + \frac{\beta_1 + \beta_2 - \theta_{T1} - \theta_{T2}}{2} \quad (2.30)$$

$$\gamma = \frac{2\pi(f_1 - f_2)t}{2} + \frac{\beta_1 - \beta_2 - \theta_{T1} + \theta_{T2}}{2} \quad (2.31)$$

$$f_{slip} = f_1 - f_2 \quad (2.32)$$

Onde:

f_{slip} é a frequência de escorregamento do sistema;

f_1 e f_2 são as frequências das fontes E_1 e E_2 , respectivamente;

Em (2.29) verifica-se uma modulação em amplitude, no qual o sinal fundamental gerado está contido em um envelope formado por outro sinal, cuja frequência é dada por f_{slip} . Portanto, é possível demonstrar que todas as grandezas elétricas instantâneas do circuito, quando da ocorrência do fenômeno, oscilam na frequência de escorregamento (f_{slip}), justificando-se as flutuações de tensão e corrente.

2.3 Solução no domínio do tempo discreto

A solução analítica apresentada no item anterior leva em consideração a ausência de não-linearidades e que, cessada a componente exponencial, o circuito operará por um tempo relativamente longo. Contudo, para simulações com variação da frequência em um curto intervalo de tempo ou até mesmo com ocorrência de faltas, o método fasorial analítico pode não ser adequado, sendo necessário um método numérico. Este último possibilita simular a variação da frequência da fonte e a ocorrência de faltas, mantendo-se a continuidade do sinal de corrente no indutor durante transitórios.

Neste trabalho, a solução numérica aplicada consiste no método nodal matricial que utiliza a integração trapezoidal para obtenção do modelo de indutor no domínio do tempo discreto, constituído de uma fonte de corrente histórica em paralelo com um resistor, conforme proposto por (DOMMEL, 1969). O circuito equivalente neste domínio é apresentado na Figura 2.2. A obtenção de R_{L1} , R_{L12} e R_{L2} , dado um passo de tempo Δt é feita por meio de (2.33), (2.34) e (2.35). Assim, tem-se que:

$$R_{L1} = \frac{2L_1}{\Delta t} \quad (2.33)$$

$$R_{L12} = \frac{2L_{12}}{\Delta t} \quad (2.34)$$

$$R_{L2} = \frac{2L_2}{\Delta t} \quad (2.35)$$

Onde

R_{L1} , R_{L12} e R_{L2} são os resistores que constituem o modelo dos indutores L_1 , L_{12} e L_2 , respectivamente, no domínio do tempo discreto;

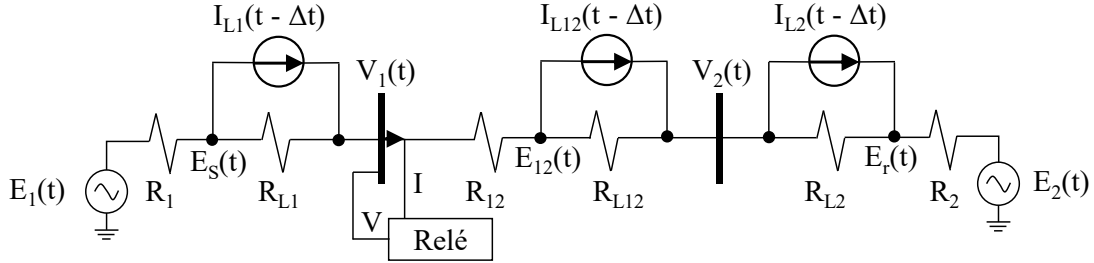


Figura 2.2 – Sistema de duas máquinas modelado no domínio do tempo discreto.

O equacionamento matricial do circuito da Figura 2.2 é apresentado em (2.38). A matriz $[Y]_{5 \times 5}$ consiste em admitâncias nodais, neste caso, condutâncias. Os elementos da diagonal principal correspondem às condutâncias conectadas a cada um dos nós, enquanto os demais termos correspondem ao negativo das condutâncias entre nós.

$$[V] = [Y]^{-1}[I] \quad (2.36)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} R_1^{-1} + R_{L1}^{-1} & -(R_{L1}^{-1}) & 0 & 0 & 0 \\ -(R_{L1}^{-1}) & R_{L1}^{-1} + R_{L12}^{-1} & -(R_{L12}^{-1}) & 0 & 0 \\ 0 & -(R_{L12}^{-1}) & R_{L12}^{-1} + R_{L2}^{-1} & -(R_{L12}^{-1}) & 0 \\ 0 & 0 & -(R_{L12}^{-1}) & R_{L12}^{-1} + R_{L2}^{-1} & -(R_{L2}^{-1}) \\ 0 & 0 & 0 & -(R_{L2}^{-1}) & R_{L2}^{-1} + R_r^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\begin{bmatrix} E_S(t) \\ V_1(t) \\ E_{12}(t) \\ V_2(t) \\ E_r(t) \end{bmatrix} = [Y]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{E_{1máx}(t)}{R_1} - I_{L1}(t - \Delta t) \\ I_{L1}(t - \Delta t) \\ -I_{L12}(t - \Delta t) \\ I_{L12}(t - \Delta t) - I_{L2}(t - \Delta t) \\ I_{L2}(t - \Delta t) + \frac{E_{2máx}(t)}{R_2} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Onde:

$I_{L1}(t)$, $I_{L12}(t)$ e $I_{L2}(t)$ são as fontes de correntes históricas que constituem o modelo dos indutores L_1 , L_{12} e L_2 , respectivamente, no domínio do tempo discreto;

O algoritmo atualiza os termos históricos $I_{L1}(t)$, $I_{L12}(t)$ e $I_{L2}(t)$ no vetor $[I]$ a cada passo (Δt) da iteração, utilizando para isso as tensões nodais obtidas em (2.38) e

apresentada na Figura 2.2. Em (2.39), (2.40) e (2.41) são apresentadas as expressões utilizadas para a atualização dos termos históricos $I_{L1}(t)$, $I_{L12}(t)$ e $I_{L2}(t)$.

$$I_{L1}(t) = \frac{2[E_S(t) - V_1(t)]}{R_{L1}} + I_{L1}(t - \Delta t) \quad (2.39)$$

$$I_{L12}(t) = \frac{2[E_{12}(t) - V_2(t)]}{R_{L12}} + I_{L12}(t - \Delta t) \quad (2.40)$$

$$I_{L2}(t) = \frac{2[V_2(t) - E_r(t)]}{R_{L2}} + I_{L2}(t - \Delta t) \quad (2.41)$$

De posse das tensões nodais, é possível obter a corrente que circula pelos ramos. Como neste circuito não há elementos *shunts*, a corrente $i_A(t)$, que circula por todos elementos, inclusive pelo ponto onde está o relé, é dada por:

$$i_A(t) = \frac{E_1(t) - E_S(t)}{R_1} \quad (2.42)$$

Implementando-se as soluções numérica e analítica com os parâmetros teóricos $R_1 = R_{12} = R_2 = 1,2 \Omega$, $L_1 = L_{12} = L_2 = 77,9859 \text{ mH}$, $E_{1\text{máx}} = 144,9 \sqrt{(2/3)} \text{ kV}$, $E_{2\text{máx}} = 138 \sqrt{(2/3)} \text{ kV}$, $\beta_1 = \beta_2 = 0$, $f_1 = 61 \text{ Hz}$, $f_2 = 60 \text{ Hz}$ tem-se as respostas de corrente e tensão da Figura 2.3, constatando-se sobreposição de curvas.

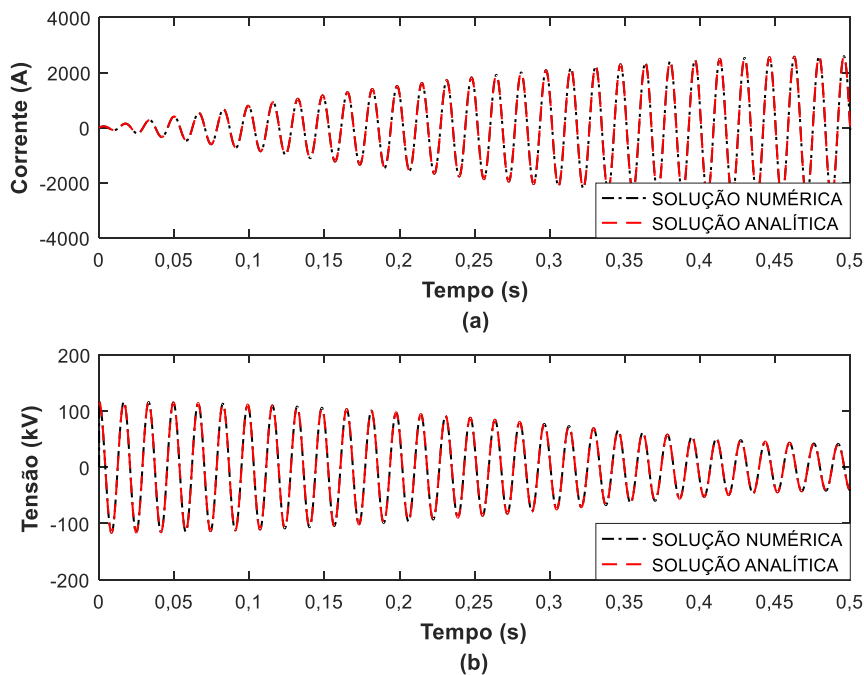


Figura 2.3 – Corrente na fase A (a) e tensão da fase A da barra 1 (b), obtidos no MATLAB®.

2.4 Efeito das oscilações de potência nos relés de distância

2.4.1 Estimação fasorial

As soluções analítica e numérica apresentadas nos itens anteriores possibilitam a obtenção de sinais instantâneos de tensão, corrente e potência. Porém, tipicamente os algoritmos de relés de proteção realizam cálculos com base nos fasores de tensão e corrente, o que é realizado pela técnica de estimação fasorial.

Neste trabalho é implementado no MATLAB® o algoritmo “Fourier de um ciclo não-recursivo”, o que é feito tendo em vista a possibilidade de validação dos resultados com o ATP. Em ambos os programas são empregados algoritmos semelhantes, derivados da Transformada Discreta de Fourier, porém não idênticos. Vale ainda destacar que os algoritmos baseados na Transformada Discreta de Fourier (TDF) tem uso mais frequente nos relés de proteção, dada confiabilidade dos mesmos, conforme descrito por (SILVA, 2014).

A janela de dados do filtro implementado contempla um ciclo com número de amostras (N_a) fixo de 64 pontos, resultando em uma frequência de amostragem de 3,84 kHz. As partes real (X_{ak}) e imaginária (X_{bk}) do fasor estimado, descritas no trabalho de (ROCHA, 2016), são dadas de forma similar por:

$$X_{ak} = \frac{2}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} y_{k-n+1} \text{sen}[(N_a - n) \frac{2\pi}{N_a}] \quad (2.43)$$

$$X_{bk} = \frac{2}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} y_{k-n+1} \text{cos}[(N_a - n) \frac{2\pi}{N_a}] \quad (2.44)$$

Utilizando-se (2.43) e (2.44) obtêm-se os fasores tensão e corrente. Cada fasor estimado refere-se a um respectivo vetor y de amostras do sinal instantâneo que tem tamanho definido em função do passo de tempo (Δt) adotado e tempo total simulado. Para cada amostra k é realizado um *loop* na janela de dados, com n variando da primeira amostra da janela de dados até a última ($n = 64$). Para uma próxima amostra tem-se o deslocamento da janela de dados, estimando-se o fasor neste outro instante, e assim sucessivamente.

2.4.2 Trajetória da impedância no plano RX

Durante oscilações de potência, a trajetória da impedância aparente vista pelo relé de distância é alterada, podendo passar dentro da zona de atuação. A análise das grandezas medidas pelo relé de distância é feita utilizando-se Fasores, considerando-se a frequência fundamental do sistema (ω_2). As impedâncias do equivalente 1 (\dot{Z}_{eq1}), da linha de transmissão (\dot{Z}_{12}) e do equivalente 2 (\dot{Z}_{eq2}), referente ao circuito da Figura 2.1, podem ser escritas como:

$$\dot{Z}_{eq1} = R_1 + j\omega_2 L_1 = R_1 + jX_1 \quad (2.45)$$

$$\dot{Z}_{12} = R_{12} + j\omega_2 L_{12} = R_{12} + jX_{12} \quad (2.46)$$

$$\dot{Z}_{eq2} = R_2 + j\omega_2 L_2 = R_2 + jX_2 \quad (2.47)$$

Onde:

X_1 , X_{12} e X_2 são as reatâncias indutivas do equivalente 1, da linha de transmissão e do equivalente 2, respectivamente;

Definindo δ como o ângulo de defasagem angular da tensão \dot{E}_1 em relação à tensão \dot{E}_2 , e considerando um deslizamento de frequência constante, tem-se que:

$$\delta(t) = (\omega_1 - \omega_2)t \quad (2.48)$$

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega_1 - \omega_2 \quad (2.49)$$

A impedância aparente vista ($\dot{Z}_{RELÉ}$) por um relé de distância localizado na barra 1 da Figura 2.1 é calculada por meio dos fasores tensão da barra 1 (\dot{V}_1) e corrente (\dot{I}_{LT}). Assim, conforme disposto em (FERNANDES et al., 2018), e definindo-se \dot{Z}_T como a impedância total do sistema, tem-se que:

$$\dot{I}_{LT} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\dot{Z}_T} \quad (2.50)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_{eq1} \dot{I}_{LT} \quad (2.51)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_{LT}} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_1 - \dot{E}_2} \dot{Z}_T - \dot{Z}_{eq1} \quad (2.52)$$

Definindo $\dot{\eta}$ como a relação entre os fasores de tensão, e que a fonte E_2 está na referência, obtém-se:

$$\dot{\eta} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{E_1 \angle \delta}{E_2 \angle 0} = \left| \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} \right| \angle \delta \quad (2.53)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = \frac{\dot{\eta}}{\dot{\eta} - 1} \dot{Z}_T - \dot{Z}_{eq1} \quad (2.54)$$

Por meio de (2.54) é possível verificar a trajetória da impedância durante uma oscilação de potência. O resultado no plano RX visto pelo relé é formado por trajetórias circulares na parte superior do eixo de reatâncias, quando $|\dot{\eta}| > 1$, e círculos na parte inferior, quando $|\dot{\eta}| < 1$. Percebe-se que quando $|\dot{\eta}| = 1$, a trajetória da impedância consiste em um círculo de raio infinito, aproximando-se de uma reta que passa pelo centro elétrico do sistema, definido como o ponto no plano RX quando $\delta = 180^\circ$.

A Figura 2.4 apresenta diversas trajetórias de impedâncias obtidas utilizando (2.54), semelhante às contidas no trabalho de (MARTUSCELLO et al., 2009). Os parâmetros utilizados são $\dot{Z}_{eq1} = \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{eq2} = 1,2 + j29,4 \Omega$, referente ao circuito da Figura 2.1.

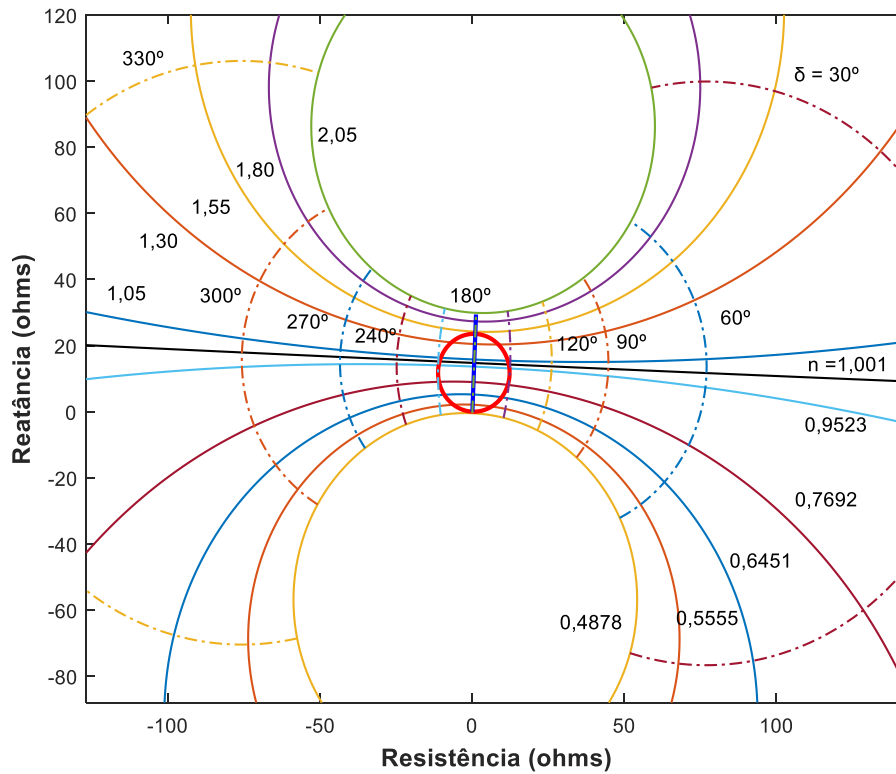


Figura 2.4 - Trajetórias de impedâncias vista pelo relé da barra 1 obtidas no MATLAB®.

Cada trajetória representada por uma linha contínua é obtida mantendo-se fixo $|\eta|$, variando-se δ de 0° a 360° . As curvas apresentadas consideram $|\eta| = 0,4878$ a $|\eta| = 2,05$. Cada trajetória representada por uma linha tracejada é obtida mantendo-se fixo δ e variando-se $|\eta|$ de $0,4875$ a $2,05$. As curvas apresentadas contemplam os ângulos de 30° a 330° .

Como pode ser observado, quando $\delta=180^\circ$ a impedância passa pelo centro elétrico. No centro da Figura 2.4 tem-se um círculo vermelho, o qual representa a zona 1 ajustada no relé de distância tipo mho da barra 1, contemplando 80% de \dot{Z}_{12} , com mesmo ângulo da LT. Utilizando-se (2.52) para o caso particular em que $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = 1$, tem-se que (KUNDUR, 1994):

$$\dot{Z}_{RELÉ} = \frac{1\angle\delta}{1\angle\delta - 1\angle 0} \dot{Z}_T - \dot{Z}_{eq1} \quad (2.55)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = -\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_T \left(\frac{1\angle\delta}{1\angle\delta - 1\angle 0} \right) \frac{(1\angle\delta + 1\angle 0^\circ)}{(1\angle\delta + 1\angle 0^\circ)} \quad (2.56)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = -\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_T \left(\frac{1\angle 2\delta + 1\angle\delta}{1\angle 2\delta - 1} \right) \frac{(1\angle -\delta)}{(1\angle -\delta)} \quad (2.57)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = -\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_T \left(\frac{1\angle\delta + 1}{1\angle\delta - 1\angle -\delta} \right) \quad (2.58)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = -\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_T \frac{1 + \cos(\delta) + j\text{sen}(\delta)}{j 2\text{sen}(\delta)} \quad (2.59)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = -\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_T \left[\frac{1}{2} - j \left(\frac{1 + \cos(\delta)}{2\text{sen}(\delta)} \right) \right] \quad (2.60)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = \left(\frac{\dot{Z}_T}{2} - \dot{Z}_{eq1} \right) - j \left(\frac{\dot{Z}_T}{2} \cot \left(\frac{\delta}{2} \right) \right) \quad (2.61)$$

A interpretação geométrica das partes real e imaginária de (2.61) é detalhada na Figura 2.5. Considerando-se que durante uma oscilação de potência a trajetória da impedância pode alcançar as zonas de atuação do relé, esquemas de bloqueio por oscilação de potência são imprescindíveis para inibição dos sinais de *trip* da função 21 em relés de distância. Conforme já identificado na Figura 2.4, quando os módulos das tensões são iguais a 1 a trajetória consiste de uma reta passando pelo centro elétrico do sistema, que neste caso coincide com o centro da impedância total $\left(\frac{\dot{Z}_T}{2} \right)$.

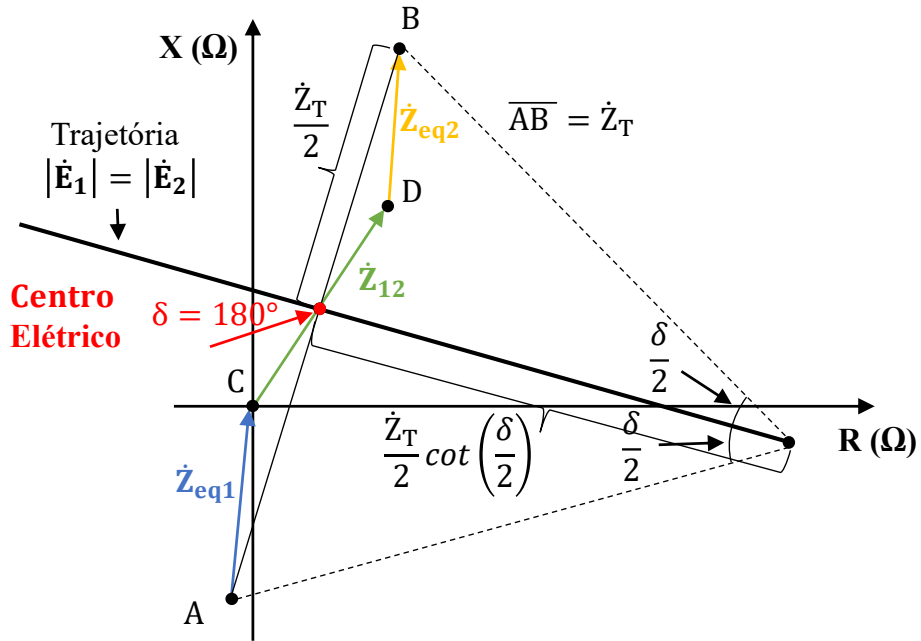


Figura 2.5 - Trajetória da impedância quando $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = 1$ (adaptado de KUNDUR, 1994).

Destaca-se que a exemplificação numérica da Figura 2.4 possibilita avaliar diversas trajetórias, contemplando variação do módulo e ângulo de tensão. Contudo, é importante ressaltar que quando $|\dot{E}_1| \neq |\dot{E}_2|$, o centro elétrico do sistema não mais coincide com o centro da impedância total. Este fato é evidenciado na Figura 2.6.

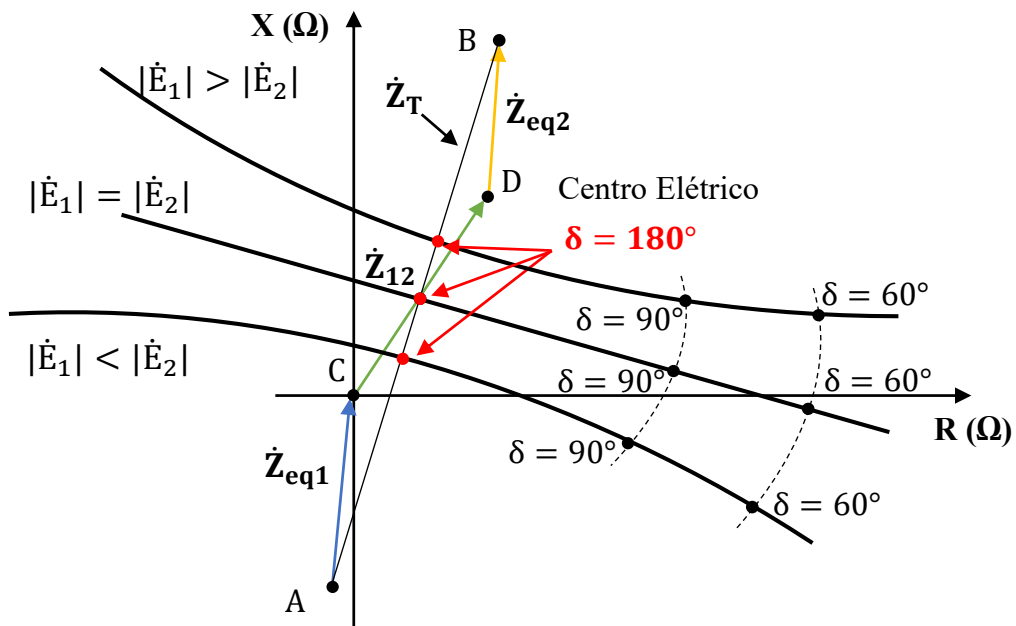


Figura 2.6 - Trajetórias para $|\dot{E}_1| \neq |\dot{E}_2|$ (adaptado de KUNDUR, 1994).

Em (ALVES et al., 2018) é descrito um exemplo de parametrização utilizada pelo ONS, sendo definido tipicamente $\delta = 120^\circ$ o ângulo máximo para que uma oscilação seja considerada estável. A partir deste ângulo o sistema tende à perda de sincronismo, configurando-se no relé este ângulo como o limite para permissão do *trip* por perda de sincronismo.

De forma mais abrangente, em (IEEE PSRC WG D6, 2005), é apresentado que oscilações estáveis são caracterizadas por excursões no plano RX que podem alcançar zonas de atuação, mas retornam a um novo estado de equilíbrio, fora destas zonas. Já oscilações instáveis são aquelas em que a impedância atravessa a característica, passando pelas zonas de atuação, com tendência de giro no plano RX. Este comportamento é ilustrado na Figura 2.7.

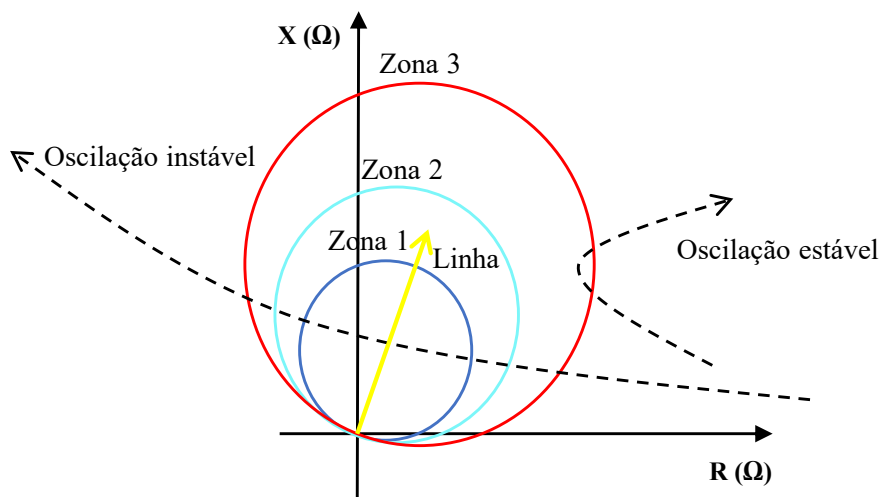


Figura 2.7 – Diferenciação entre oscilação estável e oscilação instável (adaptado de IEEE PSRC WG D6, 2005).

Como pode ser observado na Figura 2.6, a formação do centro elétrico depende essencialmente das impedâncias dos equivalentes e da própria linha, quando do deslize de frequência. Justifica-se assim, o fato de que durante oscilações de potência, apenas linhas específicas são submetidas ao fenômeno, tendo em vista que o centro elétrico é formado sobre estas no plano RX. Esta situação é exemplificada na Figura 2.8.

O exemplo da Figura 2.8 contempla um caso hipotético em que a impedância do equivalente 1 é substancialmente maior que a do equivalente 2, para análise do efeito das oscilações vista pelo relé localizado em um dos terminais da LT D. Neste caso, o centro elétrico do sistema está sobre a LT C, permitindo-se sua detecção em zona 1 nesta LT. Já

nas LTs A e B o fenômeno é detectado em zonas 2 ou 3. O relé em análise identifica o fenômeno apenas em zona reversa, caso eventualmente esteja habilitada.

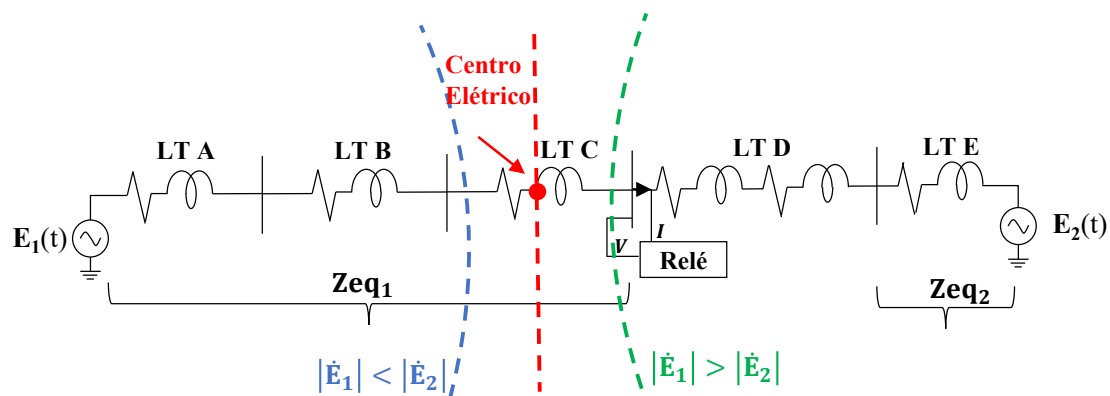


Figura 2.8 - Formação do centro elétrico.

Dessa forma, percebe-se que o efeito das oscilações no plano RX depende fundamentalmente das impedâncias envolvidas, sendo necessária análise específica para cada relé em que serão habilitados ajustes das funções 68-78. A investigação da formação do centro elétrico é fundamental para identificação de quais linhas estarão submetidas às oscilações de potência, sendo geralmente utilizados métodos matriciais no caso de redes complexas para obtenção do equivalente visto a partir dos terminais da linha em análise, conforme descrito em (PSERC, 2017).

Vale destacar que, além de se conhecer o centro elétrico do sistema, faz-se necessário conhecer o comportamento da frequência das fontes durante oscilações, de forma a definir frequências de deslizamento para oscilações estáveis e instáveis. Geralmente essa tarefa demanda estudos de estabilidade eletromecânica, os quais levam em consideração os parâmetros dos geradores síncronos e seus reguladores de velocidade. Cita-se como exemplo o estudo realizado pelo ONS descrito em (ALVES, 2018), em que se utilizou um simulador digital de tempo real (RTDS) para estudos referentes às oscilações de potência no tronco de 230 kV da região Acre/ Rondônia do Brasil.

2.4.3 Cálculo da velocidade da impedância

A velocidade da impedância é uma das principais grandezas que caracterizam o fenômeno, tendo sido utilizada para detecção de oscilações de potência em diversos algoritmos convencionais, desde os relés eletromecânicos até os digitais atualmente.

Quando da ocorrência de um curto-circuito, a impedância aparente vista pelo relé salta quase que instantaneamente para a zona de atuação, o que tipicamente permite que os relés atuem em menos de 50 ms. Já durante uma oscilação de potência, a impedância aparente vista pelo relé faz uma excursão pelo plano RX, cujas trajetórias aproximam-se às da Figura 2.4, com velocidade substancialmente inferior à de um curto-circuito. Derivando-se (2.61) em relação ao tempo e aplicando a regra da cadeia, tem-se que a velocidade da impedância no caso particular $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2|$, é dada por (NERC, 2013):

$$\frac{d\dot{Z}_{RELÉ}}{dt} = -j \frac{\dot{Z}_T}{2} \left[\cos \sec^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \right] \frac{d \left(\frac{\delta}{2} \right)}{dt} \quad (2.62)$$

$$\frac{d\dot{Z}_{RELÉ}}{dt} = j \frac{\dot{Z}_T}{4} \left[\frac{1}{\sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)} \right] \frac{d\delta}{dt} \quad (2.63)$$

A velocidade angular ($\omega_{slip} = 2\pi f_{slip}$) de escorregamento do sistema, descrita em (FISCHER et al., 2012), pode ser obtida por:

$$\omega_{slip} = \frac{d\delta}{dt} \quad (2.64)$$

Assim, a expressão simplificada para a velocidade da impedância é dada por:

$$\left| \frac{d\dot{Z}_{RELÉ}}{dt} \right| = \frac{|\dot{Z}_T|}{4} \left[\frac{2\pi f_{slip}}{\sin^2 \left(\frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} \right)} \right] \quad (2.65)$$

O tempo necessário (Δt) para a impedância percorrer uma dada diferença angular $\Delta\delta$, trajetória tracejada da Figura 2.4, pode ser calculado por (OKOŃ T.; WILKOSZ K, 2011).

$$\Delta t = \frac{\Delta\delta}{2\pi f_{slip}} \quad (2.66)$$

No caso particular em que $f_{slip} = 1 \text{ Hz}$, o tempo necessário para a impedância alcançar o centro elétrico ($\delta = 180^\circ$) é de 0,5 s, momento em que a oscilação de potência está na metade do período de oscilação. Isso mostra o quão lento é o fenômeno oscilação de potência, quando comparado a um curto-circuito.

2.4.4 Cálculo das potências ativa e reativa

A equação analítica para cálculo da potência aparente ($\dot{S}_{RELÉ} = P_{RELÉ} + jQ_{RELÉ}$) vista pelo relé localizado na barra 1 da Figura 2.1 é apresentada em (LIN et al., 2008). A demonstração para obtenção da potência aparente ($\dot{S}_{RELÉ}$), da potência ativa ($P_{RELÉ}$) e da potência reativa ($Q_{RELÉ}$) é descrita a seguir.

$$\dot{S}_{RELÉ} = \dot{V}_1 (\dot{I}_{LT})^* \quad (2.67)$$

$$\dot{S}_{RELÉ} = [\dot{E}_1 - (R_1 + jX_1)\dot{I}_{LT}](\dot{I}_{LT})^* \quad (2.68)$$

$$\dot{S}_{RELÉ} = \dot{E}_1(\dot{I}_{LT})^* - (R_1 + jX_1)|\dot{I}_{LT}|^2 \quad (2.69)$$

Definindo-se $\dot{E}_1 = \beta \dot{E}_2 e^{j\delta}$, $\beta = |\dot{E}_1|/|\dot{E}_2|$, e considerando a fonte E_2 na referência angular zero ($\dot{E}_2 = |\dot{E}_2|$), tem-se que:

$$\dot{S}_{RELÉ} = \beta |\dot{E}_2| e^{j\delta} \left(\frac{\beta |\dot{E}_2| e^{j\delta} - |\dot{E}_2|}{\dot{Z}_T} \right)^* - (R_1 + jX_1)|\dot{I}_{LT}|^2 \quad (2.70)$$

$$\dot{S}_{RELÉ} = \beta |\dot{E}_2|^2 e^{j\delta} \left[\frac{\beta e^{-j\delta}}{(R_T - jX_T)} - \frac{1}{(R_T - jX_T)} \right] - (R_1 + jX_1)|\dot{I}_{LT}|^2 \quad (2.71)$$

Rearranjando os termos e multiplicando a primeira parcela de (2.71) por $(R_T + jX_T)$, tem-se que:

$$\dot{S}_{RELÉ} = \frac{\beta^2 |\dot{E}_2|^2 (R_T + jX_T)}{|\dot{Z}_T|^2} - \frac{\beta |\dot{E}_2|^2 e^{j\delta} (R_T + jX_T)}{|\dot{Z}_T|^2} - \dot{Z}_{eq1} \frac{|\beta |\dot{E}_2| e^{j\delta} - |\dot{E}_2||^2}{|\dot{Z}_T|^2} \quad (2.72)$$

Objetivando simplificações na formulação analítica, as frações de (2.72) são reescritas utilizando-se as variáveis auxiliares \dot{K}_1 , \dot{K}_2 e \dot{K}_3 .

$$\dot{S}_{RELÉ} = \dot{K}_1 - \dot{K}_2 - \dot{K}_3 \quad (2.73)$$

$$\dot{K}_1 = \frac{\beta^2 |\dot{E}_2|^2 R_T}{|\dot{Z}_T|^2} + j \frac{\beta^2 |\dot{E}_2|^2 X_T}{|\dot{Z}_T|^2} \quad (2.74)$$

$$\dot{K}_2 = \frac{\beta |\dot{E}_2|^2 (R_T \cos \delta - X_T \sin \delta)}{|\dot{Z}_T|^2} + j \frac{\beta |\dot{E}_2|^2 (R_T \sin \delta + X_T \cos \delta)}{|\dot{Z}_T|^2} \quad (2.75)$$

$$\dot{K}_3 = \dot{Z}_{eq1} \frac{|\beta \dot{E}_2| \cos \delta - |\dot{E}_2| + j\beta |\dot{E}_2| \operatorname{sen} \delta|^2}{|\dot{Z}_T|^2} = \dot{Z}_{eq1} \frac{|\dot{E}_2|^2 (\beta^2 - 2\beta \cos \delta + 1)}{|\dot{Z}_T|^2} \quad (2.76)$$

As expressões para $P_{RELÉ}$ e $Q_{RELÉ}$ são obtidas extraindo-se as partes real e imaginária, respectivamente, de $\dot{S}_{RELÉ}$. Logo, tem-se que:

$$P_{RELÉ} = \frac{|\dot{E}_2|^2}{|\dot{Z}_T|^2} [\beta X_T \operatorname{sen} \delta + \beta (2R_1 - R_T) \cos \delta + \beta^2 (R_T - R_1) - R_1] \quad (2.77)$$

$$Q_{RELÉ} = \frac{|\dot{E}_2|^2}{|\dot{Z}_T|^2} [\beta (2X_1 - X_T) \cos \delta - \beta R_T \operatorname{sen} \delta + \beta^2 (X_T - X_1) - X_1] \quad (2.78)$$

Como pode ser observado em (2.77) e (2.78), durante a ocorrência do fenômeno, as potências $P_{RELÉ}$ e $Q_{RELÉ}$ não permanecem constantes, tendo comportamento formado por senos e cossenos, dado que δ passa a variar ao longo do tempo. No caso particular em que as resistências são desprezadas e $\delta = (\omega_1 - \omega_2)t$, a potência ativa varia senoidalmente, invertendo-se o sentido do fluxo de potência na metade do período da função, justificando-se na essência o nome do fenômeno, oscilação de potência.

Algoritmos recentes implementados em ambiente computacional ainda não embarcados em *hardwares*, utilizam as derivadas de $P_{RELÉ}$ e $Q_{RELÉ}$ para detecção de oscilação de potência, conforme descrito em (LIN et al., 2008) e (MENCO, 2018). Derivando-se $P_{RELÉ}$ e $Q_{RELÉ}$ em relação ao tempo, tem-se que:

$$\frac{dP_{RELÉ}}{dt} = \frac{\beta |\dot{E}_2|^2}{|\dot{Z}_T|^2} [X_T \cos \delta - (R_1 - R_{12} - R_2) \operatorname{sen} \delta] \frac{d\delta}{dt} \quad (2.79)$$

$$\frac{dQ_{RELÉ}}{dt} = \frac{\beta |\dot{E}_2|^2}{|\dot{Z}_T|^2} [(X_1 - X_{12} - X_2) \operatorname{sen} \delta + R_T \cos \delta] \frac{d\delta}{dt} \quad (2.80)$$

Considerando-se nula a parte resistiva de (2.79) e (2.80), é possível a obtenção de uma proporcionalidade direta entre as derivadas das potências e a velocidade angular de escorregamento $\left(\frac{d\delta}{dt}\right)$. Assim, a derivada da potência ativa é diretamente proporcional ao cosseno de δ e a potência reativa diretamente proporcional ao seno de δ . Esta constatação é relevante e possibilita o desenvolvimento de algoritmos para detecção de oscilações de potência.

2.5 Resultados da caracterização do fenômeno

2.5.1 Metodologia de testes

Para análise das grandezas elétricas equacionadas no Capítulo 2 foi realizada implementação no *software* MATLAB® e modelagem do circuito da Figura 2.1 no ATP. A rotina computacional desenvolvida consiste na solução matricial numérica para obtenção dos sinais instantâneos de corrente, tensão e potência. Na sequência, é realizada estimação fasorial pelo filtro de Fourier e aplicação de um filtro passa-baixas *Butterworth* de 2ª ordem, com frequência de corte de 90 Hz. Obtêm-se então os fasores de corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, impedância e velocidade da impedância.

As grandezas elétricas instantâneas corrente, tensão e potência podem ser obtidas de forma direta no ATP. Já o cálculo de fasores requer a utilização de blocos específicos, disponíveis na plataforma “MODELS”, descritos no trabalho de (STADHEIM, 2012). Na Figura 2.9 é apresentado o sistema elétrico utilizado para caracterização do fenômeno simulado no ATP, sendo adotado passo de tempo $\Delta t = \frac{1}{3840} = 0,00026042 \text{ s}$ e parâmetros idênticos àqueles já descritos no item 2.2.

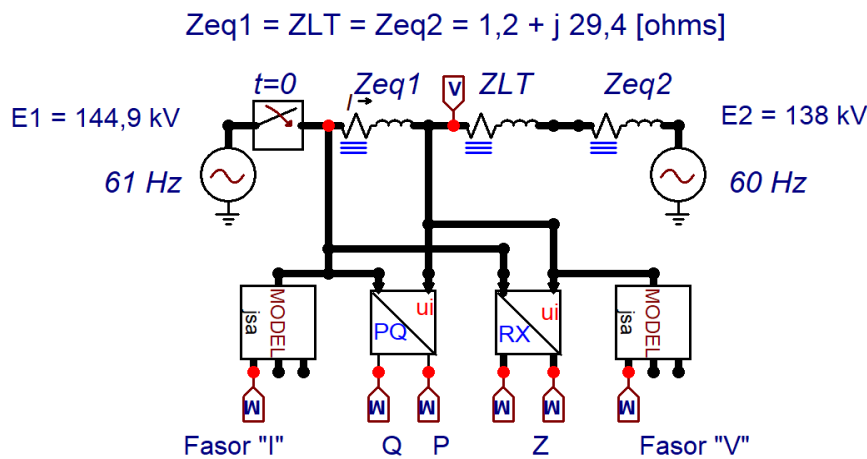


Figura 2.9 - Sistema equivalente de duas máquinas modelado no ATP.

Os blocos para o cálculo dos fasores corrente e tensão são do tipo “MODEL ABC2PHR”. Como as variáveis de saída são as partes real e imaginária das grandezas, fez-se necessária a modificação do bloco para obtenção do módulo do fasor, gerando um novo bloco intitulado “jsa”, obtendo então o valor máximo do fasor.

Os valores de potência ativa e reativa trifásica são obtidos utilizando-se o bloco “MODEL UI2PQ3”. Já o plano RX visto pelo relé de proteção é do tipo “MODEL UI2RX”, e contempla a impedância de sequência positiva, calculada pela simples divisão entre tensão e corrente, tendo em vista que não há corrente de sequência zero durante uma oscilação de potência.

Em todos os blocos utilizados é adotado o algoritmo “8-point RADIX-2”, opção “0” na entrada de dados no ATP, com fator de escala 1 e frequência de amostragem 3,84 kHz. Para fins de simplificação e considerando que a oscilação de potência é um fenômeno equilibrado, utilizou-se o bloco “RLC3” no ATP para representação das impedâncias, tendo entrada de dados apenas de parâmetros de sequência positiva do ramo RL em cada fase.

2.5.2 Sinais instantâneos de corrente, tensão e potência

Na Figura 2.10 são apresentados os sinais instantâneos de tensão, corrente e potência calculados no MATLAB® e no ATP.

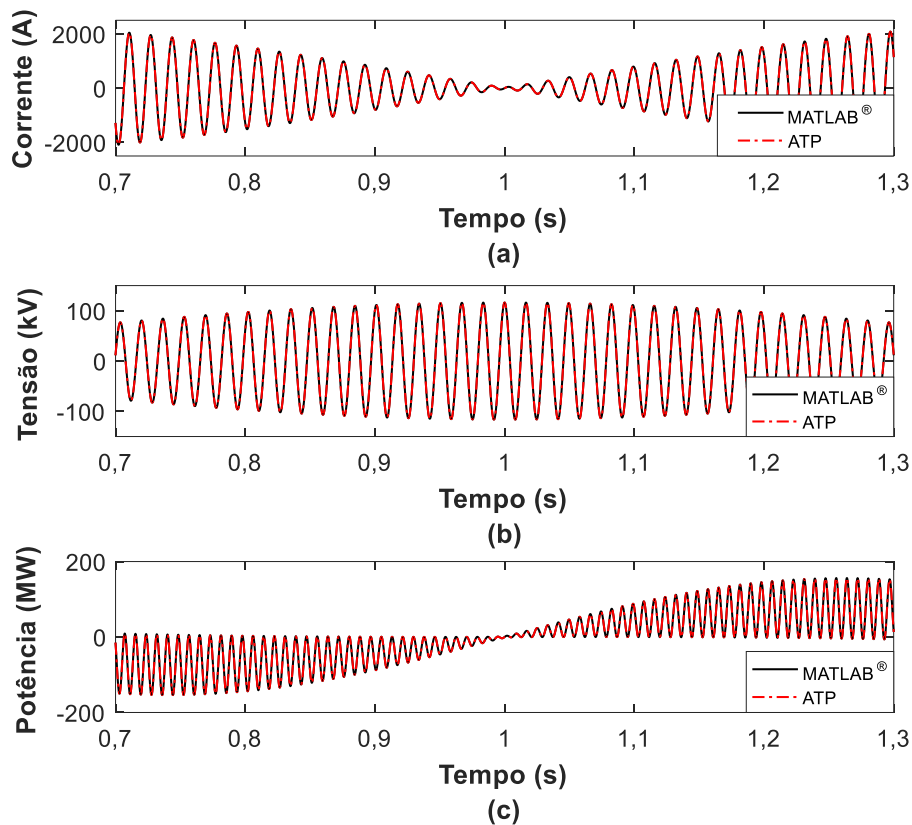


Figura 2.10 – Sinais instantâneos de corrente (a), tensão (b) e potência monofásica (c) obtidos no ATP e MATLAB®.

Percebe-se que as diferenças entre os resultados obtidos em ambas as plataformas são desprezíveis. É importante destacar que os sinais apresentam envoltória com frequência de 1 Hz, haja vista a diferença de frequência simulada entre as fontes. Em $t = 1$ s, tem-se a finalização de um período de oscilação, iniciando-se o próximo ciclo, caracterizando um valor elevado de impedância vista pelo relé.

2.5.3 Fasores corrente, tensão e potência ativa

Na Figura 2.11 são apresentados os módulos dos fasores corrente, tensão e potência monofásica obtidos no MATLAB®, bem como a respectiva solução numérica. Como pode ser observado, os valores lidos pelo relé são pulsantes ao longo do tempo. Em $t = 0,5$ s, percebe-se a pior situação para a proteção de distância, pois tem-se corrente máxima e tensão mínima, o que gera baixo valor de impedância, fazendo com que a impedância vista pelo relé esteja sobre a linha de transmissão no plano RX, semelhante ao que ocorre em uma falta trifásica.

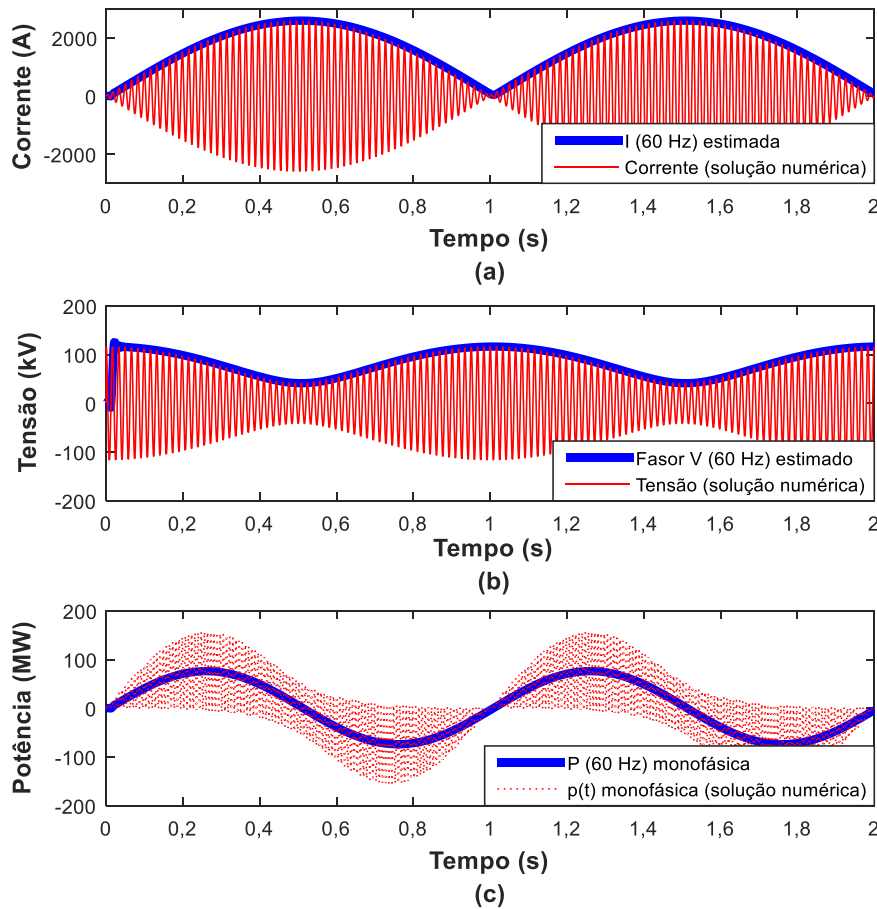


Figura 2.11 - Fasores corrente (a), tensão (b) e potência monofásica (c) junto com os respectivos sinais instantâneos.

Constata-se que no primeiro semiciclo a potência ativa é positiva, demonstrando que a fonte E_1 está enviando potência à fonte E_2 . Após $t = 0,5$ s, o fluxo de potência ativa é invertido, fazendo com que a fonte E_2 envie potência ativa à fonte E_1 . A oscilação em módulo e direção com frequência f_{slip} dá origem ao nome do fenômeno. É importante destacar que nessas simulações tem-se notoriamente uma oscilação do tipo instável, pois foram simulados 2 ciclos de oscilação (2 s), e para cada ciclo, há um giro da trajetória da impedância no plano RX, caracterizando tipicamente perda de sincronismo.

2.5.4 Comparação da estimação fasorial

Embora o algoritmo de estimação fasorial implementado no MATLAB® não seja idêntico ao utilizado pelo ATP nos blocos MODELS, ambos são derivados da Transformada de Fourier. Os gráficos da Figura 2.12 apresentam divergências mínimas nos módulos dos fasores corrente, tensão e valores de potência ativa trifásica e potência reativa trifásica, calculados a partir dos valores estimados, conforme (2.81) e (2.82). Como as tensões $|\dot{E}_1|$ e $|\dot{E}_2|$ são mantidas constantes na simulação, o fluxo de potência reativa é oscilatório, porém sempre da fonte E_1 para a fonte E_2 .

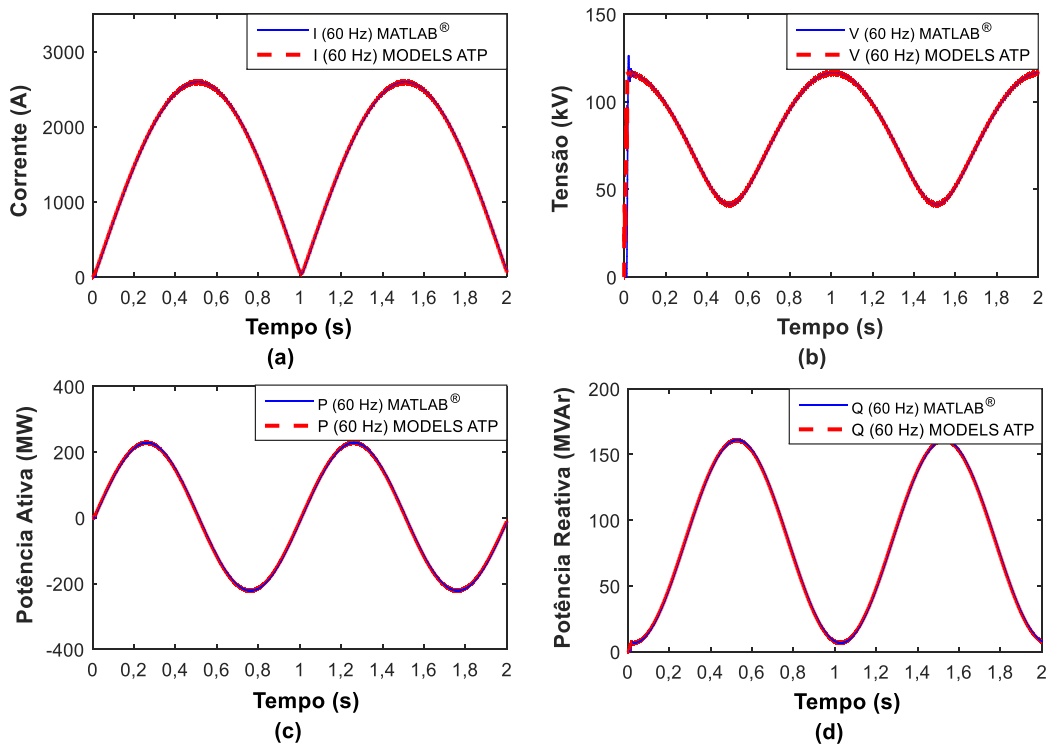


Figura 2.12 - Fasores corrente (a), tensão (b), potência ativa trifásica (c) e potência reativa trifásica (d) obtidos no MATLAB® e no ATP.

A estimação fasorial para um dado instante “k” das potências trifásicas ativa ($P_{RELÉ}$) e reativa ($Q_{RELÉ}$) foram obtidas utilizando-se (2.81) e (2.82), respectivamente, considerando-se três vezes a potência monofásica, dada condição de sistema equilibrado, e tomando-se as partes real (Re) e imaginária (Im) dos fasores tensão e corrente.

$$P_{RELÉ}(k) = 3 \left[Re \left\{ \frac{\dot{V}_1(k)}{\sqrt{2}} \right\} Re \left\{ \frac{\dot{I}_{LT}(k)}{\sqrt{2}} \right\} + Im \left\{ \frac{\dot{V}_1(k)}{\sqrt{2}} \right\} Im \left\{ \frac{\dot{I}_{LT}(k)}{\sqrt{2}} \right\} \right] \quad (2.81)$$

$$Q_{RELÉ}(k) = 3 \left[Im \left\{ \frac{\dot{V}_1(k)}{\sqrt{2}} \right\} Re \left\{ \frac{\dot{I}_{LT}(k)}{\sqrt{2}} \right\} - Re \left\{ \frac{\dot{V}_1(k)}{\sqrt{2}} \right\} Im \left\{ \frac{\dot{I}_{LT}(k)}{\sqrt{2}} \right\} \right] \quad (2.82)$$

2.5.5 Plano RX

A impedância vista pelo relé de distância é a principal variável a ser analisada durante o fenômeno. Na Figura 2.13 são apresentados os planos RX obtidos no MATLAB® e no ATP. À esquerda tem-se a trajetória completa de um período de oscilação, e à direita é realizado um *zoom* para detalhamento da trajetória ao cruzar a linha de transmissão. Considerando que $|\dot{E}_1|$ é 5% superior a $|\dot{E}_2|$, a trajetória da impedância localiza-se na parte positiva do eixo de reatâncias.

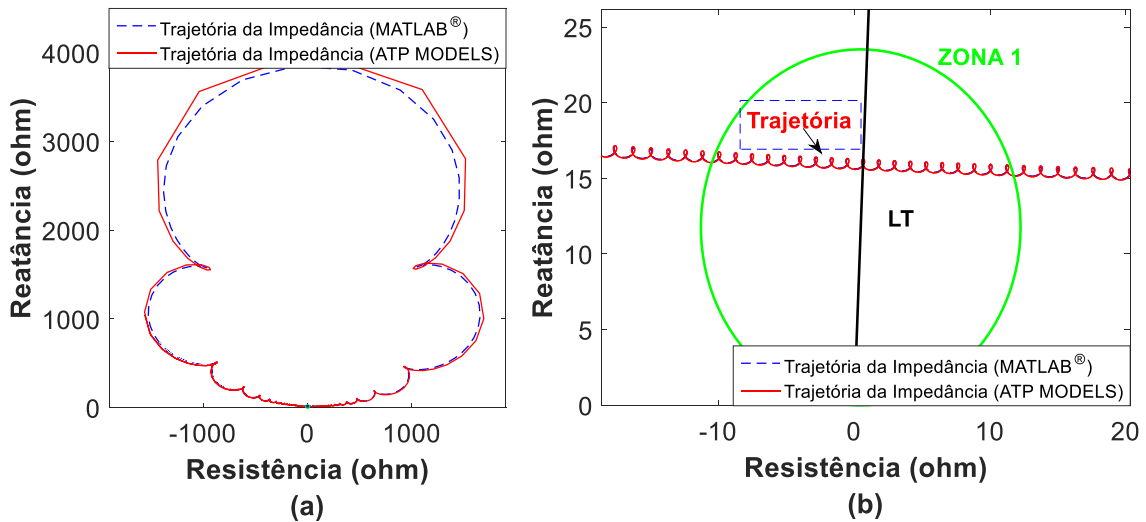


Figura 2.13 - Trajetória da impedância de um período de oscilação (a) e *zoom* próximo ao cruzamento com a LT (b) obtidos no MATLAB® e ATP.

Como se vê, os planos RX gerados pelos dois *softwares* apresentam o mesmo comportamento. É perceptível o efeito dos erros de estimação fasorial na característica oscilatória formada por laços na trajetória da impedância da Figura 2.13, uma vez que

nenhuma trajetória teórica obtida na Figura 2.4 apresentou esta característica. Estes laços são maiores para elevadas frequências de escorregamento, podendo alterar acentuadamente a trajetória teórica esperada. Isso se dá em função dos Fasores serem estimados para a frequência fundamental (60 Hz) e as ondas de tensão e corrente estarem em frequências diferentes da fundamental. Verifica-se ainda que, como as impedâncias dos equivalentes e da linha de transmissão são iguais, a trajetória da impedância cruza a linha de transmissão próximo à metade desta, no centro elétrico do sistema.

2.5.6 Velocidade da impedância

Considerando que a expressão analítica obtida em (2.65) para a velocidade da impedância é específica para o caso particular em que $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2|$, a simulação para obtenção da Figura 2.14 contemplou alteração da tensão rms fase-fase da fonte E_1 para 138 kV, valor idêntico ao da fonte E_2 . A equação implementada para estimação da velocidade da impedância para um dado instante “k” é apresentada em (2.83).

$$\frac{d\dot{Z}_{RELÉ}}{dt}(k) = \frac{|\dot{Z}_{RELÉ}(k) - \dot{Z}_{RELÉ}(k - N_a)|}{\Delta t N_a} \quad (2.83)$$

O gráfico da velocidade da impedância contempla a curva teórica (cálculo analítico) e a curva obtida por meio da estimação fasorial. Como já era previsto, em $\delta=180^\circ$, ou seja, próximo a $t = 0,5$ s, a menor velocidade é obtida.

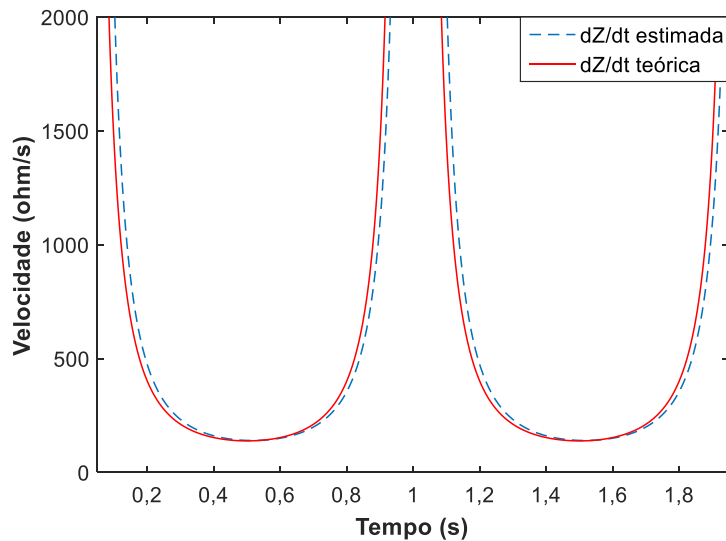


Figura 2.14 - Velocidade da impedância estimada e teórica.

3 Modelos para geração de sinais de oscilação de potência

3.1 Considerações iniciais

A validação de funções de proteção para bloqueio e disparo por oscilação de potência em relés de distância reais é usualmente feita por meio da aplicação de sinais de tensão e corrente calculados em *softwares* comerciais. Nestes casos, a metodologia empregada consiste na geração de rampas de corrente e/ou tensão em modelos disponíveis nos *softwares* de caixas de testes, como disposto nos trabalhos de (VERZOSA, 2013) e (SALGE et al., 2011). Contudo, os algoritmos e soluções numéricas empregados nesses *softwares* comerciais não estão integralmente acessíveis aos usuários de uma forma geral, o que dificulta os testes de relés proteção virtuais implementados em programas computacionais como o ATP e o MATLAB®.

Nos casos em que um Simulador Digital de Tempo Real (RTDS) esteja acessível, pode-se gerar distúrbios sistêmicos obtendo-se oscilações de potência em linhas de transmissão (LTs) após a desconexão de grandes blocos de cargas. Dessa forma, oscilações reais são obtidas após extenso trabalho de modelagem do sistema elétrico próximo à linha de transmissão em estudo, como descrito por (ALVES et al., 2018).

No ATP, uma forma usual de gerar oscilações de potência consiste na modelagem de um sistema equivalente clássico de duas máquinas síncronas, modeladas simplesmente como fontes, em que a frequência de uma destas está deslocada da outra por um escorregamento. Outra possibilidade, mais realística, consiste na simulação de distúrbios (faltas, perda de carga e/ou geração) em parte do sistema real modelado, analisando-se o efeito na LT em estudo, conforme disposto no trabalho de (MORAIS, 2012).

No trabalho de (LIN, 2010) apresenta-se uma metodologia para modelagem da oscilação de potência para frequências de deslizamento variáveis. O modelo parte da definição de um conjunto de equações polinomiais para a frequência da fonte, considerando-se uma função por partes, o que tende a representar de forma mais realística o comportamento dos geradores durante uma oscilação de potência.

Essas estratégias, contudo, não permitem que o usuário especifique diretamente a trajetória da impedância vista pelo relé de distância, como usualmente ocorre em *softwares* comerciais. Isso limita a variedade dos testes que podem ser feitos nos algoritmos de relés virtuais, restringindo o número de condições de operação a que esses podem ser submetidos em simulações computacionais.

Neste capítulo, apresenta-se a descrição e o equacionamento de modelos que possibilitam a definição da trajetória da impedância, velocidade, ângulo de deslizamento e tempos associados ao fenômeno de oscilação de potência. A implementação desses modelos no *software* MATLAB[®] permite ao usuário um controle de parâmetros análogo ao obtido em *softwares* comerciais na simulação do fenômeno de oscilação de potência. Esses modelos também servem como referência para uma implementação no ATP, o que se pretende fazer em etapa posterior a este trabalho.

Os sinais de tensão e corrente gerados pelos modelos deste capítulo são destinados essencialmente aos testes das funções 68 e 78 de relés de distância reais ou virtuais, sendo neste trabalho utilizados para testes dos relés virtuais implementados no MATLAB. A aplicação destes sinais em relés físicos pode ser feita por meio da conversão do arquivo “.mat” em “COMTRADE”, na plataforma “PlotXY” do ATP, o que se pretende fazer em trabalhos futuros.

3.2 Modelo para oscilações estáveis e instáveis

3.2.1 Modelo equivalente de duas máquinas com inclusão de faltas

O sistema equivalente de duas máquinas apresentado na Figura 3.1 possibilita a geração de oscilações estáveis e instáveis, inclusive com ocorrência de faltas durante a

oscilação. As fontes de tensão trifásicas são consideradas equilibradas, e os equivalentes e a LT são modelados como circuitos do tipo “RL acoplado”.

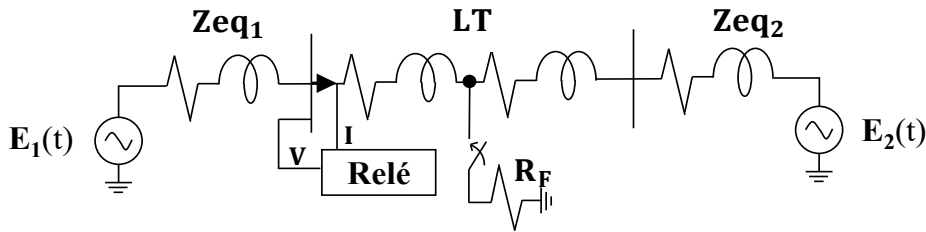


Figura 3.1 - Sistema para simulação de oscilações de potência com inclusão de faltas.

Para realização de uma oscilação estável ou instável basta que o ângulo de uma das fontes “deslize” em relação ao ângulo da outra fonte, o que fisicamente ocorre por desvios na frequência das máquinas. Para a solução do circuito da Figura 3.1 no MATLAB®, realizou-se a implementação do modelo numérico de um circuito RL trifásico acoplado, cuja dedução é descrita na seção a seguir.

3.2.2 Circuito RL Trifásico acoplado: modelo numérico

Este item tem por objetivo descrever o modelo no domínio do tempo discreto de um circuito RL trifásico acoplado, ilustrado na Figura 3.2, constituído de resistências e indutâncias próprias (R_p, L_p) e mútuas (R_m, L_m).

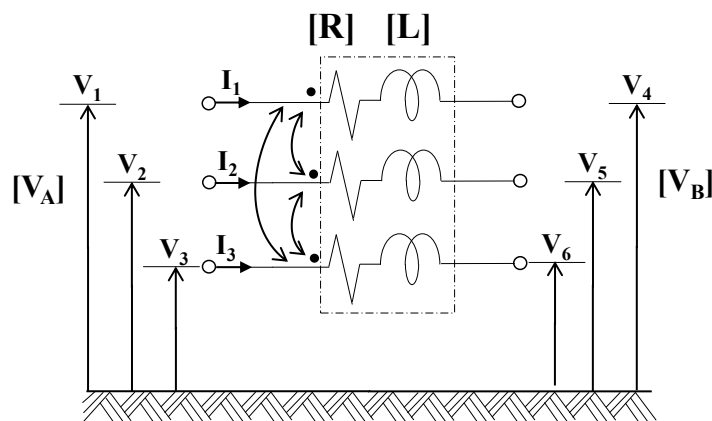


Figura 3.2 - Circuito RL Trifásico acoplado (adaptado de DOMMEL, 1969).

Considerando-se a frequência angular ω , pode-se escrever, no domínio da frequência:

$$V_A - V_B = (R + j\omega L)I \quad (3.1)$$

Onde:

V_A é o vetor de ordem 3×1 , composto pelas tensões monofásicas do nó A;

V_B é o vetor de ordem 3×1 , composto pelas tensões monofásicas do nó B;

R é uma matriz de ordem 3×3 , composta por resistências próprias e mútuas;

L é uma matriz de ordem 3×3 , composta por indutâncias próprias e mútuas;

I é o vetor de ordem 3×1 , composto pelas correntes que fluem pelo circuito;

Na forma matricial, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} R_p & R_m & R_m \\ R_m & R_p & R_m \\ R_m & R_m & R_p \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_p & L_m & L_m \\ L_m & L_p & L_m \\ L_m & L_m & L_p \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Onde:

V_1, V_2 e V_3 são as tensões das fases A, B e C, respectivamente, referente ao nó A;

V_4, V_5 e V_6 são as tensões das fases A, B e C, respectivamente, referente ao nó B;

I_1, I_2 e I_3 são as correntes nas fases A, B e C, respectivamente;

Definindo $A = L^{-1}$, multiplicando (3.1) à esquerda por esse termo e escrevendo a equação resultante no domínio do tempo, tem-se que:

$$A[v_A(t) - v_B(t)] = ARi(t) + \frac{di(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Onde:

$v_A(t)$ é o vetor de ordem 3×1 , composto pelas tensões instantâneas das fases A, B e C, respectivamente, referente ao nó A;

$v_B(t)$ é o vetor de ordem 3×1 , composto pelas tensões instantâneas das fases A, B e C, respectivamente, referente ao nó B;

$i(t)$ é o vetor de ordem 3×1 , composto pelas correntes instantâneas das fases A, B e C;

Multiplicando por dt e integrando-se no intervalo de $t - \Delta t$ a t , tem-se que:

$$A \int_{t-\Delta t}^t [v_A(t) - v_B(t)] dt = AR \int_{t-\Delta t}^t i(t) dt + i(t) - i(t - \Delta t) \quad (3.4)$$

Aplicando-se a regra de integração trapezoidal, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{2} A [v_A(t) + v_A(t - \Delta t) - v_B(t) - v_B(t - \Delta t)] \\ = AR \frac{\Delta t}{2} [i(t) + i(t - \Delta t)] + i(t) - i(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{2} A [v_A(t) - v_B(t)] + \frac{\Delta t}{2} A [v_A(t - \Delta t) - v_B(t - \Delta t)] \\ = \left[AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right] i(t) + \left[AR \frac{\Delta t}{2} - 1 \right] i(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Em (3.6), o número 1 representa uma matriz identidade de ordem 3. Isolando $i(t)$, e considerando $\Delta v(t)$ como um vetor de ordem 3×1 composto pelas quedas de tensões monofásicas entre os nós A e B, obtém-se que:

$$i(t) = G(v_A(t) - v_B(t)) + I_{hist}(t - \Delta t) \quad (3.7)$$

$$i(t) = G \Delta v(t) + I_{hist}(t - \Delta t) \quad (3.8)$$

$$[G]_{3 \times 3} = \left(AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} A \quad (3.9)$$

$$I_{hist}(t - \Delta t) = \left(AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left[\frac{\Delta t}{2} A \Delta v(t - \Delta t) + \left(1 - AR \frac{\Delta t}{2} \right) i(t - \Delta t) \right] \quad (3.10)$$

A formulação contida em (3.8), (3.9) e (3.10) contempla o modelo no domínio do tempo discreto apresentado na Figura 3.3.

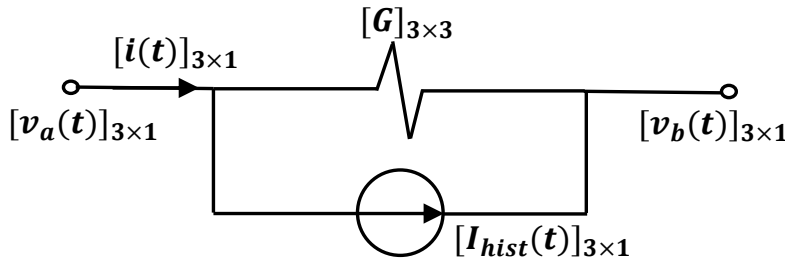


Figura 3.3 - Modelo no domínio do tempo discreto do circuito RL acoplado.

A utilização do modelo obtido demanda a atualização da corrente histórica (I_{hist}) a cada iteração. Assim, substituindo-se (3.9) em (3.10), para um dado instante t , tem-se que:

$$I_{hist}(t) = G\Delta v(t) + \left[\left(AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left(1 - AR \frac{\Delta t}{2} \right) \right] i(t) \quad (3.11)$$

Substituindo (3.8) em (3.11), tem-se que:

$$I_{hist}(t) = G\Delta v(t) + \left[\left(AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left(1 - AR \frac{\Delta t}{2} \right) \right] [G\Delta v(t) + I_{hist}(t - \Delta t)] \quad (3.12)$$

Objetivando eficiência computacional e considerando que em (3.12) há termos constantes, os quais podem ser calculados inicialmente, fora do *loop* de processamento, tem-se que:

$$I_{hist}(t) = G(1 + W)\Delta v(t) + WI_{hist}(t - \Delta t) \quad (3.13)$$

$$W = \left(AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left(1 - AR \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (3.14)$$

A implementação computacional do modelo obtido consiste apenas na utilização da matriz G de condutâncias (3.9) e atualização do termo histórico (3.13). Uma abordagem semelhante é descrita em (DOMMEL, 1969), a qual corresponde ao modelo utilizado pelo ATP. Embora analiticamente ele tenha expressões analíticas diferentes das desenvolvidas neste trabalho, ambas soluções obtêm resultados idênticos. As expressões de (DOMMEL, 1969) para a matriz de condutâncias G_{series} e atualização do termo histórico $I_{hist_series}(t)$ são dadas por:

$$G_{series} = (R_{series})^{-1} = \left(R + \frac{2}{\Delta t} L \right)^{-1} \quad (3.15)$$

$$I_{hist_series}(t) = H[\Delta v(t) + R_{series}I_{hist_series}(t - \Delta t)] - I_{hist_series}(t - \Delta t) \quad (3.16)$$

$$H = 2[G_{series} - G_{series}RG_{series}] \quad (3.17)$$

O circuito utilizado para comparação entre corrente obtida pelo modelo equacionado neste trabalho e àquele descrito por (DOMMEL, 1969), é apresentado na Figura 3.4, compreendendo uma linha de 54 km, utilizada ao longo das simulações deste

capítulo, com impedância de seqüência positiva dada por $Z1 = \dot{Z}_{LT}^{(1)} = 11,227959 + j27 \ \Omega$ e de seqüência zero dada por $Z0 = \dot{Z}_{LT}^{(0)} = 27,733058 + j80,46 \ \Omega$.

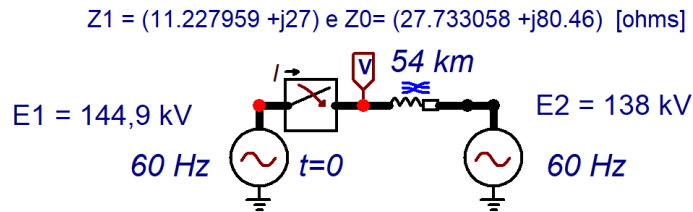


Figura 3.4 - Circuito simulado no ATP para validação do modelo equacionado.

Como pode ser observado na Figura 3.5, as correntes nas fases A, B e C durante o transitório de energização do circuito apresentaram comportamento praticamente idêntico para ambas soluções descritas neste trabalho, inclusive validando-se com a resposta do ATP, tendo em vista a sobreposição dos sinais.

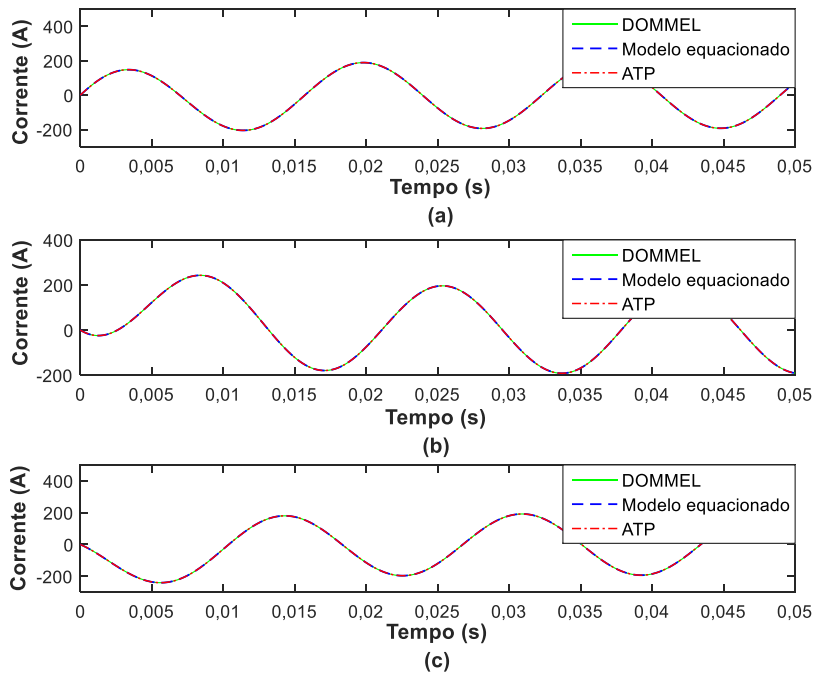


Figura 3.5 – Corrente na fase A (a), fase B (b) e na fase C (c).

3.2.3 Cálculo de faltas no domínio do tempo

De posse da formulação anterior, a solução final do circuito equivalente de duas máquinas, contemplando simulação de faltas, consiste na representação de cada ramo RL

acoplado pelo respectivo modelo numérico, conforme apresentado na Figura 3.6. Como pode ser observado, a impedância da LT é dividida em dois circuitos RL, objetivando o cálculo da falta em um determinado trecho da linha.

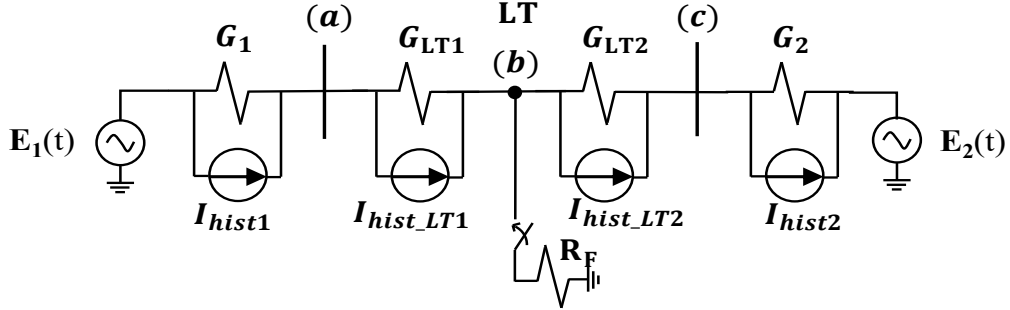


Figura 3.6 – Sistema de duas máquinas no domínio do tempo discreto utilizando o circuito RL acoplado.

Destaca-se que, na Figura 3.6, as resistências representam matrizes de condutâncias de ordem 3×3 , conforme (3.9). As correntes históricas, por sua vez, correspondem vetores de ordem 3×1 . Os índices “a”, “b” e “c” referem-se aos nós do circuito para montagem da matriz de admitância de barra, Y_{BUS} , de ordem 9×9 . As fontes E_1 e E_2 são vetores de ordem 3×1 , constituídos das tensões nodais conhecidas. Assim, a solução numérica do circuito da Figura 3.6 é dada por:

$$[V]_{9 \times 1} = \begin{bmatrix} v_a(t)_{3 \times 1} \\ v_b(t)_{3 \times 1} \\ v_c(t)_{3 \times 1} \end{bmatrix} = [Y_{BUS}]^{-1}_{9 \times 9} [I(t)]_{9 \times 1} \quad (3.18)$$

$$[Y_{BUS}]_{9 \times 9} = \begin{bmatrix} (G_1 + G_{LT1}) & -G_{LT1} & 0 \\ -G_{LT1} & (G_{LT1} + G_{LT2} + G_F) & -G_{LT2} \\ 0 & -G_{LT2} & (G_2 + G_{LT2}) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$[I(t)]_{9 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{hist1}(t) - I_{histLT1}(t) + G_1 \cdot E_1 \\ I_{histLT1}(t) - I_{histLT2}(t) \\ I_{histLT2}(t) - I_{hist2}(t) + G_2 \cdot E_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Onde:

G_1 e G_2 são as matrizes de condutâncias de ordem 3×3 dos equivalentes 1 e 2, respectivamente;

G_F é matriz de condutâncias de ordem 3×3 que contém as resistências de falta (R_F);

I_{hist1} e I_{hist2} são os vetores de correntes históricas de ordem 3×1 dos equivalentes 1 e 2, respectivamente;

G_{LT1} e G_{LT2} são as matrizes de condutâncias de ordem 3×3 que representam os trechos 1 e 2 da linha, respectivamente;

Para simulação de um curto-circuito entre a fase A e a terra (AT), a matriz G_F contém apenas o elemento (1,1) não nulo. Já para um curto-circuito entre as fases A e B (AB), os elementos não nulos são (1,1), (1,2), (2,1) e (2,2). No caso de uma falta ABT, considerando resistência entre cada fase e a terra separadamente, a matriz G_F contém apenas os elementos (1,1) e (2,2) não nulos. Por fim, para um curto-circuito trifásico (ABCT), toda a diagonal principal da matriz é preenchida. Assim, as matrizes para faltas AT, AB, ABT e ABCT, contemplando resistências de falta, são dadas por:

$$[G_F]_{3 \times 3}^{AT} = \begin{bmatrix} R_F^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$[G_F]_{3 \times 3}^{AB} = \begin{bmatrix} R_F^{-1} & -(R_F^{-1}) & 0 \\ -(R_F^{-1}) & R_F^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$[G_F]_{3 \times 3}^{ABT} = \begin{bmatrix} R_F^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & R_F^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$[G_F]_{3 \times 3}^{ABCT} = \begin{bmatrix} R_F^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & R_F^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & R_F^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Na Figura 3.7 é apresentado o sistema simulado no ATP para validação da solução equacionada destinada ao cálculo de faltas no domínio do tempo. Os parâmetros da linha são os mesmos contidos na Figura 3.4. As impedâncias de sequência positiva e zero de cada equivalente representam 10% da impedância de sequência positiva e zero da linha, respectivamente.

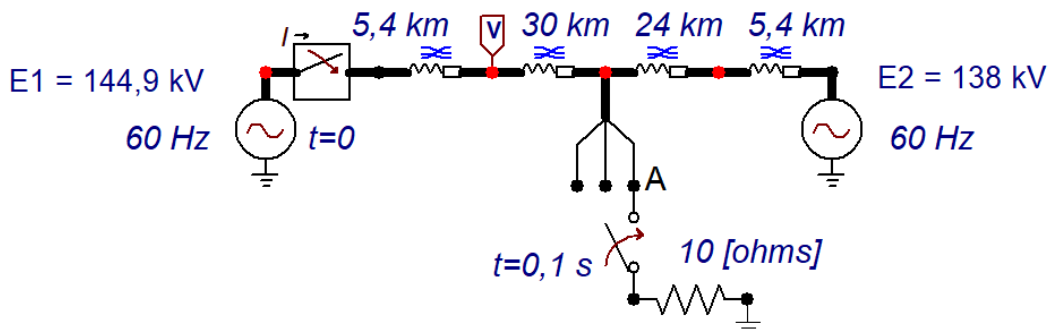


Figura 3.7 - Simulação de faltas no sistema equivalente de duas máquinas modelado no ATP.

Por meio da comparação dos sinais instantâneos gerados no MATLAB® com aqueles fornecidos pelo ATP, ilustrados na Figura 3.8, percebe-se a sobreposição de curvas, o que reforça a validade da solução apresentada. Para geração de faltas no domínio do tempo durante oscilações de potência, basta que seja realizada parametrização do deslizamento da fonte E_1 .

Para fins de exemplificação, alterando-se a frequência da fonte E_1 para 61 Hz, mudando o instante de falta para $t = 0,85$ s e utilizando resistência de falta de $1 \text{ m}\Omega$, tem-se uma falta AT no término de um período de oscilação de potência, conforme visto na Figura 3.9.

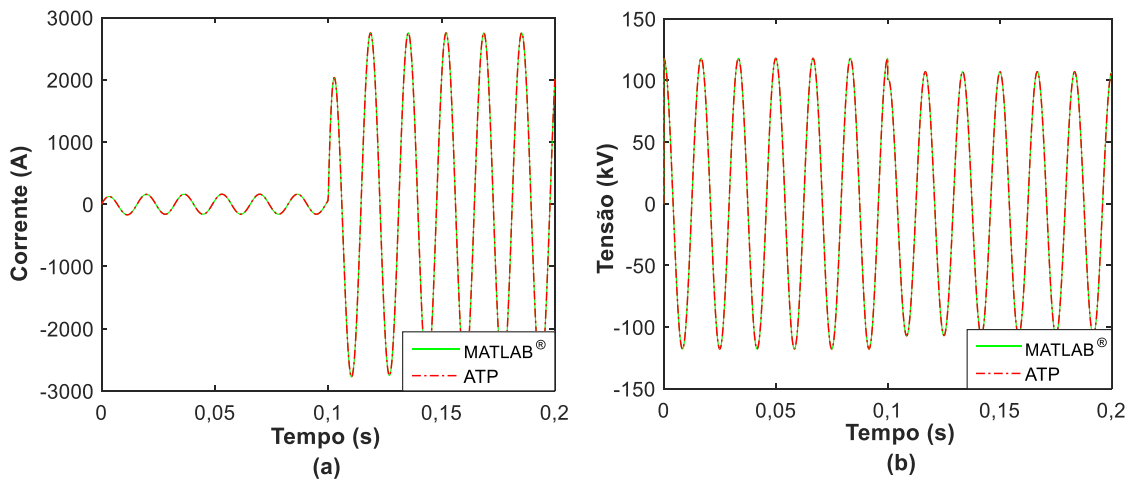


Figura 3.8 – Corrente I_a (a) e Tensão V_a (b) para falta AT sem oscilação de potência.

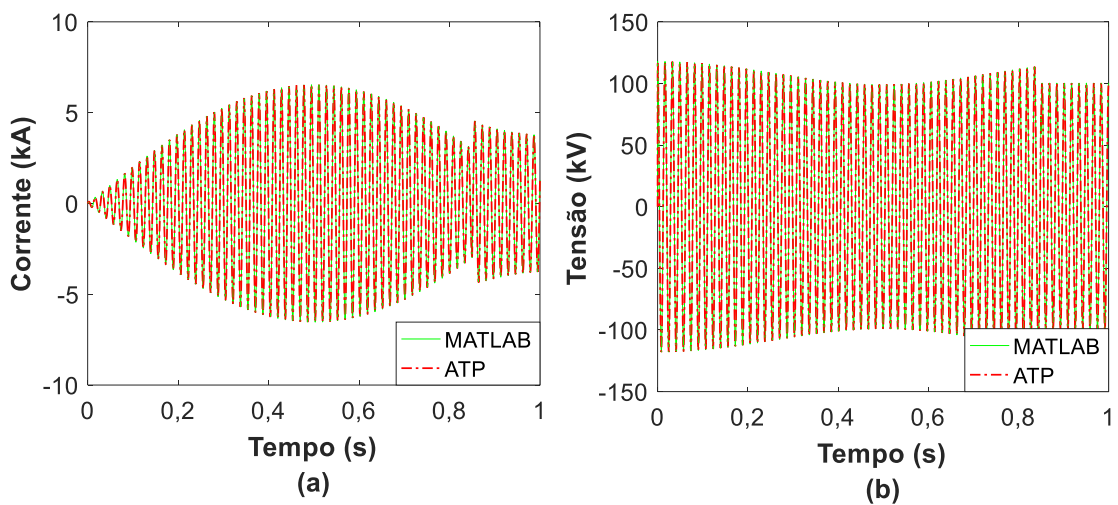


Figura 3.9 - Corrente I_a (a) e Tensão V_a (b) para falta AT durante oscilação de potência instável.

3.2.4 *Parametrização de oscilação de potência instável*

Oscilações de potência do tipo instável são caracterizadas pela perda de sincronismo das máquinas. No plano RX, a trajetória da impedância cruza o eixo das reatâncias, passando pelo centro elétrico do sistema, com tendência de giro, em função do tempo do fenômeno. A trajetória da impedância é influenciada pela relação entre os módulos das tensões E_1 e E_2 . Neste trabalho é utilizado $E_1 > E_2$, o que gera trajetórias circulares na parte superior do plano RX, conforme já descrito no capítulo 2. Tomando-se a fase A como referência, uma oscilação instável pode ser obtida fazendo-se com que a fonte E_1 tenha frequência angular ω_1 , diferente da frequência fundamental do sistema, ω_0 . Assim, tem-se que:

$$\delta(t) = (\omega_1 - \omega_0)t \quad (3.25)$$

$$E_1(t) = E_{1\text{máx}} \cos(\omega_0 t + \delta(t)) \quad (3.26)$$

$$E_1(t) = E_{1\text{máx}} \cos(\omega_1 t) \quad (3.27)$$

$$E_2(t) = E_{2\text{máx}} \cos(\omega_0 t) \quad (3.28)$$

A diferença “ $\omega_1 - \omega_0$ ” consiste em um deslize de frequência que ocasionará o avanço de uma fonte em relação à outra. No caso particular em que $\omega_1 = 2\pi 61$ e $\omega_0 = 2\pi 60$, a frequência da oscilação de potência será de 1 Hz, com período de 1 s, conforme mostrado no capítulo 2. Assim, em 0,5 s, a fonte E_1 estará 180° adiantada da fonte E_2 . O número de giros no plano RX pode ser definido em função número de períodos simulados. Logo, para cada período tem-se um giro de excursão da impedância. Considerando que a geração de oscilações instáveis depende apenas da existência de um *slip* de frequência em uma das fontes, a utilização do ATP é imediata, não necessitando de implementação via MODELS.

3.2.5 *Parametrização de oscilação de potência estável*

Uma oscilação estável consiste em uma situação de carga em que o sistema sofre um escorregamento, porém retorna ao equilíbrio, que pode ou não ser o mesmo ângulo inicial. Vale destacar que a formulação realizada neste trabalho considera que o sistema

retorna ao estado inicial dado pelo ângulo δ_0 , apenas a título de simplificação. Caso se deseje utilizar o ângulo de retorno diferente do inicial, basta que seja realizada alteração na função $\delta(t)$ no último trecho. Para a geração dos sinais referente à oscilação estável é definida uma função no tempo (Figura 3.10) para o ângulo da fonte E_1 , mantendo-se constante o ângulo de carga da fonte E_2 .

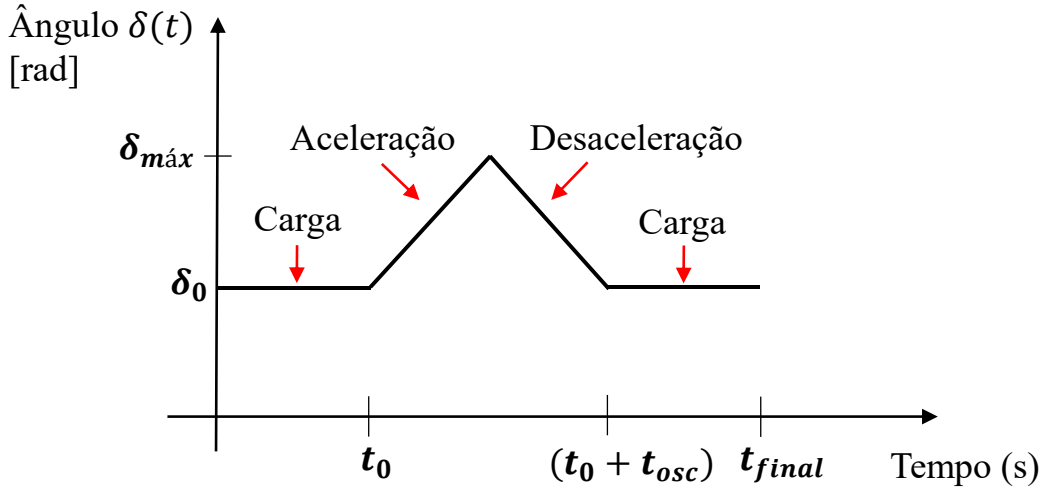


Figura 3.10 - Ângulo da fonte E_1 em função do tempo referente à parametrização da oscilação potência estável.

Apresenta-se, na Figura 3.10, o comportamento de $\delta(t)$ para uma oscilação de potência estável, sendo δ_0 o ângulo inicial da fonte E_1 , t_0 o tempo de início da oscilação de potência, $\delta_{m\acute{a}x}$ o ângulo máximo atingido pela fonte E_1 , t_{osc} a duração da oscilação, e t_{final} o instante de término da simulação. As equações das retas que constituem a função $\delta(t)$ considerando-se ω_{slip1} como a velocidade angular de escorregamento, são dadas por:

$$\omega_{slip1} = \left(\frac{\delta_{m\acute{a}x} - \delta_0}{\frac{t_{osc}}{2}} \right) \quad (3.29)$$

$$\delta(t) = \delta_0, \quad 0 < t < t_0 \quad (3.30)$$

$$\delta(t) = \omega_{slip1}t + \delta_0 - t_0\omega_{slip1}, \quad t_0 \leq t < \left(t_0 + \frac{t_{osc}}{2} \right) \quad (3.31)$$

$$\delta(t) = -\omega_{slip1}t + \delta_0 + (t_0 + t_{osc})\omega_{slip1}, \quad \left(t_0 + \frac{t_{osc}}{2} \right) \leq t < (t_0 + t_{osc}) \quad (3.32)$$

$$\delta(t) = \delta_0, \quad (t_0 + t_{osc}) \leq t \leq t_{final} \quad (3.33)$$

Um exemplo do efeito da variação do ângulo da fonte E_1 sobre a corrente e a tensão é mostrado na Figura 3.11, resultado da implementação de (3.29) a (3.33). A parametrização definida neste caso foi de 1 s com ângulo inicial de 20° , seguido de 1 s de oscilação com ângulo máximo de 120° . Por fim, a fonte E_1 retorna ao ângulo de 20° e permanece por 1 s. Os parâmetros de todo o sistema equivalente de duas máquinas utilizados são os mesmos apresentados na Figura 3.7, excetuando-se a ocorrência de falta.

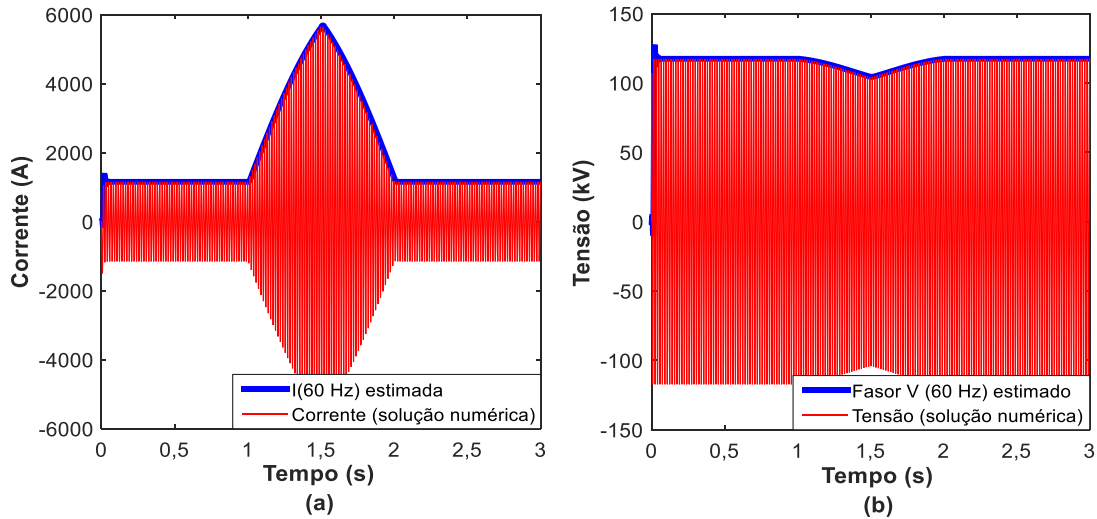


Figura 3.11 - Corrente I_a (a) e Tensão V_a (b) durante oscilação estável parametrizada.

O fasor Z_{AT} que descreve a trajetória da impedância estimada pelo *loop* da fase A para terra é apresentado na Figura 3.12, juntamente com a trajetória teórica, definida a partir da implementação de (2.54).

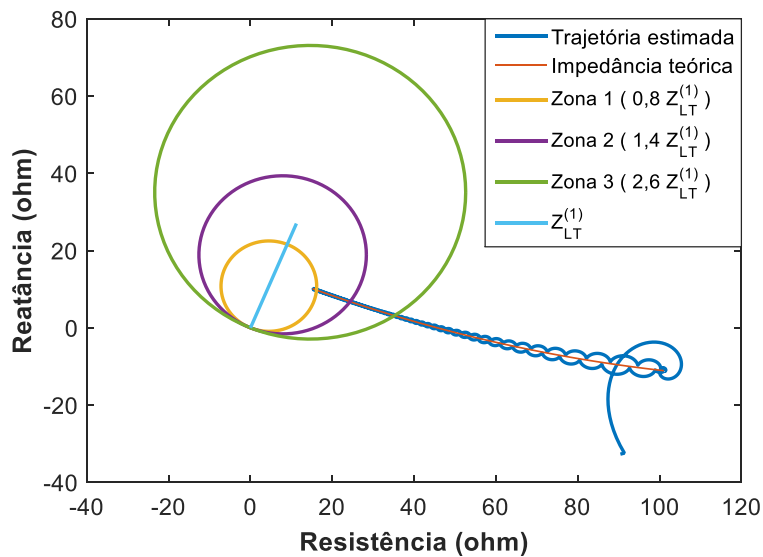


Figura 3.12 - Trajetória da impedância vista pelo *loop* AT durante oscilação de potência estável parametrizada.

3.3 Modelo para oscilações de potência com trajetórias editáveis

3.3.1 Modelo equivalente de uma máquina

A geração de oscilografias a partir da definição da trajetória no plano RX, semelhante ao que é feito nos *softwares* de caixas de testes, é destinada apenas para testes das funções de proteção 68-78, haja vista não se tratar de algo fisicamente possível de ocorrer no sistema elétrico. O sistema utilizado contempla um equivalente constituído da fonte de tensão E_s , resistência R_s e indutância L_s , e um ramo de impedância vista pelo relé, conforme Figura 3.13.

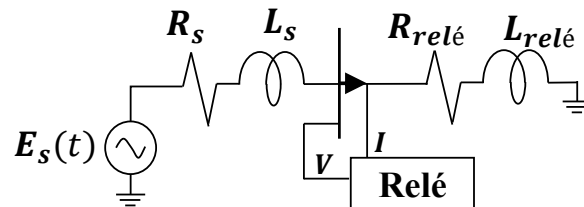


Figura 3.13 - Sistema de uma máquina para oscilação de potência com trajetória editável.

3.3.2 Parametrização da trajetória da impedância

A ideia central deste modelo consiste em se definir trajetórias formadas por segmentos de retas (Figura 3.14), especificando-se os pontos de início e fim, além da velocidade da impedância $\left| \frac{dZ}{dt} \right|$ constante (nomeada como ψ) em cada segmento, conforme descrito a seguir.

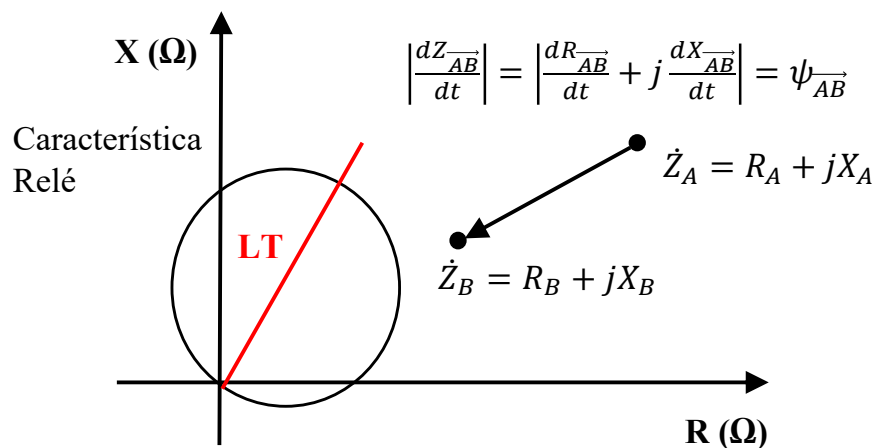


Figura 3.14 - Trajetória editável no plano RX.

Considerando que são especificados a velocidade ($\psi_{\overline{AB}}$) e os pontos \dot{Z}_A e \dot{Z}_B , o tempo de deslocamento ($t_{dz_{\overline{AB}}}$) é dado por:

$$t_{dz_{\overline{AB}}} = \frac{|\dot{Z}_B - \dot{Z}_A|}{\left| \frac{dZ_{\overline{AB}}}{dt} \right|} = \frac{\sqrt{(R_B - R_A)^2 + (X_B - X_A)^2}}{\psi_{\overline{AB}}} \quad (3.34)$$

Onde:

\dot{Z}_A e \dot{Z}_B são as impedâncias dos pontos A e B, respectivamente;

R_A e R_B são as resistências dos pontos A e B, respectivamente;

X_A e X_B são as reatâncias indutivas dos pontos A e B, respectivamente;

As velocidades de deslocamento nas direções de R e X são dadas por:

$$\frac{dR_{\overline{AB}}}{dt} = \frac{R_B - R_A}{t_{dz_{\overline{AB}}}} \quad (3.35)$$

$$\frac{dX_{\overline{AB}}}{dt} = \frac{X_B - X_A}{t_{dz_{\overline{AB}}}} \quad (3.36)$$

Assim, impedância vista pelo relé ($\dot{Z}_{relé}$), constituída da resistência ($R_{relé}$) e da reatância indutiva ($X_{relé}$), para um dado instante de tempo t na trajetória linear entre \dot{Z}_A e \dot{Z}_B é calculada como:

$$\dot{Z}_{relé}(t) = R_{relé}(t) + j2\pi 60 L_{relé}(t) = R_{relé}(t) + jX_{relé}(t) \quad (3.37)$$

$$\dot{Z}_{relé}(R, X, t) = \left(R_A + \frac{dR_{\overline{AB}}}{dt} t \right) + j \left(X_A + \frac{dX_{\overline{AB}}}{dt} t \right) \quad (3.38)$$

A inserção de um terceiro ponto \dot{Z}_C a partir de \dot{Z}_B , considerando uma velocidade definida $\left| \frac{dZ_{\overline{BC}}}{dt} \right|$, requer o cálculo de (3.34), (3.35) e (3.36). Logo, a impedância vista pelo relé será composta por duas funções apresentadas em (3.39) e (3.40), cada uma válida durante o tempo calculado para a trajetória no segmento de reta. Para o primeiro segmento entre \dot{Z}_A e \dot{Z}_B , tem-se que:

$$\dot{Z}_{relé}(R, X, t) = \left(R_A + \frac{dR_{\overline{AB}}}{dt} t \right) + j \left(X_A + \frac{dX_{\overline{AB}}}{dt} t \right), \quad 0 \leq t \leq t_{dz_{\overline{AB}}} \quad (3.39)$$

E para o trecho entre \dot{Z}_B e \dot{Z}_C , tem-se que:

$$\dot{Z}_{relé}(R, X, t) = \left[R_B + \frac{dR_{\overline{BC}}}{dt} (t - t_{dz_{\overline{AB}}}) \right] + j \left[X_B + \frac{dX_{\overline{BC}}}{dt} (t - t_{dz_{\overline{AB}}}) \right], \quad (3.40)$$

$$t_{dz_{\overline{AB}}} < t \leq t_{dz_{\overline{BC}}}$$

A inserção de mais segmentos de reta na trajetória repete o procedimento descrito. É necessário, contudo, considerar o deslocamento no tempo $t - t_0$, onde t_0 é o tempo já decorrido quando a impedância está sobre o ponto de início da reta, como visto em (3.40).

3.3.3 Solução fasorial a cada instante

No método descrito nesta seção, no instante em que a impedância cruza os eixos, os valores de R ou X tendem a valores próximos de zero, o que pode ocasionar erros numéricos. De forma a evitar tais situações, utiliza-se neste trabalho a solução fasorial em cada instante t , que fornece uma solução aproximada para o problema. Utilizando-se (3.41) a (3.45), os sinais de corrente e tensão vistos pelo relé da Figura 3.13 são imediatamente obtidos para cada instante de tempo, considerando \dot{Z}_t como a impedância total do circuito, $\varphi_{\dot{Z}_t}$ o ângulo desta impedância e $E_{s\text{máx}}$ o valor de pico da fonte E_s .

$$i_a(t) = \frac{E_{s\text{máx}} \text{sen}(\omega_0 t - \varphi_{\dot{Z}_t})}{|\dot{Z}_t|} \quad (3.41)$$

$$|\dot{Z}_t| = \sqrt{(R_s + R_{relé})^2 + (\omega_0 L_s + X_{relé})^2} \quad (3.42)$$

$$\varphi_{\dot{Z}_t} = \cos^{-1} \left(\frac{R_s + R_{relé}}{|\dot{Z}_t|} \right), \quad \text{se } (\omega_0 L_s + X_{relé}) > 0 \quad (3.43)$$

$$\varphi_{\dot{Z}_t} = 2\pi - \cos^{-1} \left(\frac{R_s + R_{relé}}{|\dot{Z}_t|} \right), \quad \text{se } (\omega_0 L_s + X_{relé}) < 0 \quad (3.44)$$

$$v_a(t) = E_{s\text{máx}} \text{sen}(\omega_0 t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{\omega_0 E_{s\text{máx}} \cos(\omega_0 t - \varphi_{\dot{Z}_t})}{|\dot{Z}_t|} \quad (3.45)$$

A validação da solução fasorial a cada instante de tempo foi realizada por meio de comparações com sinais gerados pela solução numérica que utiliza correntes históricas de (DOMMEL, 1969), para valores de R e X diferentes de zero. Os parâmetros do circuito da Figura 3.13 utilizados foram, $R_s = 1,12 \Omega$, $L_s = 7,162 \text{ mH}$, $E_{s\text{máx}} = 144,9 \sqrt{(2/3)} \text{ kV}$ e $\omega_0 = 2\pi 60 \text{ rad/s}$. Os pontos de início e fim para trajetória linear no plano RX foram $\dot{Z}_A = (60 + j30) \Omega$ e $\dot{Z}_B = (10 + j30) \Omega$, com a velocidade de $\left| \frac{dZ_{\overline{AB}}}{dt} \right| = 80 \Omega/s$.

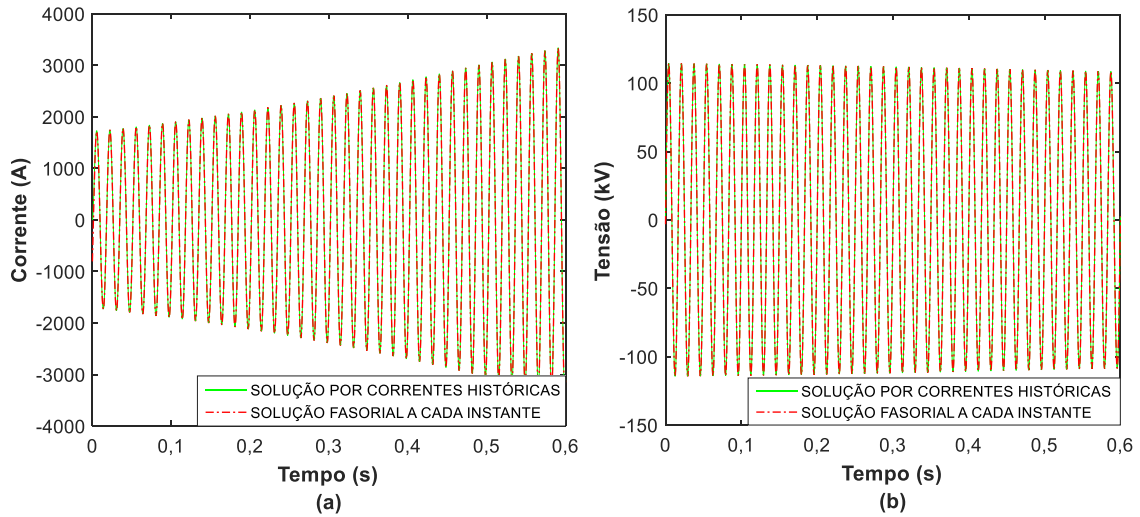


Figura 3.15 – Corrente na fase A (a) e tensão da fase A (b) durante oscilação com trajetória editável.

Os resultados obtidos na Figura 3.15, tomando-se a fase A, confirmam a validade da solução aproximada, o que era esperado tendo em vista a variação lenta dos sinais testados e a constante de tempo do sistema. A trajetória da impedância estimada para este caso é apresentada na Figura 3.16. Conforme observado, a trajetória linear obtida é próxima àquela parametrizada, iniciando-se no ponto (59,25; 29,96) e finalizando-se em (10,75; 30,01), com duração total de 0,625 s. Vale destacar, que devido à baixa velocidade parametrizada (80 Ω/s), a trajetória possui pouca influência dos laços ocasionados pelos erros de estimação fasorial.

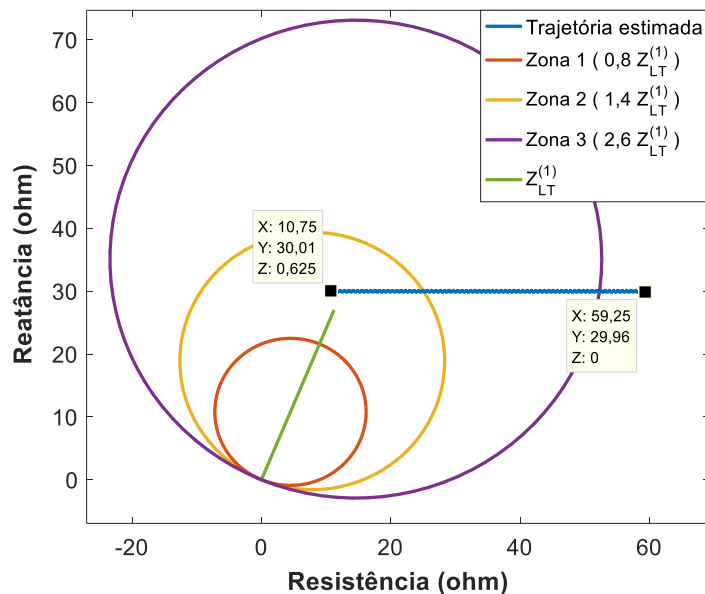


Figura 3.16 - Trajetória editável estimada, cujas coordenadas X, Y e Z referem-se respectivamente às grandezas: resistência, reatância e tempo.

Considerando que inicialmente a impedância possuía velocidade nula e a estimação fasorial de $\frac{d\dot{Z}_{RELÉ}}{dt}$ vista em (2.83) calcula a velocidade com base no ciclo anterior, percebe-se inicialmente um transitório na velocidade estimada, conforme apresentado na Figura 3.17. Após 100 ms, tem-se então a velocidade estimada de 79,99 Ω/s , muito próxima àquela parametrizada.

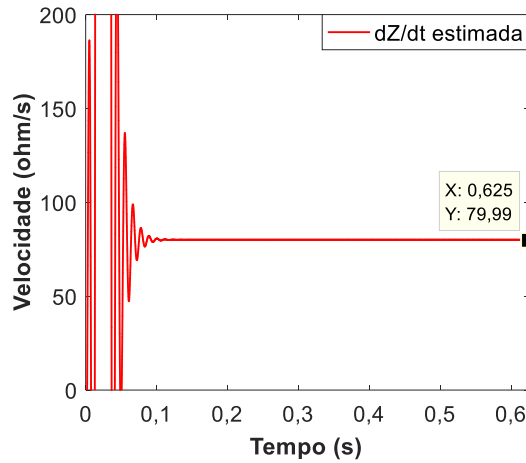


Figura 3.17 - Velocidade da impedância estimada.

Na Figura 3.18 tem-se um conjunto de trajetórias lineares no plano RX em que foram considerados os pontos $\dot{Z}_A = (120 + j60) \Omega$, $\dot{Z}_B = (30 + j60) \Omega$, $\dot{Z}_C = (30 + j20) \Omega$ e $\dot{Z}_D = (120 + j20) \Omega$, com as velocidades de $\left| \frac{dZ_{AB}}{dt} \right| = 50 \Omega/s$, $\left| \frac{dZ_{BC}}{dt} \right| = 40 \Omega/s$ e $\left| \frac{dZ_{CD}}{dt} \right| = 35 \Omega/s$, e trajetória iniciada após $t_0 = 0,5$ s.

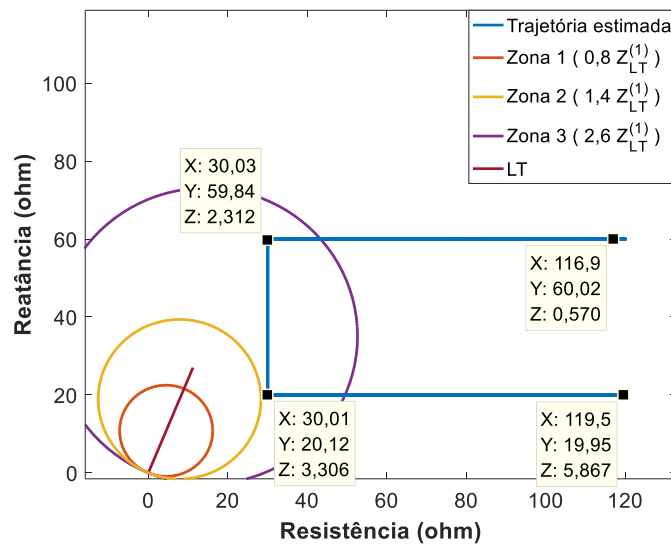


Figura 3.18 - Oscilação estável utilizando o modelo de uma máquina, cujas coordenadas X, Y e Z referem-se respectivamente às grandezas: resistência, reatância e tempo.

Como pode ser observado na Figura 3.19, a velocidade da impedância estimada (50, 40 e 35 Ω/s) permanece constante durante cada trajetória linear definida, sendo detectadas somente pequenas alterações nas transições. Os sinais instantâneos de corrente e tensão gerados pelo modelo de uma máquina que proporcionaram a trajetória da Figura 3.18 são apresentados na Figura 3.20. Conforme já esperado, percebe-se que a maior variação ocorre no sinal de corrente, uma vez que a fonte E_s tem valor constante durante toda a simulação, e as quedas nos elementos R_s e L_s são pouco representativas.

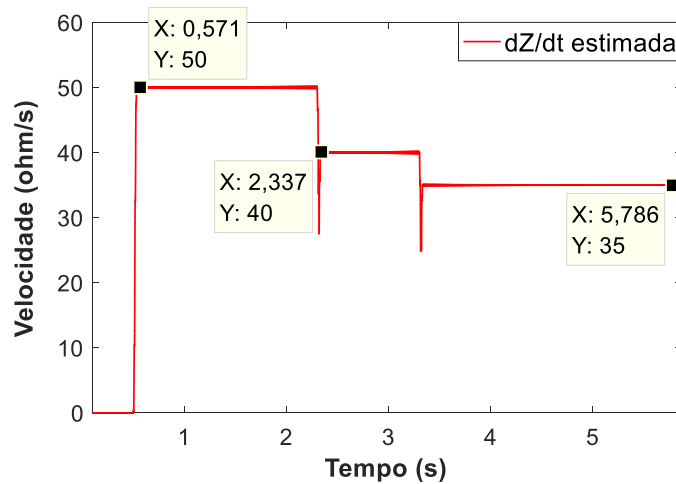


Figura 3.19 - Velocidade da impedância estimada em todos os segmentos de retas da trajetória da impedância.

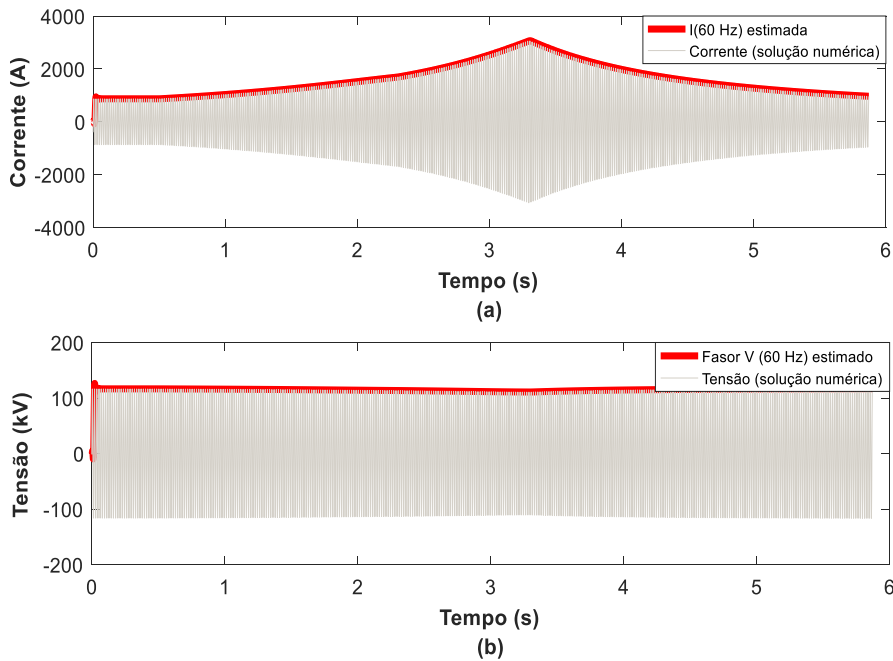


Figura 3.20 - Sinais instantâneos e fasores de corrente (a) e tensão (b) gerados para a trajetória definida.

4 Algoritmos para detecção de oscilações de potência

4.1 Considerações iniciais

Os métodos para detecção de oscilação de potência são classificados em convencionais e não-convencionais, conforme descrito em (IEEE PSRC WG D6, 2005). Os métodos convencionais utilizam a velocidade da impedância para distinguir faltas de oscilações de potência, partindo-se do princípio de que durante um curto-circuito a impedância salta quase que instantaneamente para o ponto de curto-circuito, mas durante uma oscilação a velocidade é substancialmente inferior. Esta constatação foi analiticamente e graficamente vista no capítulo 2 deste trabalho.

Em sua maioria, os métodos convencionais utilizam características externas à última zona de proteção, separadas por um *offset* de impedância no plano RX, medindo-se o tempo que a impedância estimada demora para se deslocar nessa região. Com base nesta informação é tomada a decisão de bloqueio da função 21 por oscilação de potência, disparo por perda de sincronismo, ou falta por 21. Os métodos convencionais abordados na literatura contemplam o “Método das Características Concêntricas”, “Método Duplo *Blinder*”, “Método Único *Blinder*” e o “Método R-dot”.

É importante destacar que os métodos convencionais são utilizados em diversos relés de distância atualmente comercializados, a exemplo no ABB REL-650 (ABB, 2019), GE D60 (GE, 2019) e SEL 421 (SCHWEITZER, 2011). Nestes relés, o algoritmo para detecção apresenta variações para a forma das características externas (*blindings*), mas fundamentam-se no mesmo princípio de medição do tempo para deslocamento no plano RX.

Os métodos não-convencionais consistem da não-utilização da medição do tempo de deslocamento no plano RX, apresentando diversas filosofias de detecção, baseadas em

outras variáveis que caracterizam o fenômeno. Em (IEEE PSRC WG D6, 2005) são descritos o “Método do Cálculo Contínuo da Impedância”, “Método da Variação da Tensão do Centro Elétrico” e o “Método baseado em sincrofasores”. Em (GAZEN, 2015) tem-se ainda a implementação do “Método do Cálculo Contínuo da Impedância”, aplicado à proteção contra perda de excitação em geradores síncronos.

No trabalho de (MORAIS, 2012) tem-se a descrição do “Método de Detecção de Oscilações de Potência por meio de Componentes Simétricas e Derivada do Ângulo da Corrente de Sequência Positiva” e do “Método da Detecção de Oscilação de Potência por meio da Análise de Transitórios”, os quais são implementados computacionalmente. Tem-se ainda nesse trabalho a proposição de um método baseado na diferença comportamental da componente exponencial nas situações de falta e oscilação de potência, por meio de um filtro morfológico.

Alguns relés de distância já disponibilizam métodos não-convencionais, como por exemplo o SEL-411L (SCHWEITZER, 2015) e o NR PCS-902 (NARI, 2018) que se baseiam na taxa de variação da tensão do centro elétrico. No Siemens 7SA86 (SIEMENS, 2018) tem-se a detecção de oscilações por meio da avaliação da monotonia, continuidade e uniformidade da trajetória, em algoritmo próprio não detalhado na íntegra. Já no MiCOM P545 (SCHNEIDER, 2011) é utilizado o método de detecção pela superposição de correntes com base no cálculo contínuo da variação de corrente instantânea, comparando-se sempre a corrente atual com aquela de dois ciclos anteriores.

Novos algoritmos têm sido propostos em trabalhos recentes objetivando-se essencialmente a redução do tempo para detecção de faltas trifásicas durante oscilações. Em (MENCO, 2018) são propostos dois algoritmos para detecção de oscilações de potência no domínio do tempo, que possibilita identificar faltas durante oscilações com tempo médio inferior a 0,75 ciclos. É importante destacar que embora diversos algoritmos não-convencionais tenham sido propostos, o resultado da utilização destes, embarcados em *hardwares*, tem sido pouco abordado. Objetivando-se a avaliação do comportamento dos algoritmos das funções 68-78, neste trabalho é realizada a implementação computacional do “Método das Características Concêntricas” e do “Método da Variação da Tensão do Centro Elétrico”, detalhando-se na íntegra a metodologia utilizada e os ajustes, possibilitando a reprodução destes.

4.2 Método das Características Concêntricas (MCC)

4.2.1 Filosofia de operação

Este método consiste na utilização de duas características concêntricas (*blindings* interno e externo), externas à última zona de proteção (Zonas 2 ou 3), separadas no plano RX por uma diferença dZ (em ohms), como apresentado na Figura 4.1.

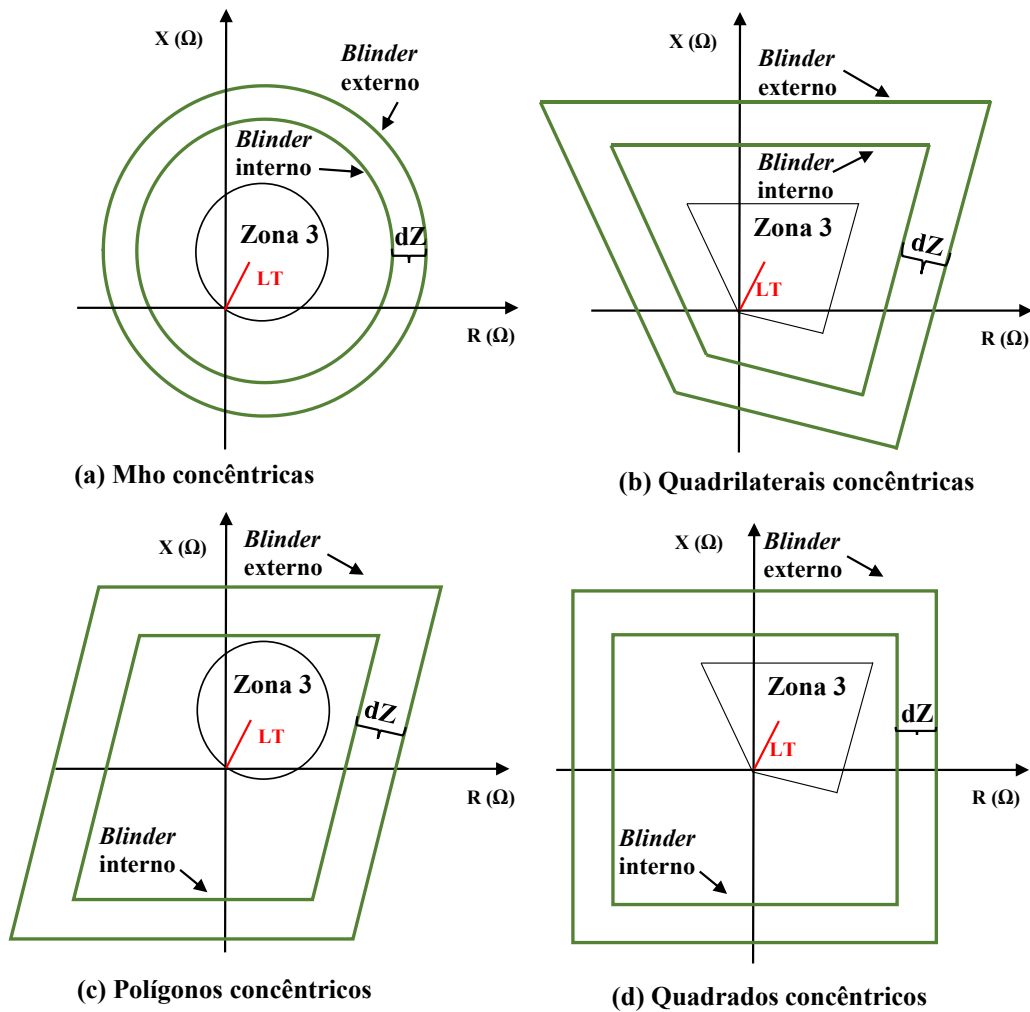


Figura 4.1 - Características concêntricas (adaptado de IEEE PSRC WG D6, 2005).

Quando a trajetória da impedância passa pelo *blinder* externo é iniciado um temporizador, que é encerrado após a passagem pelo *blinder* interno. O tempo medido (t_{med}) é comparado com os ajustes dos temporizadores definidos pelo usuário, OSBD (*Out-of-Step Blocking Delay*) e OSTD (*Out-of-Step Trip Delay*), possibilitando a definição da ação a ser tomada, conforme apresentado na Tabela 1.

Vale ressaltar que a comparação é realizada apenas com os temporizadores da respectiva função habilitada, tendo em vista que nem sempre estão habilitadas nas linhas de transmissão as funções 68 e 78 juntas. Assim, para uma linha que possua apenas a função 68 habilitada, apenas o temporizador OSBD será utilizado.

Tabela 1 - Temporizadores OSBD e OSTD (adaptado de ALVES et al., 2018).

Verificação	Fenômeno	Ação
$t_{med} < OSTD$	Curto-circuito	Sem ação 68/78. Atuação por 21.
$OSTD < t_{med} < OSBD$	Oscilação instável	<i>Trip</i> por 78
$t_{med} > OSBD$	Oscilação estável	Bloqueio da função 21 por 68

Em linhas longas e muito carregadas é comum a existência de *load encroachment*, ou seja, uma região de carga no plano RX interna às zonas de proteção. Nestes casos, o posicionamento dos *blindings* pode ser limitado, posto que o *blinder* externo não deve alcançar regiões de carga. O *blinder* interno, por sua vez, deve ser ajustado de modo a cobrir a zona mais externa de proteção, contemplando a zona associada à teleproteção.

Vale destacar que o disparo para o disjuntor, durante oscilação de potência instável, deve ser realizado sob condições angulares seguras, sendo 120° um ajuste típico para o *blinder* interno (ALVES et al., 2018). Desta forma garante-se menor tensão entre os polos do disjuntor na abertura, minimizando o risco de abertura em oposição de fase. Esta ação fundamenta-se no fato de que após esse ângulo o sistema tende à perda de sincronismo. Destaca-se ainda que $\delta = 120^\circ$ é um critério conhecido de limite para *trip*, sendo considerado outros trabalhos, como em (NERC, 2014).

O cálculo dos ajustes OSBD e OSTD pode ser realizado adaptando-se (2.66) para a máxima frequência de oscilação estável ($f_{slip-estável}$) e instável ($f_{slip-instável}$), respectivamente. Considerando que se conhece a diferença angular ($\Delta\delta$) entre o posicionamento geométrico dos *blindings*, tem-se que:

$$OSBD = \frac{\Delta\delta}{2\pi f_{slip-estável}} \quad (4.1)$$

$$OSTD = \frac{\Delta\delta}{2\pi f_{slip-instável}} \quad (4.2)$$

Considerando-se que a velocidade da impedância (2.65) é função da impedância total (\dot{Z}_T) entre as fontes E_1 e E_2 do sistema de duas máquinas, e da frequência de escorregamento (f_{slip}), constata-se que o ajuste dos temporizadores OSBD e OSTD deve levar em consideração para cada linha em estudo, os equivalentes vistos a partir de seus terminais, bem como as frequências limites para distinção entre oscilações estáveis e instáveis. Logo, estudos de estabilidade eletromecânica são necessários de modo a obter a velocidade da impedância em cada linha durante a ocorrência do fenômeno, o que pode dificultar a parametrização de funções 68-78 que utilizam este método.

4.2.2 Implementação computacional do MCC

De posse dos sinais instantâneos gerados a partir dos modelos equacionados no capítulo 2 e de simulações no ATP, neste trabalho é realizada a amostragem das tensões e correntes numa taxa de 64 pontos por ciclo (3,84 kHz), tendo por objetivo estimação fasorial. Utilizando-se os fasores estimados, são realizados cálculos pelas funções de proteção. O algoritmo MCC implementado no MATLAB® para as funções 68-78 é apresentado na Figura 4.2.

As equações utilizadas para estimação fasorial da impedância vista pelos *loops* de impedância para terra AT, BT e CT utilizam o fator de compensação \dot{K}_0 , calculado em função da impedância de sequência positiva da linha ($\dot{Z}_{LT}^{(1)}$) e da impedância de sequência zero ($\dot{Z}_{LT}^{(0)}$). Assim, tem-se que:

$$\dot{Z}_{AT}(k) = \frac{\dot{V}_A(k)}{\dot{I}_A(k) + \dot{K}_0 \dot{I}_{A0}(k)} = R_{AT}(k) + jX_{AT}(k) \quad (4.3)$$

$$\dot{Z}_{BT}(k) = \frac{\dot{V}_B(k)}{\dot{I}_B(k) + \dot{K}_0 \dot{I}_{B0}(k)} = R_{BT}(k) + jX_{BT}(k) \quad (4.4)$$

$$\dot{Z}_{CT}(k) = \frac{\dot{V}_C(k)}{\dot{I}_C(k) + \dot{K}_0 \dot{I}_{C0}(k)} = R_{CT}(k) + jX_{CT}(k) \quad (4.5)$$

$$\dot{K}_0 = \frac{\dot{Z}_{LT}^{(0)} - \dot{Z}_{LT}^{(1)}}{\dot{Z}_{LT}^{(1)}} \quad (4.6)$$

Já para os *loops* fase-fase não é necessária utilização do fator K_0 , tendo equações dadas por:

$$\dot{Z}_{AB}(k) = \frac{\dot{V}_A(k) - \dot{V}_B(k)}{\dot{I}_A(k) - \dot{I}_B(k)} = R_{AB}(k) + jX_{AB}(k) \quad (4.7)$$

$$\dot{Z}_{BC}(k) = \frac{\dot{V}_B(k) - \dot{V}_C(k)}{\dot{I}_B(k) - \dot{I}_C(k)} = R_{BC}(k) + jX_{BC}(k) \quad (4.8)$$

$$\dot{Z}_{CA}(k) = \frac{\dot{V}_C(k) - \dot{V}_A(k)}{\dot{I}_C(k) - \dot{I}_A(k)} = R_{CA}(k) + jX_{CA}(k) \quad (4.9)$$

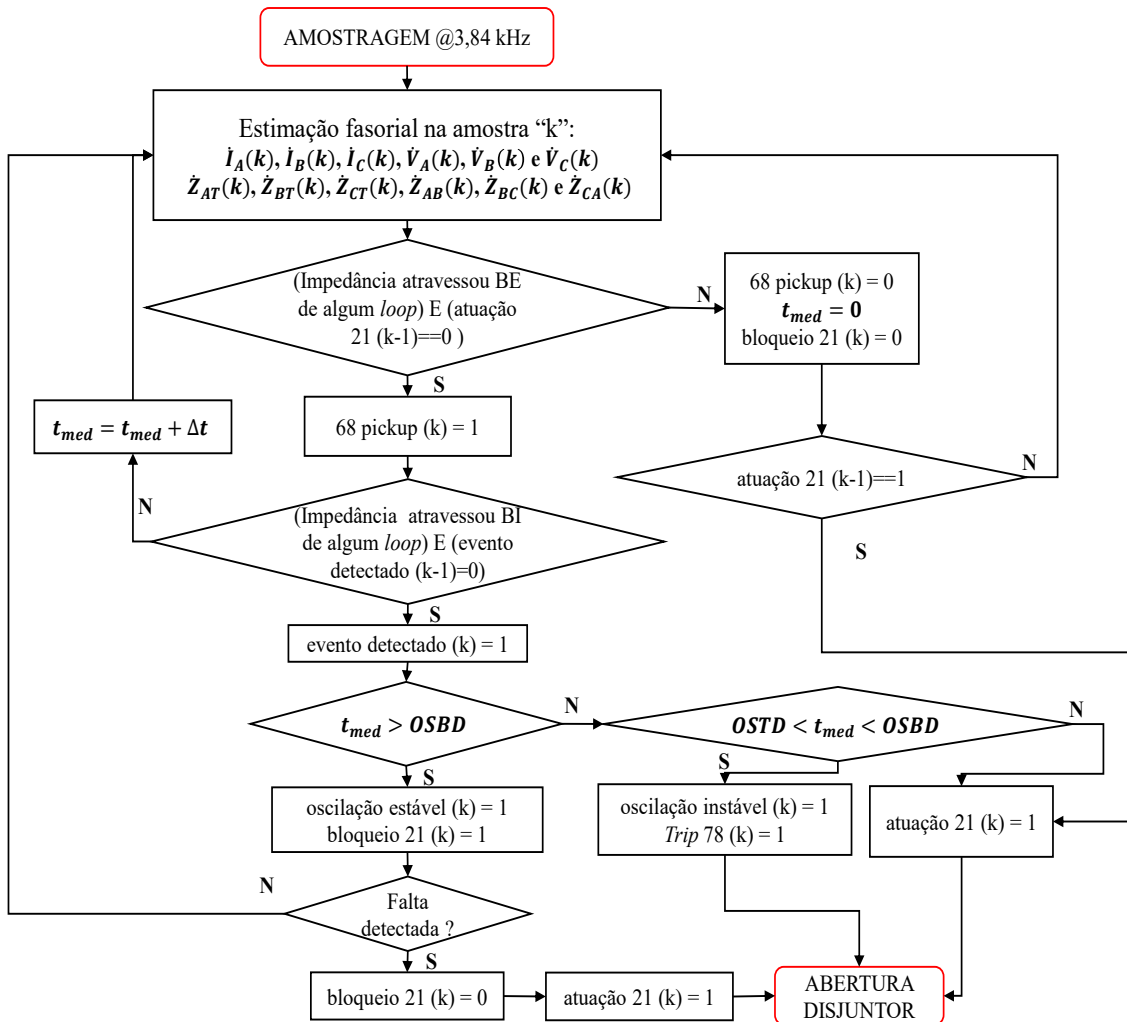


Figura 4.2 - Fluxograma do MCC implementado no MATLAB®.

O raio do *blinder* interno (BI) é definido como r'_{BI} e o do *blinder* externo (BE), r'_{BE} , tendo centro coincidente com o da zona 3, o qual é definido pelo par ordenado

(r_3, x_3) , onde r_3 e x_3 são respectivamente coordenadas de resistência (abscissa) e reatância (ordenada) no plano RX. Assim, para cada *loop* é feita a verificação se a trajetória da impedância cruzou o BE e posteriormente o BI. Tomando-se o *loop* AT como exemplo, tem-se as seguintes condições de verificação:

$$(R_{AT}(k) - r_3)^2 + (X_{AT}(k) - x_3)^2 < r_{BE}'^2, \quad \text{cruzamento pelo BE} \quad (4.10)$$

$$(R_{AT}(k) - r_3)^2 + (X_{AT}(k) - x_3)^2 < r_{BI}'^2, \quad \text{cruzamento pelo BI} \quad (4.11)$$

A detecção de faltas durante oscilações de potência, contemplada na Figura 4.2, não é originalmente realizada pelo MCC, sendo necessário algoritmo específico. No item a seguir é descrita a rotina utilizada para detecção de faltas simétricas e assimétricas durante oscilações de potência, a qual foi integrada ao MCC.

4.3 Detector de faltas simétricas e assimétricas durante oscilações de potência

A detecção de faltas simétricas durante oscilações de potência caracteriza-se como uma tarefa difícil para os algoritmos de proteção, principalmente para faltas trifásicas próximas ao centro elétrico. Isto ocorre porque as oscilações de potência possuem características similares às de faltas trifásicas, pois não contêm componentes de sequências negativa e zero, e situam-se na zona de operação do relé. É necessário que durante uma oscilação, caso haja uma falta, a função 68 faça o desbloqueio da função 21, permitindo sua atuação.

Para faltas assimétricas, a existência de componentes de sequência negativa e zero possibilita a rápida identificação da falta. Usualmente são utilizadas unidades de sobrecorrente de sequência negativa, em função desta estar presente em todas as faltas assimétricas com ou sem terra. Cita-se como exemplo, os relés comerciais SEL-411L (SCHWEITZER, 2015) e o NR PCS-902 (NARI, 2018), que apresentam esta metodologia para detecção. Os algoritmos para detecção de faltas trifásicas em relés comerciais geralmente não são descritos na íntegra. Nos relés supracitados, a variação da tensão do centro elétrico é utilizada para detecção.

O desenvolvimento de algoritmos para desbloqueio de faltas durante oscilações é um tema recorrente na literatura atual, haja vista a necessidade de se obter um desbloqueio rápido e assertivo. Além de possibilitar o desbloqueio para faltas simétricas e assimétricas, é requisito essencial aos algoritmos identificar se a falta é interna ou externa à linha, conforme algoritmo proposto no trabalho de (PATEL, 2020), que possibilita a detecção da direcionalidade de faltas durante oscilações de potência.

Em (LAZARO et al., 2017) tem-se um algoritmo que avalia o surgimento de assimetria no sinal instantâneo de corrente para detectar uma falta durante oscilações de potência. Neste, calcula-se o Coeficiente de Assimetria de Fisher (FAC), aplicado ao valor absoluto dos sinais de corrente das três fases. Percebe-se que o valor de FAC é reduzido durante oscilações de potência, no entanto, caso FAC seja superior ao limite predeterminado (FAC_{set}), em qualquer das três fases, tem-se a detecção da falta.

Em (PATEL et al., 2019) é apresentado um algoritmo que detecta faltas simétricas e assimétricas durante oscilações. A ideia central do método consiste em se calcular a derivada do sinal instantâneo de tensão, identificar os picos e então quantificar o número de amostras entre dois picos sucessivos. Percebe-se que durante oscilações de potência a derivada da tensão tem comportamento senoidal, o que possibilita um valor praticamente constante de amostras entre dois picos. No entanto, na ocorrência de uma falta, o transitório faz com que a derivada da tensão apresente dois picos sucessivos rapidamente, possibilitando a identificação da falta.

No trabalho de (HASHEMI, 2019) utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para estimar os fasores de tensão e corrente na frequência fundamental. Em seguida determina-se o módulo da admitância (Y) para cada fase. Já o índice de falta $F(Y)$ é obtido na frequência fundamental a partir da FFT de Y . O algoritmo baseia-se no fato de que $F(Y)$ é reduzido durante oscilações de potência, no entanto, após o início da falta obtêm-se altos valores para $F(Y)$ nesse período transitório. Caso $F(Y)$ seja maior que um limite predeterminado (Y_{th}), a falta é detectada.

Em (PATEL, 2019) tem-se um algoritmo que utiliza a técnica de autorregressão para estimar sinais futuros de corrente e tensão. Assim, obtém-se uma figura de Lissajous formada com amostras futuras e uma figura de Lissajous formada com amostras atuais. Percebe-se que durante oscilações de potência as figuras se sobrepõem, no entanto,

durante faltas, a figura de Lissajous futura é acentuadamente diferente da figura de Lissajous atual, sendo este o critério utilizado para detecção de faltas.

Em (CHATTERJEE, S.; ROY, B. K. S., 2020) é proposto um algoritmo que utiliza a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para calcular o produto entre admitância e potência ativa, utilizando-se Fasores de corrente e tensão estimados. A componente de sequência positiva é utilizada para calcular as variações de admitância e potência ativa, estabelecendo um índice de falta (FI). Percebe-se que FI é reduzido durante oscilações de potência e muito alto durante faltas, possibilitando detecção de faltas simétricas e assimétricas.

No trabalho de (MAHAMEDI, B; FLETCHER, J.E.; 2020) tem-se a proposição de um algoritmo detector de faltas assimétricas durante oscilações que não demanda configurações. Demonstra-se que durante faltas assimétricas a potência ativa trifásica instantânea começa a oscilar com o dobro da frequência fundamental do sistema, permanecendo assim até a eliminação da falta. Logo, o algoritmo estima a frequência da potência ativa trifásica instantânea utilizando-se um detector de passagem por zero, e verifica se a frequência obtida está entre 95% e 105% de 120 Hz, que é o dobro da frequência fundamental simulada no trabalho. Em caso afirmativo, o algoritmo avalia ainda os valores de potência ativa e da componente contínua, o que garante a detecção da falta e desbloqueio da função 21.

Vale destacar que em (ABB et al., 2008) é apresentada uma metodologia para identificação rápida de faltas simétricas e assimétricas durante oscilações de potência. Por se tratar de um conteúdo patentado, sua utilização para fins comerciais é restrita à empresa proprietária, ABB RESEARCH. Considerando-se que este trabalho não tem fins comerciais e que seu objetivo é avaliar o comportamento das funções de oscilação de potência, a filosofia utilizada para detecção é similar à supracitada, sendo realizadas adaptações do método.

O critério para detecção de faltas simétricas e assimétricas consiste no monitoramento da velocidade da impedância vista pelos seis *loops*. Se durante um ciclo a velocidade da impedância vista por todos os seis *loops* for acentuadamente inferior àquela de três ciclos anteriores ($3N_a$), uma falta simétrica é detectada. Neste trabalho

considerou-se o fator 0,1 para comparação das velocidades, o que representa um critério de 10%, obtido por (ABB et al., 2008) após simulações computacionais.

Após simulações realizadas neste trabalho constatou-se que o método para detecção de faltas simétricas pode ser capaz de detectar diversos tipos de faltas, desde que seja alterado o critério de monitoramento. Logo, basta considerar a redução de velocidade de qualquer um dos *loops*, diferente do critério original que requer a redução em todos os seis *loops*. A fundamentação desta alteração consiste no fato de que independentemente do tipo de falta, simétrica ou assimétrica, pelo menos um *loop* terá variação da velocidade da impedância. O fluxograma do algoritmo implementado é apresentado na Figura 4.3.

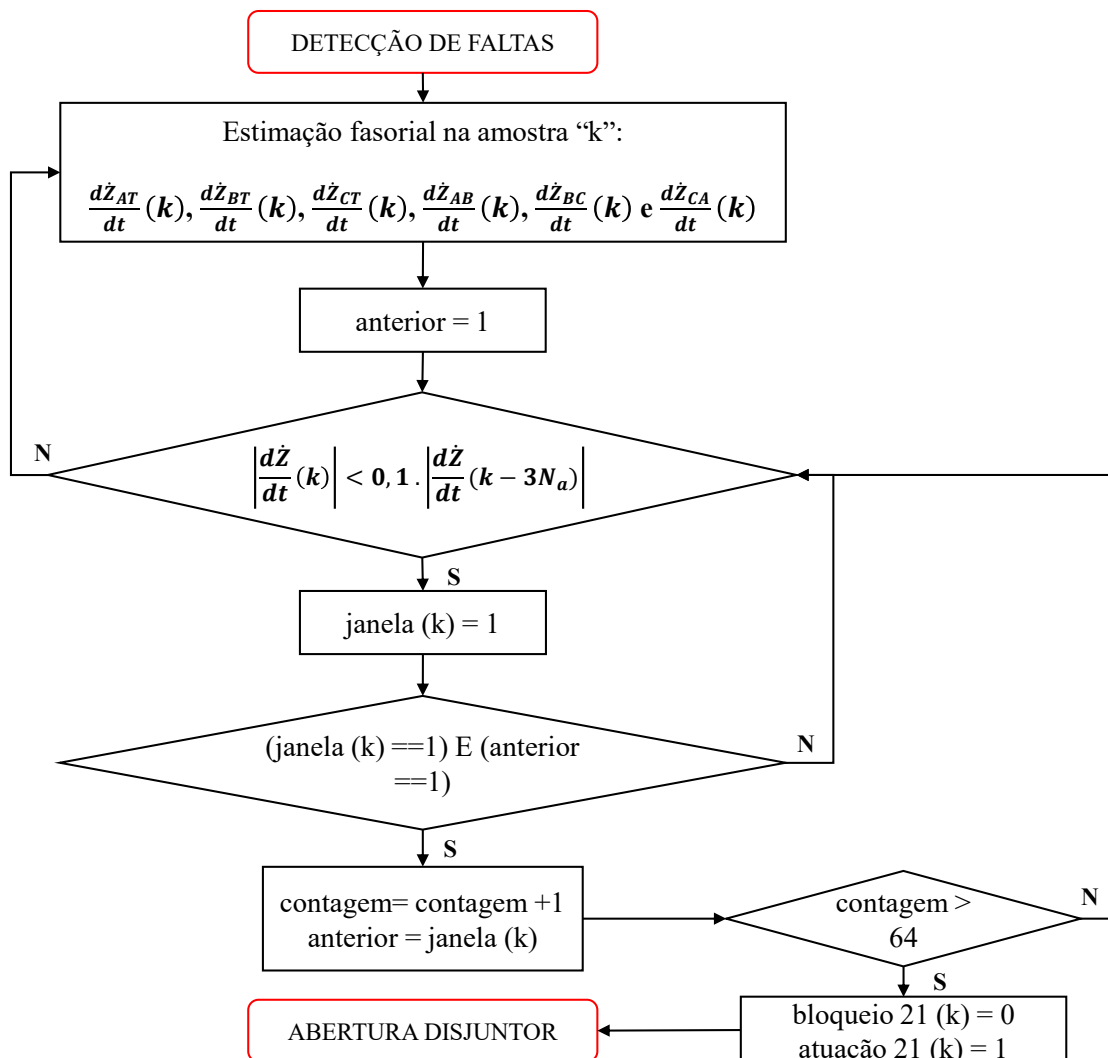


Figura 4.3 – Fluxograma do algoritmo implementado para detecção de faltas.

A velocidade da impedância estimada no instante “k”, em função do número de amostras de um ciclo ($N_a = 64$) e do passo de tempo adotado (Δt), é dada por:

$$\left| \frac{d\dot{Z}}{dt}(k) \right| = \frac{|\dot{Z}(k) - \dot{Z}(k - N_a)|}{N_a \Delta t} \quad (4.12)$$

A condição a ser atendida durante um ciclo para detecção de falta, tomando-se o *loop* AT como exemplo, é dada por:

$$\left| \frac{d\dot{Z}_{AT}}{dt}(k) \right| < 0,1 \cdot \left| \frac{d\dot{Z}_{AT}}{dt}(k - 3N_a) \right| \quad (4.13)$$

4.4 Método do duplo *blinder* (MDB)

Embora não tenha sido implementado computacionalmente neste trabalho, o Método do Duplo *Blinder* (MDB) consiste em uma versão modificada do MCC, mas que se fundamenta no mesmo princípio de detecção. Assim, são ajustados o *blinder* direito externo (BDE), o *blinder* direito interno (BDI), o *blinder* esquerdo interno (BEI) e o *blinder* esquerdo externo (BEE), como mostrado na Figura 4.4.

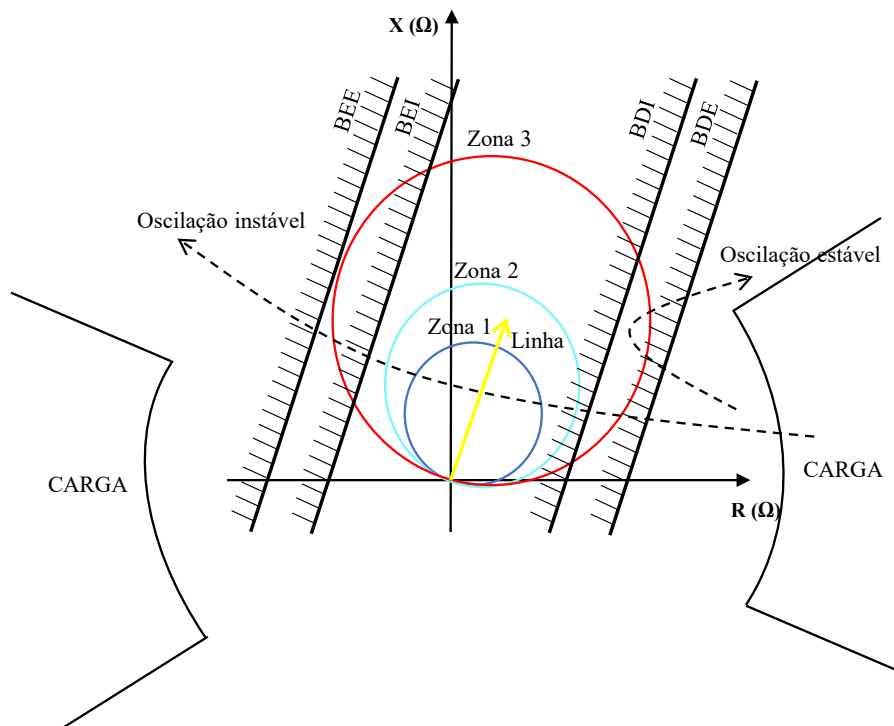


Figura 4.4 - Método Duplo *Blinder*.

De forma semelhante ao MCC, quando a impedância atravessa qualquer um dos *blindings* externos é disparado um temporizador, que se encerra quando a impedância atravessa algum *blinding* interno. A comparação do tempo gasto com os temporizadores ajustados OSBD e OSTD define se o evento é uma oscilação estável, instável ou curto-circuito.

Como este método baseia-se na velocidade da impedância, extensivos estudos são necessários para ajustes dos *blindings* e dos temporizadores (OSBD e OSTD). Dessa forma, as considerações feitas para o MCC são aplicáveis ao MDB, inclusive tendo a limitação de posicionamento dos *blindings* devido à região de carga e *load encroachment*.

O cálculo dos temporizadores OSBD e OSTD neste método pode ser realizado considerando-se o lugar geométrico da trajetória da impedância quando $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = 1$. São definidos os ângulos δ_α e δ_β , referente ao BDE e BDI, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.5.

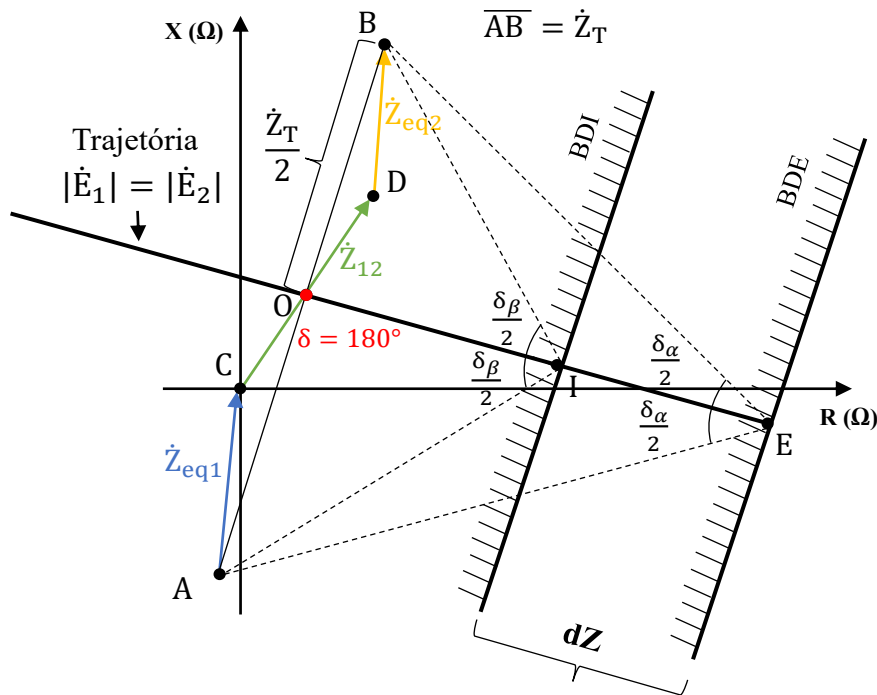


Figura 4.5 - Geometria utilizada para cálculo dos temporizadores OSBD e OSTD.

Analisando-se a Figura 4.5 e considerando que são conhecidas as distâncias no plano RX dos segmentos \overline{OI} e \overline{OE} , tem-se que (MOONEY, 2006) :

$$\delta_{\beta} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{|\dot{Z}_T|}{\frac{2}{OI}} \right) \quad (4.14)$$

$$\delta_{\alpha} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{|\dot{Z}_T|}{\frac{2}{OE}} \right) \quad (4.15)$$

$$OSBD = \frac{\Delta\delta}{2\pi f_{slip-estável}} = \frac{\delta_{\beta} - \delta_{\alpha}}{2\pi f_{slip-estável}} \quad (4.16)$$

$$OSTD = \frac{\Delta\delta}{2\pi f_{slip-instável}} = \frac{\delta_{\beta} - \delta_{\alpha}}{2\pi f_{slip-instável}} \quad (4.17)$$

Usualmente os temporizadores são dados em ciclos da frequência fundamental (f_0), calculados utilizando-se ângulos em graus. Adaptando-se (4.16) e (4.17) para esta definição, tem-se que (ALVES et al., 2018):

$$OSBD [ciclos] = \frac{(\delta_{\beta}^{\circ} - \delta_{\alpha}^{\circ}) \frac{\pi}{180}}{2\pi f_{slip-estável}} f_0 = \frac{(\delta_{\beta}^{\circ} - \delta_{\alpha}^{\circ}) f_0}{360 f_{slip-estável}} \quad (4.18)$$

$$OSTD [ciclos] = \frac{(\delta_{\beta}^{\circ} - \delta_{\alpha}^{\circ}) \frac{\pi}{180}}{2\pi f_{slip-instável}} f_0 = \frac{(\delta_{\beta}^{\circ} - \delta_{\alpha}^{\circ}) f_0}{360 f_{slip-instável}} \quad (4.19)$$

4.5 Método da Variação da Tensão do Centro Elétrico (MVTCE)

4.5.1 Tensão do centro elétrico (SCV)

O algoritmo MVTCE utiliza conceitos básicos referentes ao comportamento da tensão do centro elétrico, em inglês “*Swing Center Voltage (SCV)*”, para detecção de oscilações de potência, caracterizando-se como um método não dependente das impedâncias do sistema. Conforme já abordado preliminarmente no Capítulo 2, o centro elétrico (CE) estudado a partir do modelo de duas máquinas, é definido como o ponto do sistema quando $\delta=180^{\circ}$, cuja tensão fasorial é zero para este ângulo.

O sistema elétrico de duas máquinas utilizado para análise é apresentado na Figura 4.6 (BENMOUYAL et al., 2005).

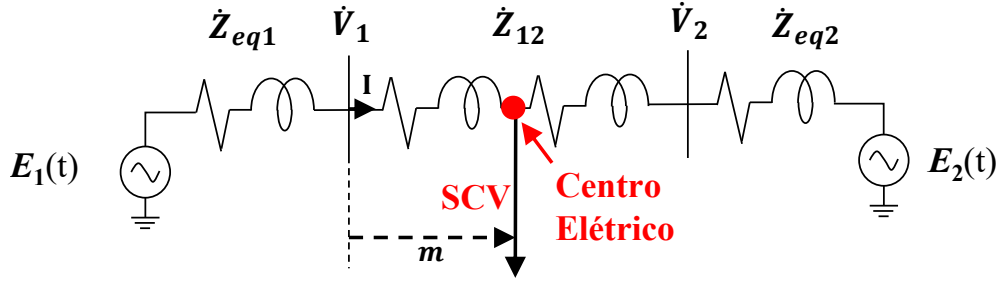


Figura 4.6 - Sistema de duas máquinas para obtenção de SCV (t).

As tensões deste sistema, para a fase A, são definidas como:

$$E_1(t) = \sqrt{2}E_{1ef} \text{sen}(\omega_0 t + \delta(t)) \quad (4.20)$$

$$E_2(t) = \sqrt{2}E_{2ef} \text{sen}(\omega_0 t) \quad (4.21)$$

Onde:

E_{1ef} é a tensão eficaz da fonte E_1 ;

E_{2ef} é a tensão eficaz da fonte E_2 ;

Utilizando o teorema da superposição e considerando o coeficiente m que representa a parcela da impedância da linha até o centro elétrico na Figura 4.6, tem-se que a tensão no centro elétrico, SCV (t) é dada por:

$$SCV(t) = V_{SCV_{E_1}}(t) + V_{SCV_{E_2}}(t) \quad (4.22)$$

$$V_{SCV_{E_1}}(t) = \frac{\dot{Z}_{eq2} + (1 - m)\dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}} \sqrt{2}E_{1ef} \text{sen}(\omega_0 t + \delta(t)) \quad (4.23)$$

$$V_{SCV_{E_2}}(t) = \frac{\dot{Z}_{eq1} + m\dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}} \sqrt{2}E_{2ef} \text{sen}(\omega_0 t) \quad (4.24)$$

Onde:

$V_{SCV_{E_1}}(t)$ é a contribuição de tensão instantânea no centro elétrico devido à fonte E_1 ;

$V_{SCV_{E_2}}(t)$ é a contribuição de tensão instantânea no centro elétrico devido à fonte E_2 ;

Quando $\delta(t) = 180^\circ$, utilizando a definição de CE, tem-se que:

$$\frac{\dot{Z}_{eq1} + m\dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}} \sqrt{2}E_{2ef} = \frac{\dot{Z}_{eq2} + (1-m)\dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}} \sqrt{2}E_{1ef} \quad (4.25)$$

Isolando o coeficiente m em (4.25), e considerando o caso particular de $E_{1ef} = E_{2ef}$, tem-se que:

$$m = \frac{\dot{Z}_{eq2} + \dot{Z}_{12} - \dot{Z}_{eq1}}{2\dot{Z}_{12}} \quad (4.26)$$

Substituindo-se m em (4.23) e (4.24), obtém-se:

$$SCV(t) = \sqrt{2} \frac{E_{1ef}}{2} [\text{sen}(\omega_0 t + \delta(t)) + \text{sen}(\omega_0 t)] \quad (4.27)$$

Utilizando-se as variáveis x , y , a e b , apenas para desenvolvimento de equações trigonométricas, tem-se que:

$$SCV(t) = \sqrt{2} \frac{E_{1ef}}{2} [\text{sen}(x) + \text{sen}(y)] \quad (4.28)$$

$$x = \omega_0 t + \delta(t) = a + b \quad (4.29)$$

$$y = \omega_0 t = a - b \quad (4.30)$$

Utilizando-se formulações trigonométricas de arcos, tem-se que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sen}(a + b) = \text{sen}(a) \cos(b) + \text{sen}(b) \cos(a) \end{array} \right. \quad (4.31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sen}(a - b) = \text{sen}(a) \cos(b) - \text{sen}(b) \cos(a) \end{array} \right. \quad (4.32)$$

$$\text{sen}(a + b) + \text{sen}(a - b) = 2 \text{sen}(a) \cos(b) \quad (4.33)$$

$$\text{sen}(x) + \text{sen}(y) = 2 \text{sen}(a) \cos(b) \quad (4.34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{x + y}{2} \end{array} \right. \quad (4.35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b = \frac{x - y}{2} \end{array} \right. \quad (4.36)$$

Substituindo-se (4.35) e (4.36) em (4.34), tem-se que:

$$\text{sen}(x) + \text{sen}(y) = 2 \text{sen}\left(\frac{x + y}{2}\right) \cos\left(\frac{x - y}{2}\right) \quad (4.37)$$

Substituindo-se (4.29) e (4.30) em (4.37), e (4.37) em (4.28), tem-se a expressão analítica da tensão do centro elétrico durante uma oscilação de potência, dada por:

$$SCV(t) = \sqrt{2}E_{1ef} \operatorname{sen}\left(\omega_0 t + \frac{\delta(t)}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta(t)}{2}\right) \quad (4.38)$$

O circuito da Figura 4.7 foi simulado no ATP para obtenção da tensão SCV, sendo comparada com àquela obtida a partir da implementação de (4.38) no MATLAB®.

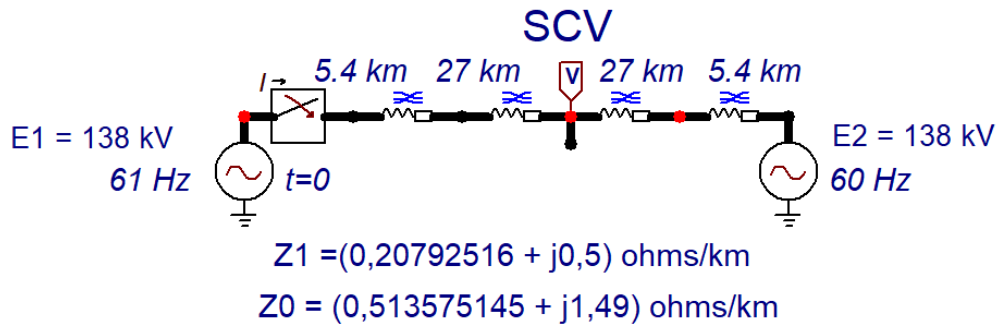


Figura 4.7 - Sistema simulado no ATP para obtenção de SCV.

Destaca-se em (4.38) que a tensão SCV independe das impedâncias da linha ou dos equivalentes, variando apenas em função do ângulo de deslizamento $\delta(t)$ e da tensão eficaz E_{1ef} . Esta constatação torna a variável SCV adequada para detecção de oscilações de potência, pois durante regime de carga ou curtos-circuitos a SCV permanece constante, mas para oscilações varia continuamente, conforme (4.38). A sobreposição das curvas observada na Figura 4.8 reforça a validade da solução apresentada em (4.38).

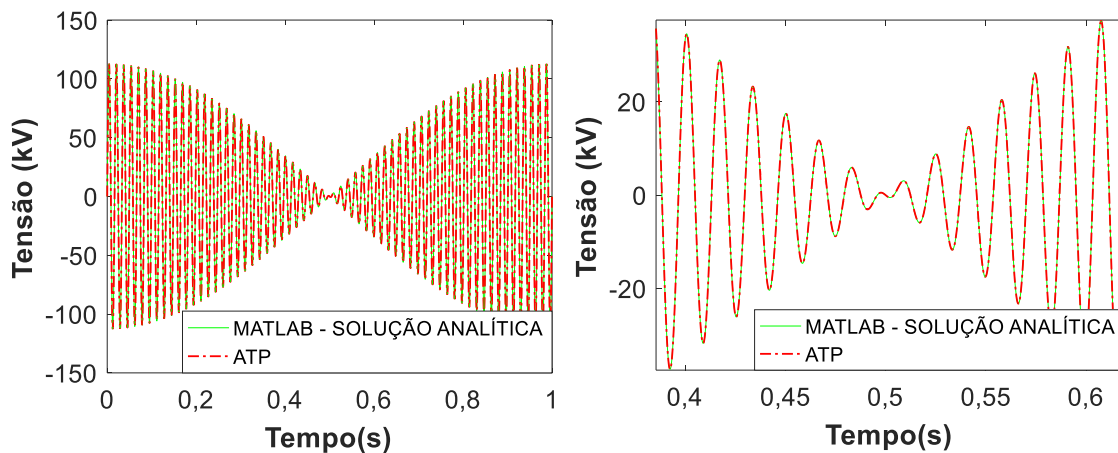


Figura 4.8 – SCV para 1 período de oscilação (a) e detalhamento em $t = 0,5 \text{ s}$ (b) obtidos no MATLAB® e ATP.

Vale destacar que foram realizadas diversas simulações alterando-se as impedâncias do circuito, mas mantendo-se a ponta de prova no centro elétrico, o que resultou na mesma forma de onda da Figura 4.8. Assim, ratifica-se que a SCV varia em função do ângulo $\delta(t)$ e depende apenas das tensões dos equivalentes. O diagrama fasorial do sistema da Figura 4.6 é apresentado na Figura 4.9, o qual possibilita avaliar vetorialmente o comportamento de SCV e definir aproximações.

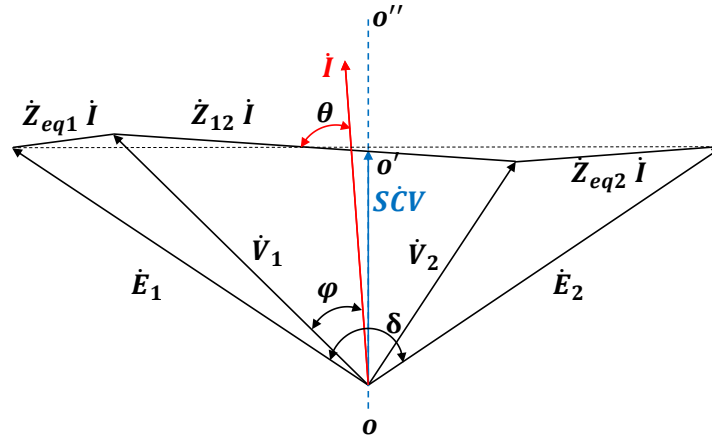


Figura 4.9 - Diagrama fasorial do sistema de duas máquinas (IEEE PSRC WG D6, 2005).

Considerando o caso particular de $E_{1_{ef}} = E_{2_{ef}} = |\dot{E}_1|$ e desprezando-se resistências, tem-se que o fasor de tensão do centro elétrico é dado por (IEEE PSRC WG D6, 2005):

$$SCV = \dot{E}_1 \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (4.39)$$

Dado que a oscilação de potência é um fenômeno equilibrado, tendo apenas componentes de sequência positiva, (4.39) passa a ser dada por:

$$SCV^{(1)} = \dot{E}_1^{(1)} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (4.40)$$

A derivada primeira de $SCV^{(1)}$, principal grandeza utilizada no algoritmo para detecção, neste caso particular é dada analiticamente por:

$$\frac{d(SCV^{(1)})}{dt} = -\frac{\dot{E}_1^{(1)}}{2} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \frac{d\delta}{dt} \quad (4.41)$$

Uma aproximação bastante utilizada nos algoritmos MVTCE considera uma estimativa local para $S\dot{C}V^{(1)}$, considerando-se a tensão da barra 1 e o ângulo φ entre tensão e corrente medidos pelo relé, dada por (4.42). A realização desta simplificação, segundo (BENMOUYAL et al., 2005), não interfere no funcionamento do método MVTCE, pois a tomada de decisão é realizada com base na taxa de variação de $S\dot{C}V^{(1)}$, e não em seu módulo.

$$S\dot{C}V^{(1)} \approx |\dot{V}_1| \cos(\varphi) \quad (4.42)$$

Utilizando apenas parâmetros de sequência positiva e as potências ativa (P) e aparente (S), conforme (BENMOUYAL et al., 2005), resulta que:

$$S\dot{C}V^{(1)} = |\dot{V}_1^{(1)}| \cos(\varphi) = \frac{P}{|I^{(1)}|} = \frac{\text{real}(S)}{|I^{(1)}|} = \frac{\text{real}(\dot{V}_1^{(1)} i^{(1)*})}{|I^{(1)}|} \quad (4.43)$$

Utilizando-se a tensão monofásica base ($V_{BASE-FT}$) para o cálculo de $S\dot{C}V^{(1)}$ em pu, tem-se que:

$$S\dot{C}V^{(1)} = \frac{\text{real}(\dot{V}_1^{(1)} i^{(1)*})}{|I^{(1)}| V_{BASE-FT}} \quad (4.44)$$

Em (4.44) tem-se a expressão implementada no MATLAB[®] para cálculo de $S\dot{C}V^{(1)}$, dependendo apenas da tensão e corrente de sequência positiva. Logo, no início da rotina, após estimação dos fasores das tensões monofásicas \dot{V}_A , \dot{V}_B e \dot{V}_C , utiliza-se a matriz de transformação de componentes simétricas, obtendo então os parâmetros de sequência positiva necessários: $\dot{V}_1^{(1)}$ e $i^{(1)}$.

4.5.2 Implementação computacional do MVTCE

O algoritmo MVTCE é utilizado atualmente pelo relé SEL-411L, sendo a lógica de funcionamento detalhada em seu manual. Neste trabalho foram implementados blocos lógicos específicos do algoritmo do relé supracitado, tendo em vista a realização de simplificações.

Embora o algoritmo não tenha sido implementado na íntegra, as lógicas utilizadas já possibilitam a simulação de diversas oscilações de potência, sendo disponível verificação de bloqueio por oscilação de potência e desbloqueio para falta trifásica.

O funcionamento geral deste método é apresentado na Figura 4.10, contemplando cinco blocos lógicos descritos em (SCHWEITZER, 2008), sendo eles: *Swing Center Voltage Slope Detector* (SD), *Swing Signature Detector* (SSD), *Reset Conditions* (RST), *Dependable OSB Detector* (DOSB) e *Three-Phase Fault Detector* (DTF). Os blocos SSD e DOSB não foram implementados neste trabalho.

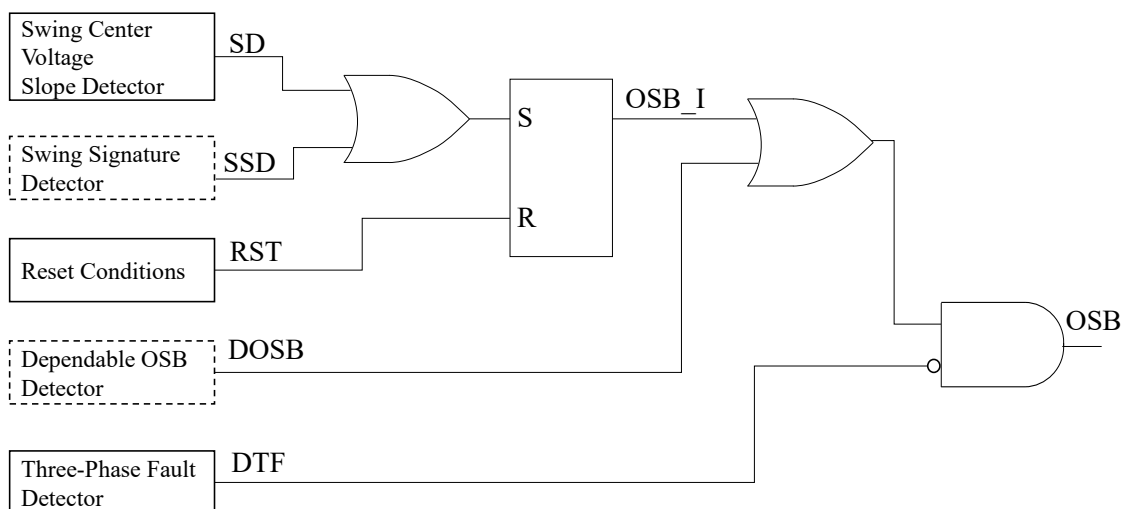


Figura 4.10 - Diagrama lógico do método MVTCE (adaptado de SCHWEITZER, 2008).

A detecção de oscilações de potência neste método consiste em se monitorar a variação de $\dot{S}CV^{(1)}$, por meio do cálculo de derivadas de primeira e segunda ordem, a partir dos fasores estimados. Na Figura 4.11 são apresentadas as derivadas utilizadas no método.

O bloco *Sloper Detector* compara a derivada primeira da tensão do centro elétrico $\left(\frac{d(S\dot{C}V^{(1)})}{dt}\right)$ com valores definidos internamente no algoritmo, não disponíveis para ajuste. Caso estes limites sejam ultrapassados, uma oscilação de potência é detectada, pois em condições de carga $\dot{S}CV^{(1)}$ permanece constante, tendo primeira derivada próximo de zero. Este bloco lógico possibilita a detecção da maioria das oscilações de potência.

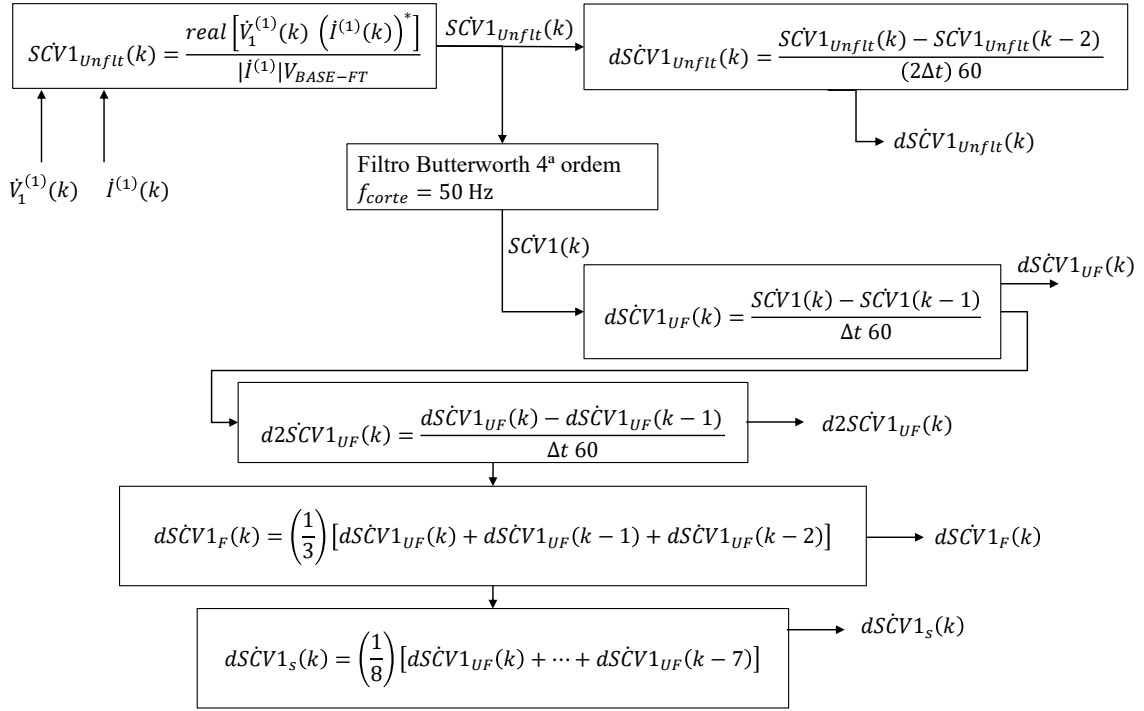


Figura 4.11 - Cálculo de derivadas (em pu/ciclo) implementado no MATLAB® (adaptado de SCHWEITZER, 2008).

Os principais limites internos para a derivada primeira são obtidos a partir da definição da faixa de frequência que o algoritmo terá atuação. Conforme (SCHWEITZER, 2008), é definida a faixa de 0,1-7 Hz, utilizando-se um dado fator de segurança (FS). O limite máximo, considerando $f_{slip} = 7 \text{ Hz}$, é dado por:

$$\text{Máx} \left| \frac{d(SCV^{(1)})}{dt} \right| = (FS_{\text{máx}}) \cdot \frac{\dot{E}_1^{(1)}}{2} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \frac{d\delta}{dt} = (1,5) \cdot \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) 2\pi 7 \quad (4.45)$$

$$\text{Máx} \left| \frac{d(SCV^{(1)})}{dt} \right| = 0,55 \frac{V(pu)}{\text{ciclos}} \quad (4.46)$$

Por sua vez, o limite mínimo considerando $f_{slip} = 0,1 \text{ Hz}$ é dado por:

$$\text{Mín} \left| \frac{d(SCV^{(1)})}{dt} \right| = (FS_{\text{mín}}) \cdot \frac{\dot{E}_1^{(1)}}{2} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \frac{d\delta}{dt} = (0,5) \cdot \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) 2\pi 0,1 \quad (4.47)$$

$$\text{Mín} \left| \frac{d(SCV^{(1)})}{dt} \right| = 0,0026 \frac{V(pu)}{\text{ciclos}} \quad (4.48)$$

A lógica implementada no MATLAB® para o bloco *Slope Detector* é apresentada na Figura 4.12. Em todas as lógicas a seguir, os blocos quadrados com números em seu

interior consistem de temporizadores, sendo o número superior esquerdo referente ao *pickup* (*on-delay*) e o inferior direito *dropout* (*off-delay*), ambos dados em ciclos (*cyc*) de 60 Hz.

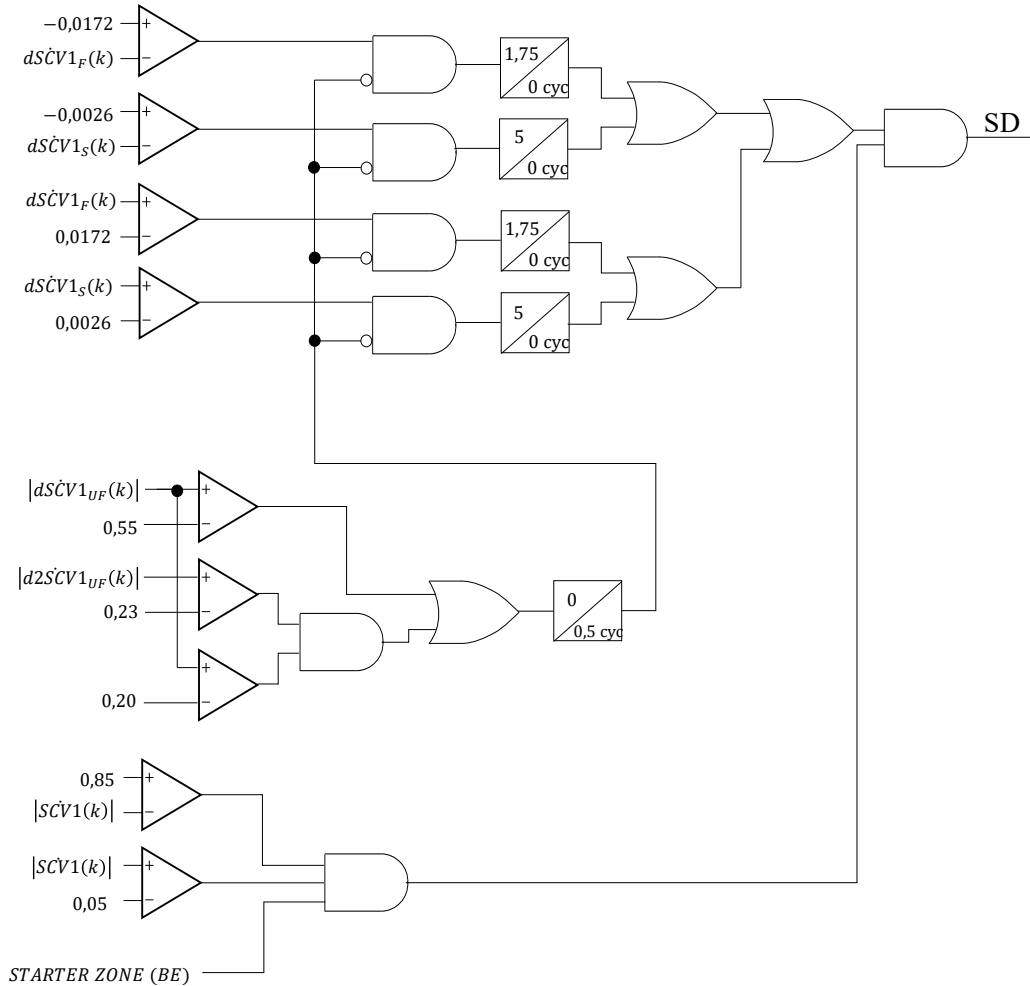


Figura 4.12 – Lógica simplificada do bloco *Slope Detector* (adaptado de SCHWEITZER, 2008).

O método MTVCE requer a utilização de *blindings*, porém com objetivo diferente do MCC. O *blinder* externo é denominado *starter zone*, e delimita a região em que o algoritmo terá atuação (Figura 4.12). O *blinder* interno é destinado ao *trip* da função 78, quando em oscilações instáveis, usualmente definido para $\delta = 120^\circ$, semelhante ao MCC.

O bloco *Swing Signature*, é complementar ao *Slope Detector*, e realiza a distinção entre faltas e oscilações de potência, utilizando-se valores das derivadas armazenados na memória referente a três ciclos anteriores, em conjunto com os elementos detectores de falta da função 21. A lógica completa deste bloco é detalhada em (SCHWEITZER, 2008).

O bloco *Reset Conditions* tem por objetivo remover o bloqueio por oscilação de potência em condições que o mesmo não é mais necessário, como por exemplo quando a impedância está fora da região Starter Zone, $SCV^{(1)}$ acima do limite máximo de 0,85 pu, ou disjuntor aberto. A lógica implementada deste bloco no MATLAB[®] é apresentada na Figura 4.13.

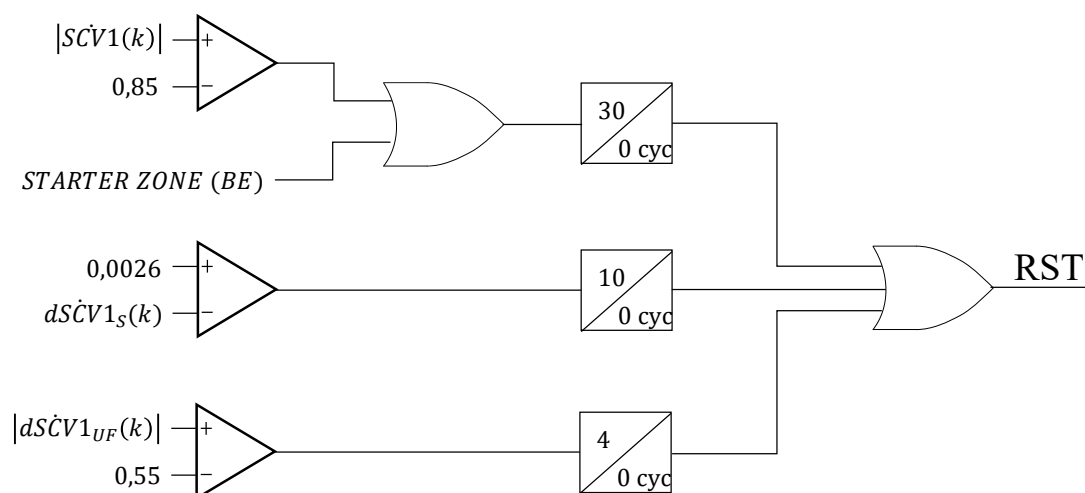


Figura 4.13 - Lógica simplificada do bloco *Reset Conditions* (adaptado de SCHWEITZER, 2008).

O bloco lógico *Dependable OSB Detector* tem por objetivo emitir um sinal de bloqueio temporário em casos específicos que os blocos *Slope Detector* e *Swing Signature* eventualmente possam demorar na detecção. Um exemplo típico consiste na ocorrência de oscilações rápidas após faltas reversas ou diretas em regiões do sistema marginalmente estáveis, propiciando que relés de distância de linhas adjacentes percebam impedâncias em suas zonas de atuação. A lógica deste bloco, por ser dedicada aos casos de oscilações específicas, é extensa e depende de outras funções de proteção, sendo detalhado em (SCHWEITZER, 2008).

A detecção de faltas trifásicas no MVTCE é feita por meio do bloco *Three-Phase Fault Detector*, posto que para faltas assimétricas é utilizada uma função sobrecorrente de sequência negativa (67Q). Se uma falta trifásica ocorre durante uma oscilação de potência, $SCV^{(1)}$ que estava variando em função de δ , é submetida à uma alteração instantânea, gerando valores elevados na derivada segunda. A lógica implementada para este bloco no MATLAB[®] é apresentada na Figura 4.14.

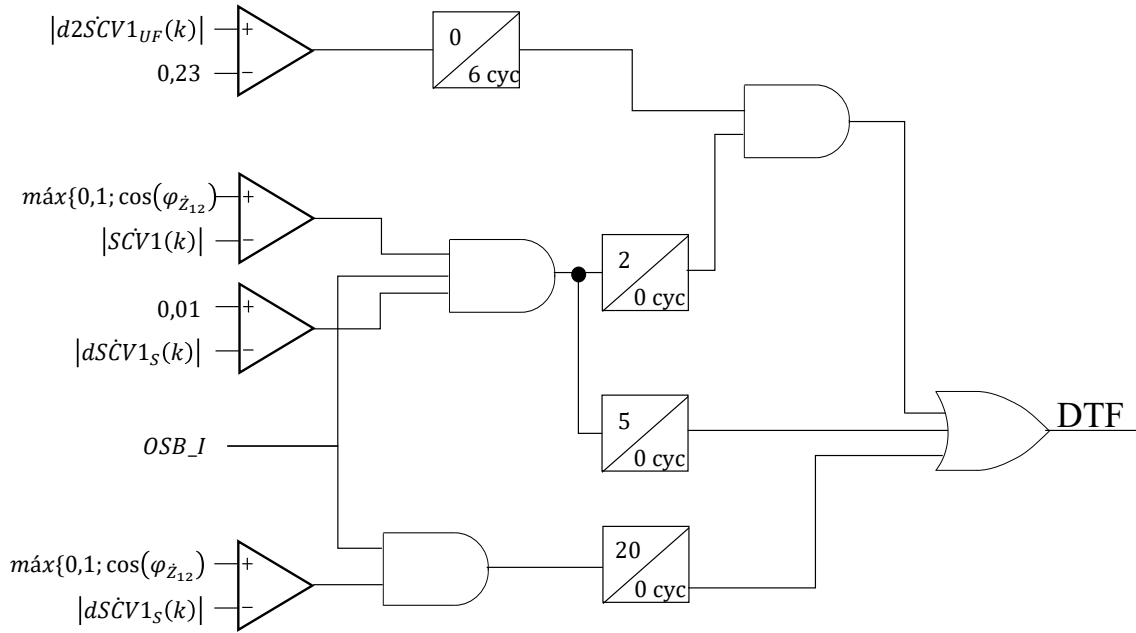


Figura 4.14 - Lógica simplificada do bloco *Three-Phase Fault Detector* (adaptado de SCHWEITZER, 2008).

A utilização dos temporizadores para garantia de segurança na detecção de falta trifásica durante oscilação de potência faz com que esta seja realizada nos tempos de 2, 5 ou 20 ciclos. Conforme constatado no trabalho de (ALVES et al., 2018), nos casos simulados na rede elétrica Acre-Rondônia, o desbloqueio das zonas 1 e 2 da função 21 utilizando este método ocorreu após 83,35 ms, para falta trifásica. Este fato é importante de ser considerado, pois esta condição excepcional (falta trifásica durante oscilação de potência), pode levar à abertura dos disjuntores da linha em tempo superior a 100 ms, que é o limite regulatório atualmente definido no SIN para eliminação de faltas sólidas e sem ocorrência de falha disjuntor (ONS, 2019).

5 Resultados e discussões

5.1 Considerações iniciais

A caracterização das oscilações de potência apresentada no Capítulo 2 contribuiu fundamentalmente para equacionamento dos modelos descritos no Capítulo 3, e para o entendimento dos algoritmos do Capítulo 4, tendo em vista a utilização de conceitos básicos relacionados às oscilações do tipo estável e instável.

Em síntese, foram equacionados dois modelos, sendo eles o sistema de duas máquinas, juntamente com as parametrizações e soluções numéricas pertinentes, e o modelo de uma máquina, que possibilita criação de trajetórias lineares editáveis no plano RX, a partir dos pontos definidos e da velocidade da impedância. Os modelos supracitados têm como principal produto a geração de sinais instantâneos trifásicos, usualmente conhecidos como oscilografias. Estas oscilografias contemplando oscilações de potência são destinadas a testes das funções 68-78, tanto em ambiente computacional, quanto em relés de proteção físicos.

Os resultados descritos neste capítulo contemplam a aplicação dos modelos descritos para geração de oscilografias parametrizadas, em conjunto com os algoritmos MCC e MVTCE, responsáveis pela leitura dos sinais gerados e pela tomada de decisão, conforme ilustrado na Figura 5.1.

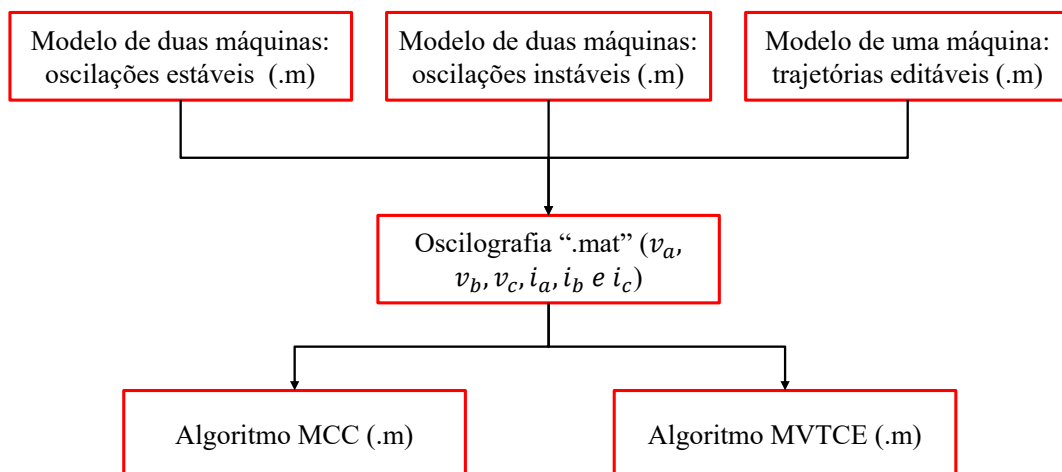


Figura 5.1 Metodologia para obtenção dos resultados.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo geral estratificado dos 110 casos simulados, contemplando a aplicação do modelo de duas máquinas e do modelo de uma máquina.

Tabela 2 – Resumo geral dos 110 casos simulados.

Aplicação do modelo de duas máquinas	Quantidade de casos simulados
Oscilações de potência estáveis sem ocorrência de faltas	6
Faltas simétricas durante oscilações de potência estáveis	18
Faltas assimétricas durante oscilações de potência estáveis	21
Oscilações de potência instáveis	16
Faltas simétricas e assimétricas sem oscilação de potência	27
Aplicação do modelo de uma máquina	Quantidade de casos simulados
Oscilações de potência estáveis com trajetórias editáveis	11
Oscilações de potência instáveis com trajetórias editáveis	11

Vale destacar que nos algoritmos implementados foram realizadas simplificações, uma vez que não se dispõem neste trabalho de todas informações provenientes de outras funções de proteção, como por exemplo, a 21. Logo, o comportamento obtido dos algoritmos MCC e MVTCE nos resultados a seguir pode diferir ligeiramente se reproduzido em relés físicos, cujos algoritmos podem não ser acessíveis.

5.2 Aplicação do modelo de duas máquinas

Os parâmetros do modelo de duas máquinas utilizado nas simulações são apresentados na Tabela 3, contemplando um sistema predominantemente indutivo.

Tabela 3 – Parâmetros do sistema de duas máquinas e ajustes.

Parâmetros	Valores
Ajustes das zonas (pu)	$Z1 = 0,8$, $Z2 = 1,2$ e $Z3 = 1,8$ (com o mesmo ângulo da LT)
Ajustes dos <i>blindings</i> (pu)	$BI = 1,1 \times Z3$ e $BE = 1,7 \times Z3$
Impedâncias de sequência positiva e zero da LT (Z_{BASE})	$Z_{LT}^{(1)} = 1,1227959 + j27 \Omega$ $Z_{LT}^{(0)} = 2,7733058 + j80,46 \Omega$
Impedâncias dos equivalentes	$Z_{eq}^{(1)} = 0,1 \times Z_{LT}^{(1)}$ $Z_{eq}^{(0)} = 0,1 \times Z_{LT}^{(0)}$
Tensões de linha rms das fontes E_1 e E_2	$E_1 = 138 \text{ kV}$ $E_2 = 138 \text{ kV}$
Temporizadores do MCC	OSBD = 6 ciclos e OSTD = 3 ciclos.

5.2.1 Oscilações de potência estáveis sem ocorrência de faltas

A parametrização $(\delta_0, t_0, \delta_{m\acute{a}x}, t_{osc}, t_{final})$ apresentada na Figura 3.10 possibilita a geração de oscilações de potência estáveis, pois após o deslize de ângulo a fonte E_1 retorna à condição de carga, considerada como a mesma da condição inicial. Vale destacar, contudo, que o ângulo $\delta_{m\acute{a}x}$ deve ser obtido por meio de estudos de estabilidade eletromecânica, sendo usual no máximo 120° para oscilações estáveis. Caso contrário, a utilização do modelo pode não representar algo fisicamente realizável, dado que após 120° o sistema tende à perda de sincronismo, mas o modelo possibilita o retorno à condição de carga.

Utilizando-se (2.54), que descreve a trajetória teórica da impedância, é possível verificar que os *blindings* descritos na Tabela 3 estão situados nos ângulos $\delta_\alpha = 44^\circ$ e $\delta_\beta = 67^\circ$. A metodologia prática para obtenção destes ângulos consiste em se plotar graficamente os círculos dos *blindings* interno e externo, e arbitrar inicialmente um ângulo em (2.54), verificando-se a trajetória da impedância estimada. Logo, incrementando-se sucessivamente esse ângulo em (2.54), obtém-se os valores de δ_α e δ_β que proporcionam a aproximação entre a trajetória e o *blinding* externo e interno, respectivamente. Contudo, outra forma possível de obter estes ângulos é utilizando-se (4.14) e (4.15).

Considerando-se arbitrariamente o ajuste OSBD=6 ciclos, tem-se que a frequência máxima para oscilações estáveis é dada por:

$$f_{slip-est\acute{a}vel} = \frac{(\delta_\beta^\circ - \delta_\alpha^\circ) f_0}{360 OSBD} = \frac{(67 - 44)60}{360 \cdot 6} = 0,638 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

De posse desta frequência foram realizadas simulações considerando $\delta_0 = 10^\circ$, $\delta_{m\acute{a}x} = 110^\circ$ e $t_0 = 0,5$ s, conforme formulação descrita de (3.29) a (3.33). Os resultados são apresentados na Tabela 4, constatando-se funcionamento correto dos dois métodos implementados, ou seja, atuação da função 68 bloqueando a 21. O sinal denominado *pickup* refere-se ao instante de partida de ambos os métodos, momento em que a trajetória da impedância cruza o *blinding* externo.

Para cada caso simulado são gerados os sinais instantâneos, fasores corrente e tensão, plano RX, velocidade de impedância, *log* de eventos dos métodos MCC e MVTCE, tensão do centro elétrico e sua derivada.

Tabela 4 – Casos simulados para oscilações estáveis sem ocorrência de faltas.

CASO	$t_{osc}(s)$	$t_{final}(s)$	$f_{stip}(Hz)$	Instante 68 <i>Pickup</i> (s)	Instante Bloqueio 21 (s)		Funcionamento correto	
					MCC	MVTCE	MCC	MVTCE
1	3	4	0,185	1,023	1,365	1,374	SIM	SIM
2	2,5	3,5	0,222	0,940	1,222	1,230	SIM	SIM
3	2	3	0,278	0,852	1,079	1,086	SIM	SIM
4	1,5	2,5	0,370	0,766	0,937	0,943	SIM	SIM
5	1	2	0,556	0,680	0,794	0,799	SIM	SIM
6	0,88	1,88	0,631	0,660	0,760	0,764	SIM	SIM

A fim de exemplificar o conjunto de resultados gerados para cada caso, são apresentadas a seguir as análises e informações pertinentes à simulação do caso 4. Na Figura 5.2 tem-se a trajetória da impedância vista pelo *loop* Z_{AT} para o caso 4. Como pode ser observado, a trajetória teórica, de $\delta_0 = 10^\circ$ à $\delta_{máx} = 110^\circ$ situa-se no meio das trajetórias de aceleração e desaceleração estimadas, aproximando-se quando em ângulos maiores.

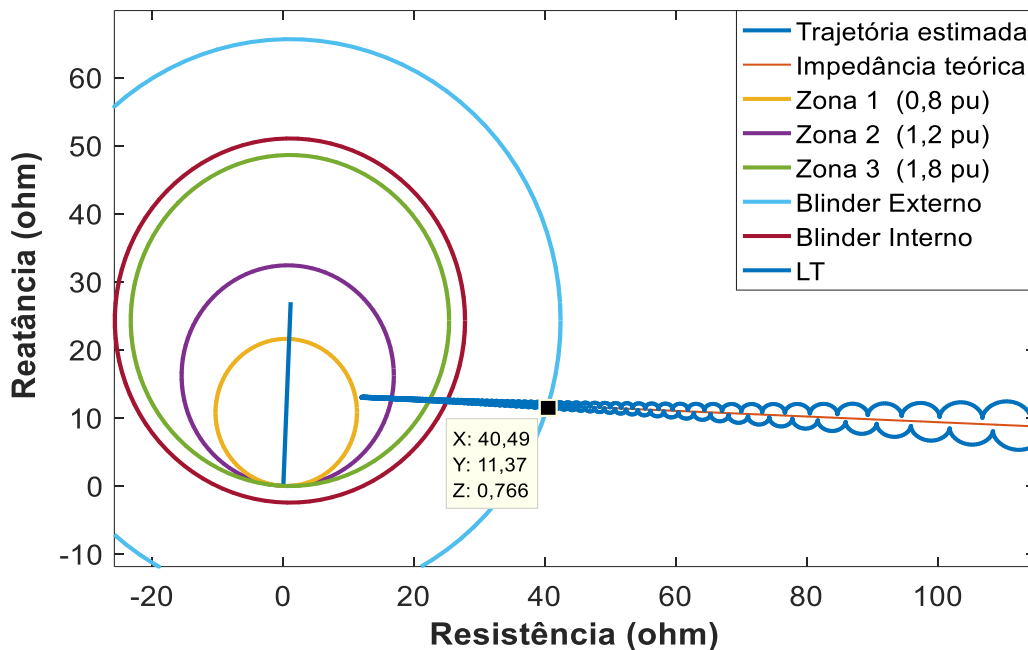


Figura 5.2 - Trajetória vista pelo *loop* Z_{AT} para o caso 4 (*pickup* 68 em 0,7656 s), cujas coordenadas X, Y e Z referem-se respectivamente às grandezas: resistência, reatância e tempo.

O posicionamento do *blinder* interno não pode ser realizado em $\delta = 120^\circ$, pois neste ângulo já se encontra a zona 2. Considerando que o *blinder* interno deve cobrir a última zona de proteção, seu posicionamento ficou definido em $\delta_\beta = 67^\circ$.

Os sinais instantâneos de corrente e tensão gerados para o caso 4 são apresentados na Figura 5.3. Em $t = 0,5$ s verifica-se o início da aceleração, aumentando-se o ângulo de deslizamento e por sua vez a potência escoada. Assim, constata-se que durante uma oscilação de potência estável, cujo deslizamento pode durar alguns segundos, os condutores da linha ficam submetidos a sobrecorrentes suficientemente altas, o que pode levar à ocorrência de catenárias excessivas. Já para a tensão, nota-se uma ligeira redução quando ocorre $\delta_{m\acute{a}x}$, fato que contribui para diminuição da impedância vista pelo relé.

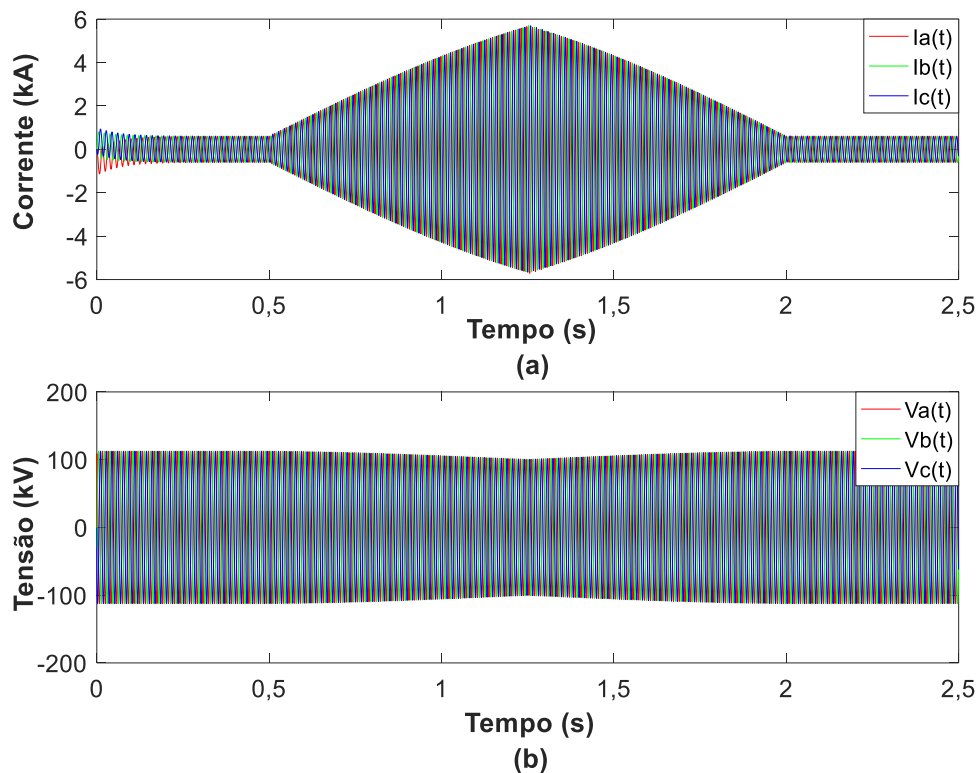


Figura 5.3 - Sinais instantâneos gerados de corrente (a) e tensão (b) para o caso 4.

O *log* de eventos das funções 68-78 referente ao MCC é apresentado na Figura 5.4. Comparando-o com a trajetória da Figura 5.2 é possível confirmar adequadamente que o bloqueio permanece durante toda a oscilação, iniciando-se após passagem pelo *blinder* interno (BI) e finalizando com a saída pelo *blinder* externo (BE), não sendo constatada atuação por 21.

O temporizador denominado *timer*, pela filosofia do método, iniciou-se no *pickup* e encerrou-se quando da passagem pelo BI. Os sinais utilizados neste *log* de eventos são aqueles contidos no fluxograma da função, já apresentado no capítulo 4.

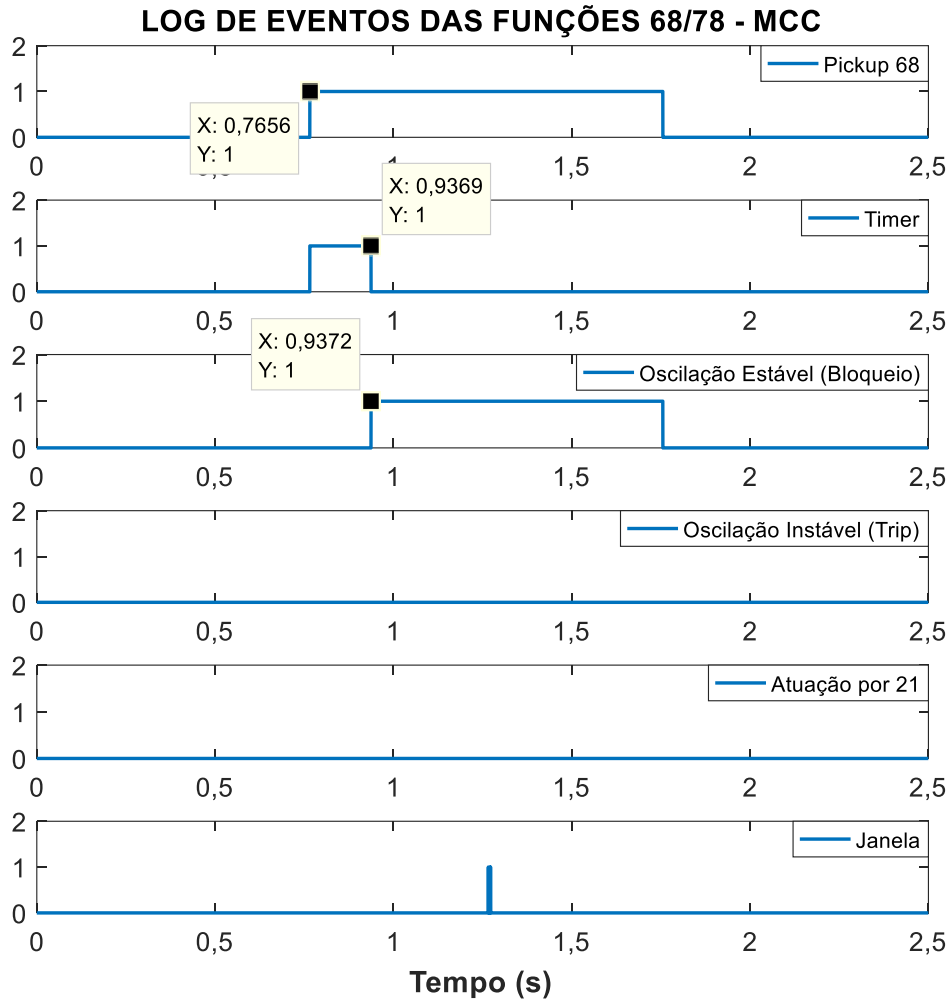


Figura 5.4 - Log de eventos MCC para o caso 4.

A detecção pelo MVTCE ocorreu em todos os casos em instantes próximos ao MCC. Tomando-se como exemplo ainda o caso 4, na Figura 5.5 são apresentadas a tensão do centro elétrico $S\dot{C}V^{(1)}$ e o módulo sua derivada $|dS\dot{C}V1_s|$. Como já era esperado, $S\dot{C}V^{(1)}$ varia em função do ângulo de carga, que inicia a oscilação no instante $t = 0,5$ s.

Considerando que no caso 4 a duração da oscilação é de $t_{osc} = 1,5$ s, pela Figura 5.5 confirma-se que no instante $t = 1,25$ s o ângulo máximo da oscilação é obtido, pois tem-se a menor tensão do centro elétrico. A derivada de $S\dot{C}V^{(1)}$ durante o período de carga permanece nula, pois não há alteração de $S\dot{C}V^{(1)}$. Contudo, ao iniciar a oscilação de potência a derivada cresce até o limite da oscilação $\delta_{m\acute{a}x} = 110^\circ$, momento em que constata-se predominância de ruídos, tendo em vista que $S\dot{C}V^{(1)}$ volta a decrescer.

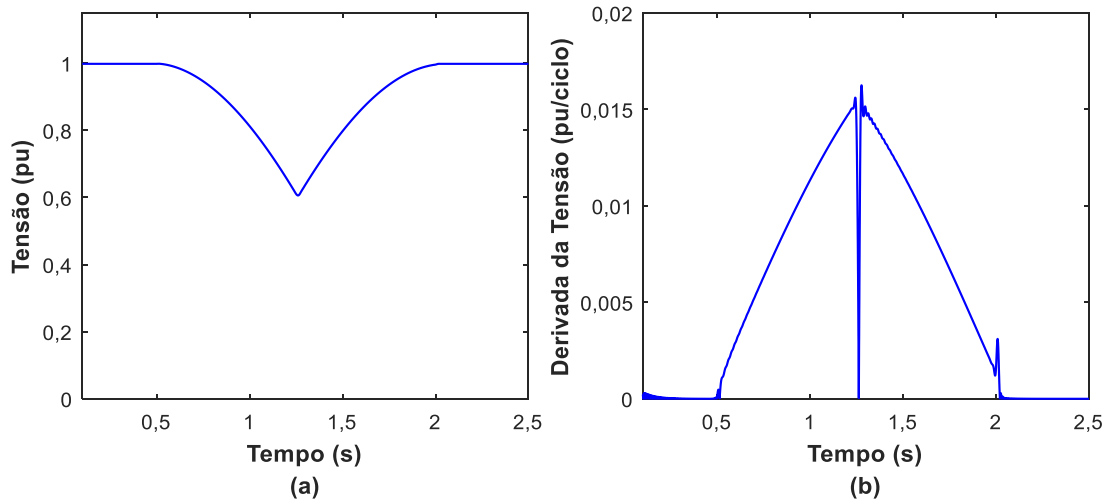


Figura 5.5 – Tensão do centro elétrico $S\dot{C}V^{(1)}$ (a) e o módulo de sua derivada $|dS\dot{C}V1_s|$ (b) para o caso 4.

5.2.2 Faltas simétricas durante oscilações de potência estáveis

A ocorrência de faltas durante oscilações de potência impõe uma situação de difícil detecção para os algoritmos de proteção, principalmente quando estas são trifásicas, com ou sem resistência de falta. Nestes casos, como não há componentes de sequências negativa e zero, a diferenciação da oscilação equilibrada em andamento para a falta deve considerar o comportamento de outras grandezas, como já descrito no capítulo 4.

Vale ressaltar que para detecção de faltas no método MCC, como não há função específica para isso, foi integrado o algoritmo visto na Figura 4.3, o qual constitui-se de um bloco possível de integração também no MVTCE. Contudo, para fins de comparação, e considerando que o MVTCE já possui algoritmo próprio de detecção, a integração foi realizada apenas no MCC.

A metodologia para realização de faltas no domínio do tempo, utilizando a matriz de condutâncias de faltas, descrita no item 3.2.3, permite o posicionamento da resistência de falta (R_F) entre cada condutor fase e o ponto neutro, para falta trifásica. Dessa forma, a ligação entre o ponto neutro e o solo é de forma sólida, ou seja, sem resistência de falta. Na Tabela 5 são apresentados os diversos casos de faltas trifásicas aplicadas no instante quando $\delta = 110^\circ$, com duração de 0,5 s, contemplando a partir da barra 1, da Figura 4.6, os percentuais relativos da linha de transmissão, sendo eles 10%, 50% e 90%. Foram

consideradas resistências de falta de 0,01 Ω , 0,4 Ω e 1 Ω , sendo constatado que para o MVTCE acima de 0,4 Ω a detecção pode não ocorrer (casos 13, 22 e 24). O escorregamento de frequência considerado compreende o menor (0,185 Hz) e o maior (0,631 Hz) já apresentados na Tabela 4.

Tabela 5 – Casos simulados para oscilações estáveis com ocorrência de faltas simétricas.

CASO	$f_{slip}(Hz)$	Local a partir da barra 1	$R_F (\Omega)$	Instante da falta (s)	Instante do desbloqueio (s)		Tempo para desbloqueio (ms)	
					MCC	MVTCE	MCC	MVTCE
7	0,185	10%	0,01	2	2,050	2,090	49,740	90,1042
8	0,185	10%	0,4	2	2,060	2,084	60,417	84,3750
9	0,185	50%	0,01	2	2,050	2,089	50,000	88,8021
10	0,185	50%	0,4	2	2,050	2,089	50,000	89,3229
11	0,185	90%	0,01	2	2,068	2,119	67,708	119,2708
12	0,185	90%	0,4	2	2,069	2,088	68,750	88,2812
13	0,185	10%	1	2	2,050	ND	50,260	ND
14	0,185	50%	1	2	2,067	2,084	67,188	83,5937
15	0,185	90%	1	2	2,068	2,084	67,969	84,1146
16	0,631	10%	0,01	0,94	0,988	1,031	48,281	90,7292
17	0,631	10%	0,4	0,94	0,989	1,025	48,800	84,7396
18	0,631	50%	0,01	0,94	0,989	1,036	49,063	96,1979
19	0,631	50%	0,4	0,94	0,989	1,029	49,323	88,9062
20	0,631	90%	0,01	0,94	0,989	1,060	49,322	119,6354
21	0,631	90%	0,4	0,94	1,006	1,037	65,900	97,5000
22	0,631	10%	1	0,94	0,989	ND	49,063	ND
23	0,631	50%	1	0,94	0,989	1,024	49,063	84,4792
24	0,631	90%	1	0,94	1,006	ND	65,729	ND

ND: Não detectado.

Como pode ser observado, os tempos de detecção do MCC foram acentuadamente inferiores ao do MVTCE implementado, para todos os casos. Percebe-se que no MCC a elevação de R_F não afetou o tempo de detecção, tendo em vista que na maioria dos casos as diferenças são inferiores a 10 ms. Já no MVTCE, em alguns casos a elevação de R_F propiciou redução do tempo de detecção, o que é favorável ao sistema elétrico. A frequência de escorregamento para ambos métodos teve pouca interferência nos resultados, o que pode ser devido seu reduzido valor simulado.

É importante destacar que mesmo nos melhores tempos de detecção, na ordem de 50 ms do MCC, é possível que não haja eliminação da falta em até 100 ms, visto que é

necessária ainda detecção da função 21, emissão do sinal de *trip* e abertura dos disjuntores de ambos terminais da linha. Isso se torna um problema para relés de proteção, o que tem fomentado o desenvolvimento de algoritmos específicos para desbloqueio de faltas durante oscilações de potência assertivos e em tempos menores.

O instante de falta utilizado na Tabela 5 compreende o momento de ângulo máximo da oscilação ($\delta_{m\acute{a}x} = 110^\circ$), que ocorre em $t = t_0 + \frac{t_{osc}}{2}$. Este fato é confirmado na Figura 5.6, por meio da trajetória da impedância vista pelo *loop* AT do caso 16. No instante $t = 0,9536$ s a impedância já está bem definida sobre a linha (10%), cerca de 13,6 ms após o instante de falta ($t = 0,94$ s).

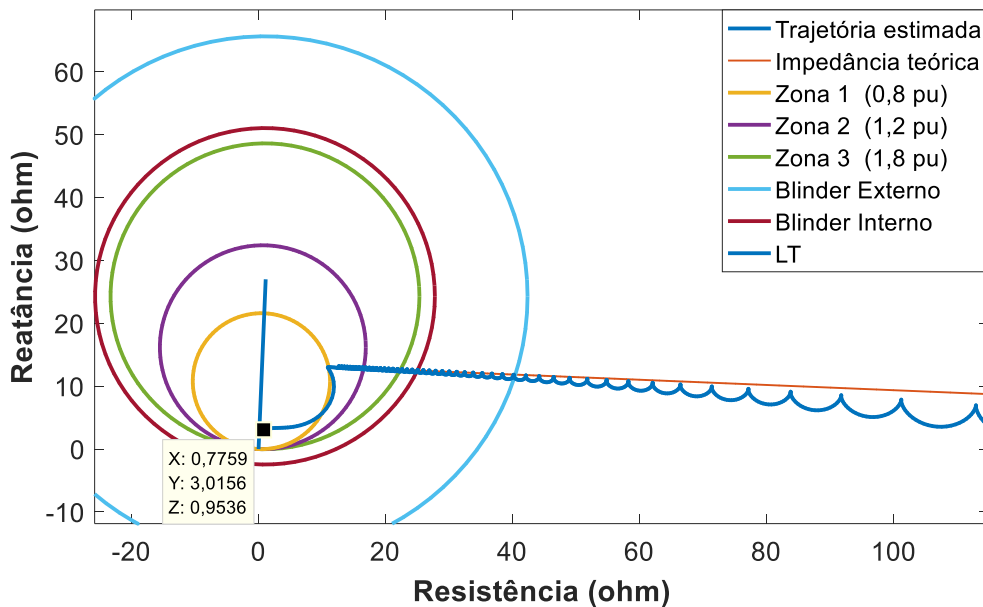


Figura 5.6 – Trajetória vista pelo *loop* Z_{AT} para o caso 16, cujas coordenadas X, Y e Z referem-se respectivamente às grandezas: resistência, reatância e tempo.

A oscilografia gerada para o caso 16 é apresentada na Figura 5.7, constituindo-se de uma oscilação iniciada após 0,5 s (período de carga), sendo finalizada no instante de falta. A corrente transitória de falta é mais acentuada nas fases A e B, uma vez que no instante imediatamente anterior à falta, $t = 0,9398$ s, as tensões instantâneas destas fases estavam mais próximas de zero ($v_a(t) = -41,58$ kV e $v_b(t) = -58,41$ kV) que a fase C ($v_c(t) = 100,00$ kV). O log de eventos do MTVCE para o caso 16 é apresentado na Figura 5.8, confirmando-se o instante de detecção $t = 1,031$ s, ocorrendo então o desbloqueio.

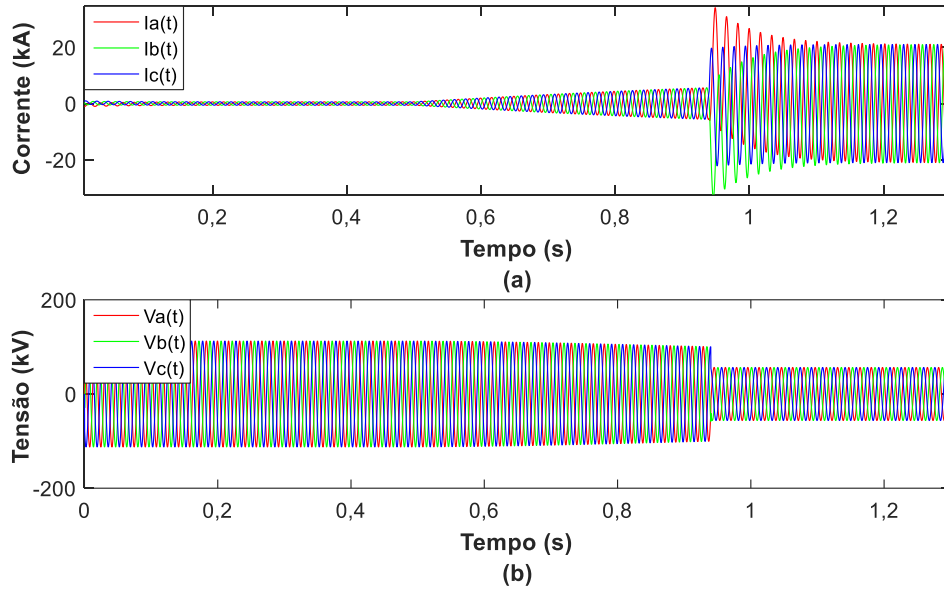


Figura 5.7 - Sinais instantâneos gerados de corrente (a) e tensão (b) para o caso 16.

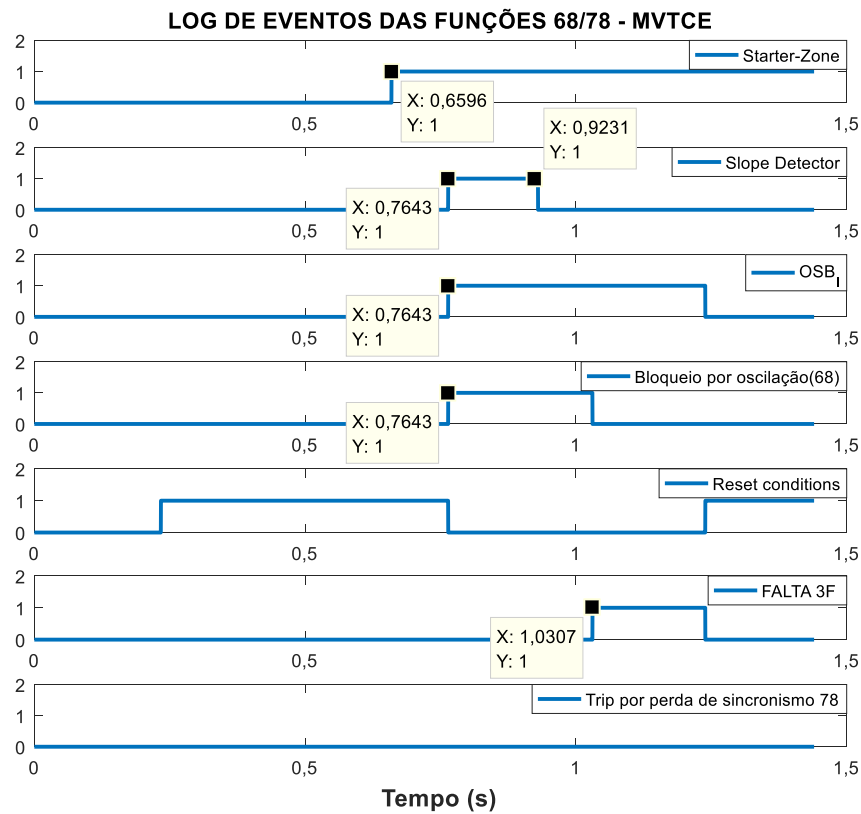


Figura 5.8 - Log de eventos MVTCE para o caso 16.

Conforme disposto na Tabela 5, nos diversos casos simulados o MVTCE obteve tempos de detecção acentuadamente elevado, entre 80 e 90 ms. Este fato ocorre pois, no MVTCE a derivada $|dSCV1_S(k)|$ dever ser inferior a 0,01 por no mínimo 2 ciclos, como

visto na Figura 4.14. Contudo, percebe-se que $|d\hat{S}\hat{C}V1_s(k)|$ é notoriamente afetada por ruídos (Figura 5.9) no instante de falta, o que leva a uma demora na redução de seu valor. Neste sentido, percebe-se que um aprimoramento do algoritmo pode ser realizado utilizando-se filtros do tipo passa-baixa ou outros, cuja investigação de melhorias pretende-se realizar em trabalhos futuros.

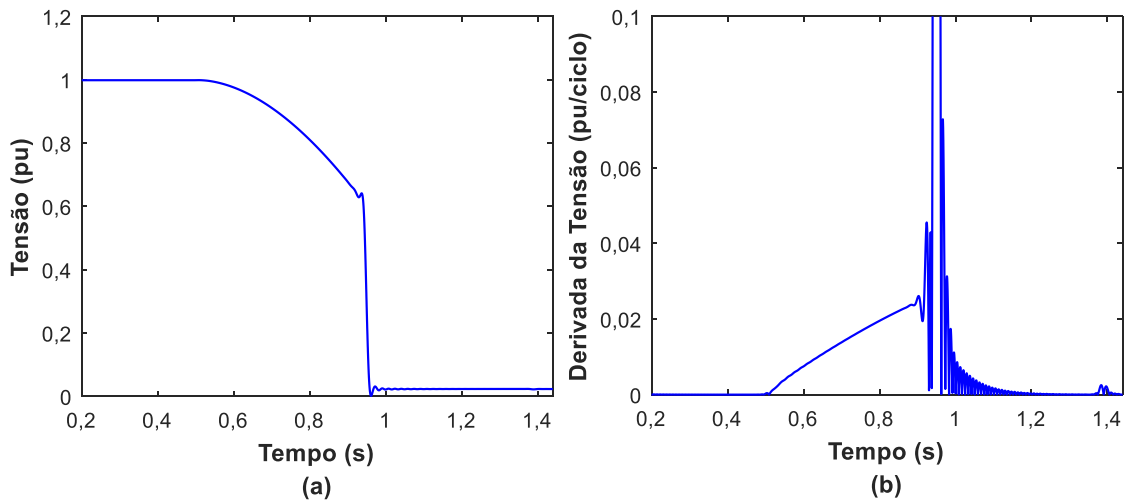


Figura 5.9 - Tensão do centro elétrico $\hat{S}\hat{C}V^{(1)}$ (a) e o módulo de sua derivada $|d\hat{S}\hat{C}V1_s|$ (b) para o caso 16.

Nos casos 13, 22 e 24 constatou-se a não-deteccção (ND) das faltas trifásicas com $R_F = 1 \Omega$. O comportamento da tensão $\hat{S}\hat{C}V^{(1)}$ e sua derivada para o caso 22 são apresentados na Figura 5.10.

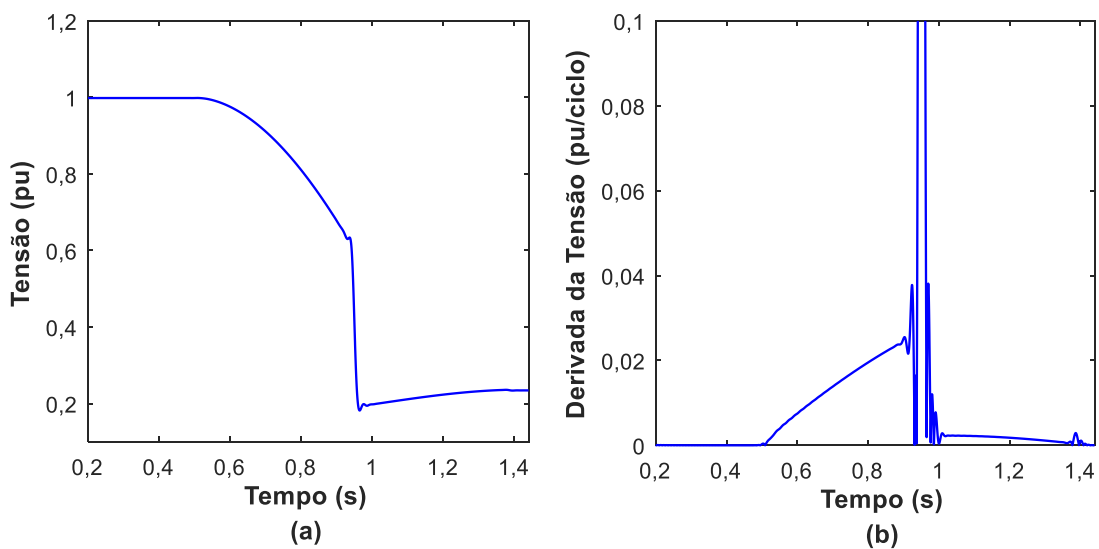


Figura 5.10 - Tensão do centro elétrico $\hat{S}\hat{C}V^{(1)}$ (a) e o módulo de sua derivada $|d\hat{S}\hat{C}V1_s|$ (b) para o caso 22.

Nos casos de faltas sólidas, a tensão $S\hat{C}V^{(1)}$ permanece constante após o instante de falta, em valores próximos de zero. Contudo, nas faltas com resistência isto não ocorre, sendo verificado suave crescimento de $S\hat{C}V^{(1)}$ (Figura 5.10), acima de 0,1 pu, o que leva à não-deteção pelo algoritmo, tendo em vista que a tensão do centro elétrico deve ser inferior ao máximo entre 0,1 e $\cos(\varphi_{z_{12}})$, conforme fluxograma da Figura 4.14.

5.2.3 Faltas assimétricas durante oscilações de potência estáveis

Conforme já descrito, no MVTCE a detecção de faltas assimétricas durante oscilações de potência é feita pela função de sobrecorrente direcional de sequência negativa (67Q), não implementada neste trabalho. Assim, os casos contidos na Tabela 6 foram simulados apenas com o MCC.

Tabela 6 – Casos simulados de faltas assimétricas durante oscilações de potência.

CASO	$f_{slip}(Hz)$	Tipo de falta	Local a partir da barra 1	$R_F (\Omega)$	Instante da falta (s)	Instante do desbloqueio (s) MCC	Tempo para desbloqueio (ms) MCC
25	0,631	AT	10%	0,01	0,94	0,988	48,281
26	0,631	AT	10%	5	0,94	0,997	57,135
27	0,631	AT	10%	100	0,94	ND	ND
28	0,631	AT	50%	0,01	0,94	0,990	49,844
29	0,631	AT	50%	5	0,94	1,007	66,771
30	0,631	AT	50%	100	0,94	ND	ND
31	0,631	AT	90%	0,01	0,94	1,004	64,427
32	0,631	AT	90%	5	0,94	1,012	71,979
33	0,631	AT	90%	100	0,94	ND	ND
34	0,631	AB	10%	0,01	0,94	0,988	47,760
35	0,631	AB	10%	10	0,94	0,991	50,885
36	0,631	AB	50%	0,01	0,94	1,007	67,292
37	0,631	AB	50%	10	0,94	1,012	71,979
38	0,631	AB	90%	0,01	0,94	0,990	49,844
39	0,631	AB	90%	10	0,94	1,422	482,135
40	0,631	ABT	10%	0,01	0,94	0,988	48,281
41	0,631	ABT	10%	0,4	0,94	1,003	63,385
42	0,631	ABT	50%	0,01	0,94	0,990	49,844
43	0,631	ABT	50%	0,4	0,94	1,008	67,552
44	0,631	ABT	90%	0,01	0,94	0,989	49,323
45	0,631	ABT	90%	0,4	0,94	1,006	65,990

ND: Não detectado.

Na Tabela 6 são apresentados os diversos casos de faltas assimétricas simuladas com duração de 0,5 s, contemplando a partir da barra 1, da Figura 4.6, os percentuais relativos da linha de transmissão, sendo eles 10%, 50% e 90%. Foram consideradas resistências de falta de 0,01 Ω , 0,4 Ω , 5 Ω , 10 Ω e 100 Ω .

Considerando que no item anterior já se constatou baixíssima influência de $f_{slip}(Hz)$ no tempo de detecção, foram realizadas simulações considerando apenas $f_{slip} = 0,631 Hz$, cuja parametrização está descrita na Tabela 4. Semelhante ao item anterior, o instante de falta utilizado compreende o momento de ângulo máximo da oscilação ($\delta_{m\acute{a}x} = 110^\circ$), que ocorre em $t = t_0 + \frac{t_{osc}}{2}$. Como pode ser verificado, na maioria dos casos o desbloqueio ocorreu com tempo inferior a 70 ms, constatando-se que a elevação de R_F propiciou aumento de tempo na faixa de 5 a 15 ms, o que não comprometeu o desempenho do método.

A oscilografia gerada para o caso 34 é apresentada na Figura 5.11, contemplando período de carga até 0,5 s, iniciando então uma oscilação de potência estável. Contudo, em $t = 0,94 s$ ocorre uma falta AB à 10% da linha. Como era previsto, a corrente da fase C permanece sob oscilação de potência, verificando-se transitório de falta apenas nas fases A e B. O mesmo é observado para a tensão da fase C, que continua próximo ao valor antes da falta.

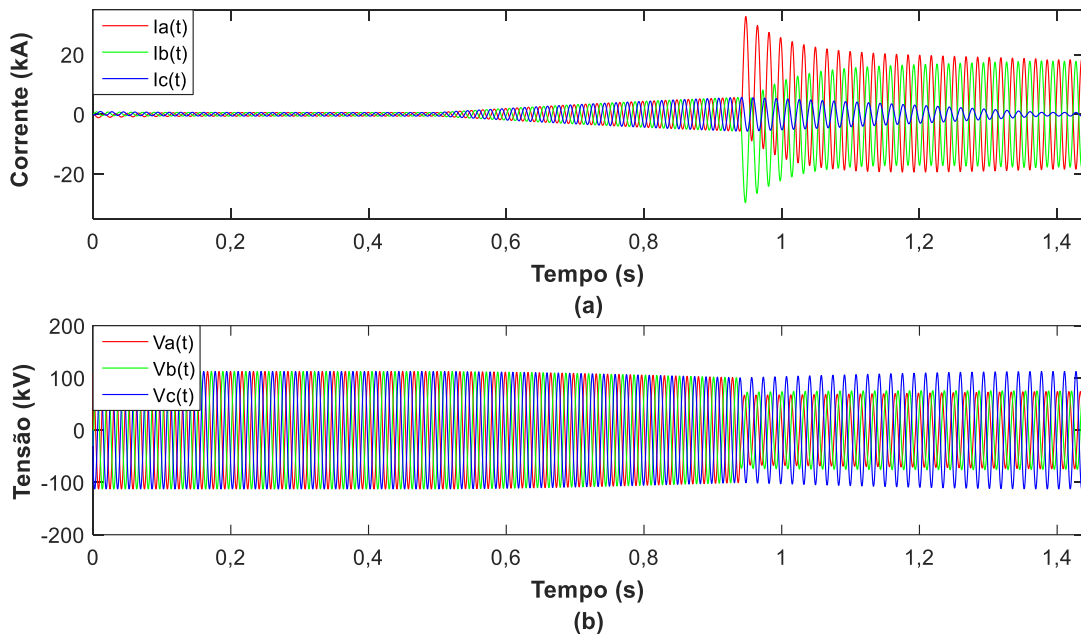


Figura 5.11 - Sinais instantâneos gerados de corrente (a) e tensão (b) para o caso 34.

É importante destacar, que nos casos de $R_F = 100 \Omega$ a trajetória da impedância que já estava próxima à zona 1, deslocou-se instantaneamente para fora dos *blindings* em função da altíssima resistência. Este fato levou o algoritmo a não realizar o desbloqueio, pois automaticamente ao cruzar o *blinder* externo o desbloqueio do 21 já foi emitido, pela própria filosofia do método. Nessa condição operativa, como a impedância deslocou-se para fora de todas as zonas de atuação, outras funções de proteção poderiam detectar esta falta, como por exemplo a sobrecorrente direcional de sequência negativa (ANSI 67Q) ou de neutro (ANSI 67N), desde que seja alcançado o ajuste mínimo de corrente de desequilíbrio instantânea ou temporizada.

O algoritmo para desbloqueio, contido na Figura 4.3, e que foi integrado ao MCC para estas simulações, fundamenta-se na velocidade da impedância para detecção da falta. Na Figura 5.12 é apresentada a velocidade da impedância estimada por cada *loop* para o caso 34. Como pode ser observado, há um transitório de velocidade no instante da falta, nos *loops* que contém as fases A e/ou B, que na sequência tende à velocidade zero, uma vez que a impedância estará parada em um determinado ponto no plano RX. Este fato possibilita constatação da falta, pois a velocidade quase nula, é inferior à 10% da velocidade de três ciclos anteriores, sendo este o critério utilizado pelo algoritmo.

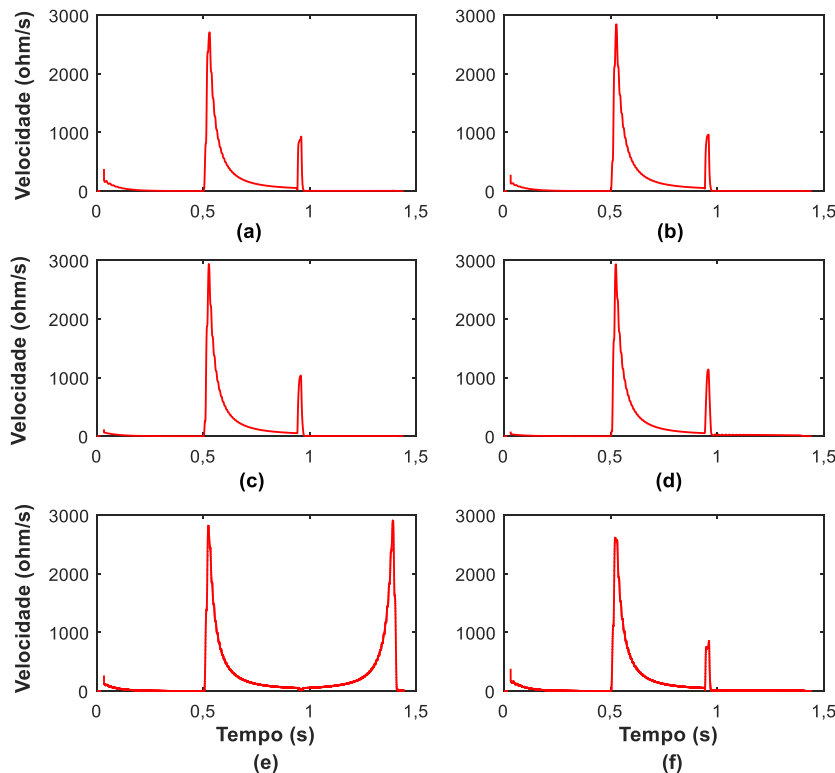


Figura 5.12 - Velocidade da impedância nos *loops* AT (a), AB (b), BT (c), BC (d), CT (e) e CA (f) para o caso 34.

5.2.4 Oscilações de potência instáveis

Conforme já descrito no item 5.2.1, os *blindings* estão situados nos ângulos $\delta_\alpha = 44^\circ$ e $\delta_\beta = 67^\circ$. Dessa forma, considerando arbitrariamente o ajuste $OSTD=3$ ciclos, tem-se que a frequência máxima para oscilações instáveis é dada por:

$$f_{slip-instável} = \frac{(\delta_\beta^\circ - \delta_\alpha^\circ) f_0}{360 OSTD} = \frac{(67 - 44)60}{360 \cdot 3} = 1,277 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

O limite obtido em (5.1) para oscilações estáveis foi de 0,638 Hz. Logo, as oscilações instáveis contemplam frequências de 0,638 Hz até 1,277 Hz. A partir desta última frequência o MCC já não mais atuará, permitindo a atuação da função 21, não implementada neste trabalho. Neste método, como o *blinder* interno deve cobrir todas as zonas de proteção, este pode ser utilizado para *trip* por 78 na entrada, como realizado neste trabalho. Portanto, assim que o temporizador se encerra já é tomada a decisão de *trip* por 78 ou bloqueio por 68.

O MVTCE não classifica oscilações estáveis e instáveis. A lógica de disparo (78) consiste fundamentalmente na definição de um *blinder* de disparo, podendo ser na entrada ou na saída. Diferentemente do MCC, no MVTCE o *blinder* interno de disparo pode estar contido dentro das zonas de proteção, pois a partir da zona externa o algoritmo já inicia a verificação de oscilação de potência.

É usual, como disposto nos ajustes definidos no trabalho de (ALVES et al., 2018), o *trip* também pela característica externa oposta, tendo em vista que nas oscilações instáveis a impedância cruza o eixo das reatâncias, com tendência de giro. Para o MVTCE considerou-se neste trabalho o *trip* no *blinder* externo. Logo, se uma oscilação é detectada pelo sinal OSB_1 e cruza o *blinder* externo, o sinal de *trip* por 78 é emitido.

Na Tabela 7 tem-se a relação de casos simulados para oscilações instáveis, utilizando-se os conceitos descritos no item 3.2.4. Como pode ser observado, para o MCC o sinal de *trip* ocorre em instante bem inferior ao MVTCE, tendo em vista a realização do *trip* pelo *blinder* interno (BI) e *blinder* externo (BE), respectivamente. Em ambos os métodos se obtêm a correta atuação da função 78.

Tabela 7 – Casos simulados para oscilações instáveis com duração de 3 períodos de oscilação.

CASO	$f_{stip}(Hz)$	Tempo simulado (s)	Instante <i>Trip</i> por 78 (s)		Funcionamento correto	
			MCC (BI)	MVTCE (BE)	MCC	MVTCE
46	0,650	4,615	0,2956	1,357	SIM	SIM
47	0,750	4,000	0,2573	1,177	SIM	SIM
48	0,850	3,529	0,2279	1,04	SIM	SIM
49	0,950	3,158	0,2052	0,9312	SIM	SIM
50	1,050	2,857	0,1862	0,8432	SIM	SIM
51	1,15	2,610	0,1708	0,7706	SIM	SIM
52	1,25	2,400	0,1581	0,7096	SIM	SIM

Tomando-se o caso 52 como exemplo, na Figura 5.13 é apresentada a trajetória da impedância vista pelo *loop* AT. Em $t = 0,1581\text{ s}$ ocorre o *trip* pelo MCC, ao cruzar o BI, e em $t = 0,7096\text{ s}$ ocorre o *trip* pelo MVTCE, no BE.

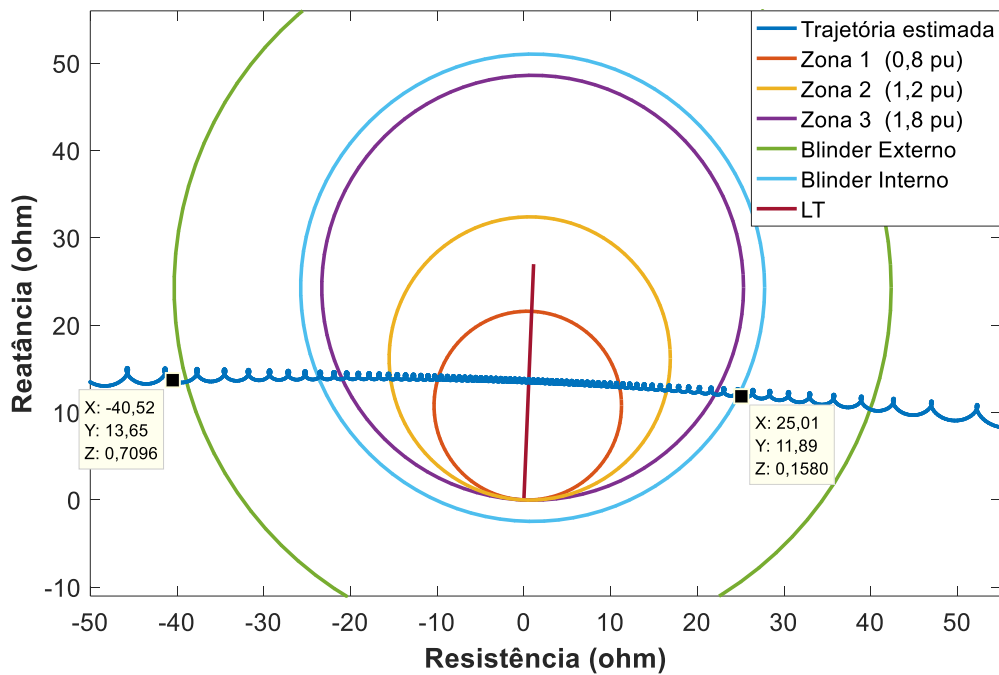


Figura 5.13 - Trajetória da impedância vista pelo *loop* AT durante oscilação instável do caso 52, cujas coordenadas X, Y e Z referem-se respectivamente às grandezas: resistência, reatância e tempo

Os sinais instantâneos gerados para o caso 52 são apresentados na Figura 5.14, contemplando 1 período de oscilação $\left(\frac{1}{1,25}\text{ s}\right)$. É importante destacar que uma vez mantida a frequência da fonte E_1 fixa, a elevação do tempo simulado proporciona que a

trajetória da impedância faça mais giros no plano RX, tendo sinais instantâneos pulsantes e periódicos.

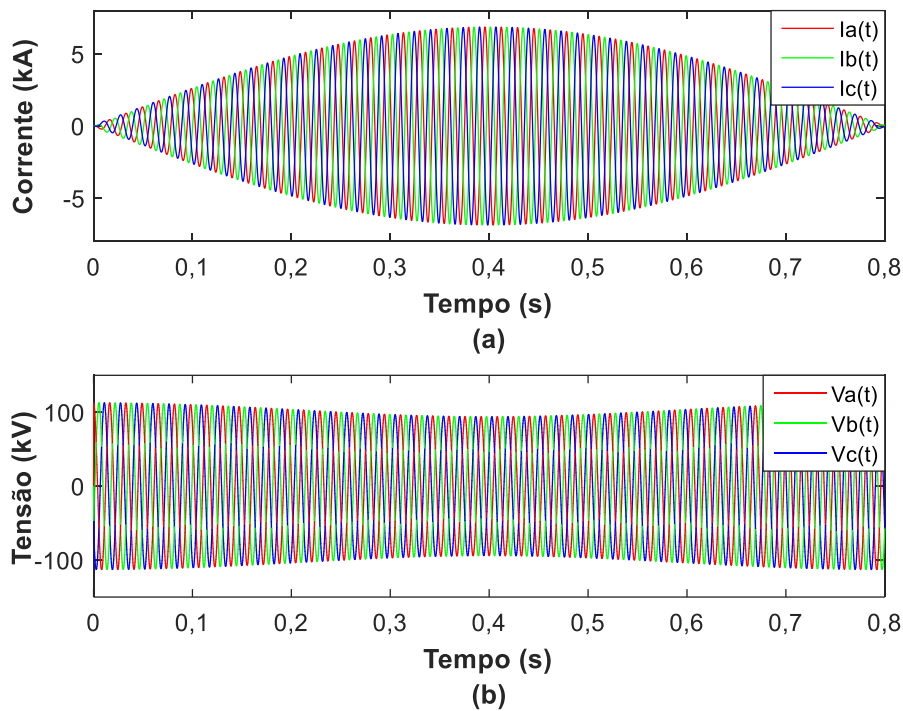


Figura 5.14 - Sinais instantâneos gerados de corrente (a) e tensão (b) para o caso 52, com visualização de apenas 1 período de oscilação.

No *log* de eventos do MTVCE para o caso 52 apresentado na Figura 5.15 é possível identificar a relevância da função de disparo por perda de sincronismo, visto que desde a detecção da oscilação ocorre o bloqueio da função 21 pela 68, permanecendo assim durante os giros da impedância no plano RX, o que manteria o sistema fisicamente conectado, mas fora de sincronismo. Contudo, o sinal de *trip* emitido pela função 78, ao cruzar o BE, possibilita a separação segura da referida linha, face ao fenômeno detectado.

É importante ressaltar que o término do *log* de eventos ocorre com o sinal de *trip*, pois presume-se que o disjuntor abrirá. Caso este não seja aberto, a sequência de eventos após o *trip* pode ser considerada, sendo identificado para o segundo giro da impedância a atuação do sinal “Starter-Zone”, que identifica a nova entrada da impedância pelo BE (oposto à saída).

O comportamento de $S\dot{C}V^{(1)}$ e sua derivada apresentados na Figura 5.16, reforça a validade de que estas variáveis oscilam na frequência de escorregamento e caracterizam

o fenômeno. Considerando que o algoritmo utiliza a derivada para definição do bloqueio, percebe-se que apenas nos terminos dos períodos de oscilação há ruídos excessivos, os quais não interferiram no bloqueio e posterior *trip* por 78.

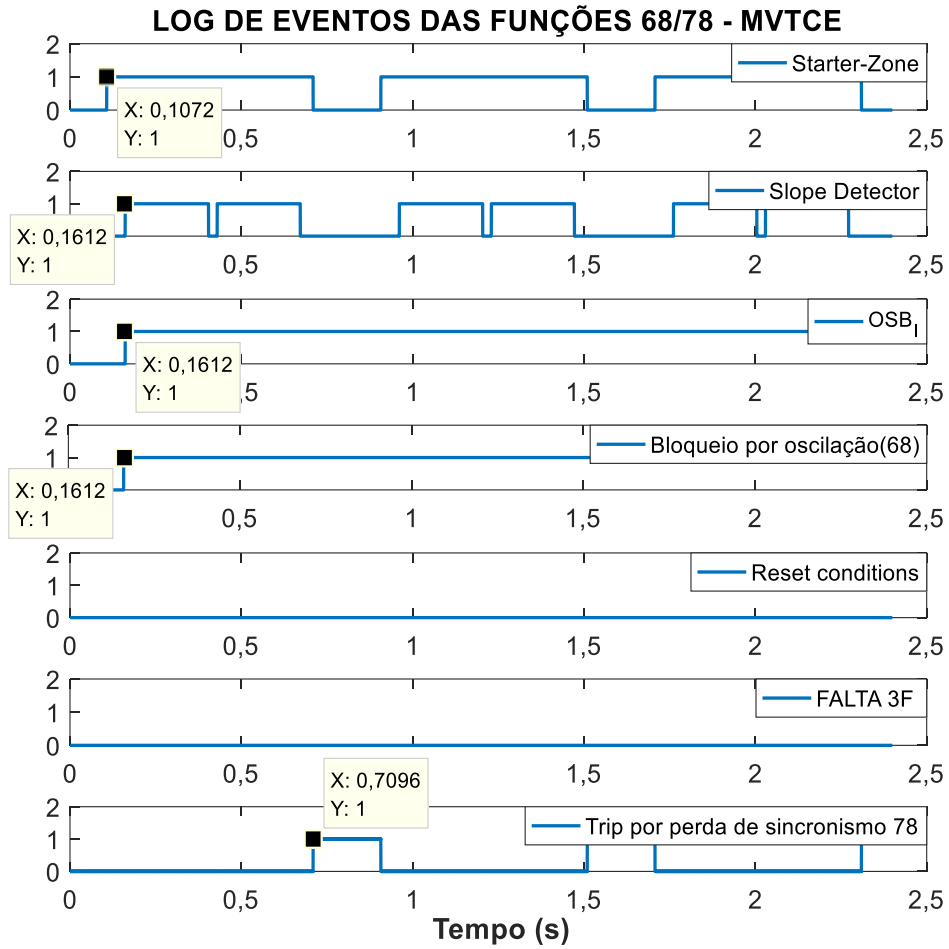


Figura 5.15 - Log de eventos MVTCE para o caso 52.

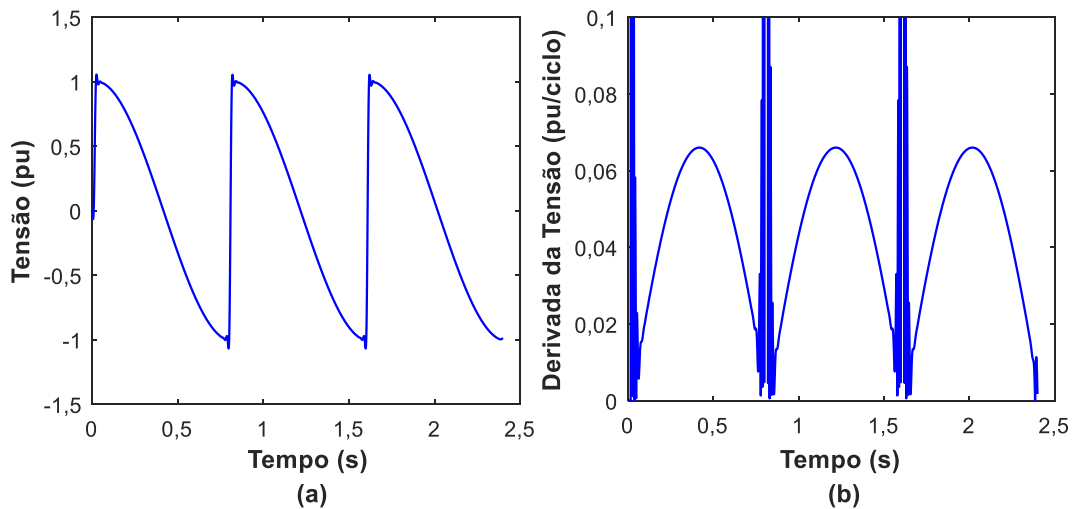


Figura 5.16 - Tensão do centro elétrico $S\dot{C}V^{(1)}$ (a) e o módulo de sua derivada $|dS\dot{C}V1_s|$ (b) para o caso 52.

Dado que o MVTCE não classifica oscilações estáveis e instáveis, a ocorrência de frequências acima de 1,277 Hz possibilita o bloqueio da função 21, até o cruzamento pelo *blinder* externo, momento em que o *trip* é emitido, considerando que a função 78 esteja habilitada. Os casos apresentados na Tabela 8 contemplam oscilações de 1,5 Hz a 5,5 Hz, que caracterizam oscilações rápidas (elevadas frequências de escorregamento).

Tabela 8 – Casos simulados para oscilações instáveis com elevada frequência de escorregamento.

CASO	$f_{slip}(Hz)$	Instante atuação	Instante do	Instante <i>Trip</i> por	Funcionamento	
		por 21 (s)	bloqueio (s)	78 (s)	correto	
		MCC	MVTCE	MVTCE	MCC	MVTCE
53	1,5	0,1331	0,1362	0,5927	SIM	SIM
54	2,0	0,1021	0,1047	0,4466	SIM	SIM
55	2,5	0,0833	0,0859	0,3589	SIM	SIM
56	3,0	0,0708	0,0744	0,3003	SIM	SIM
57	3,5	0,0622	0,0731	0,2586	SIM	SIM
58	4,0	0,0555	0,0713	0,2273	SIM	SIM
59	4,5	0,0503	0,0627	0,2029	SIM	SIM
60	5,0	0,0461	0,0632	0,1833	SIM	SIM
61	5,5	0,0427	0,0638	0,1674	SIM	SIM

Conforme Figura 4.2, ao cruzar o *blinder* interno caso não seja detectada oscilação estável ou instável, o MCC libera o sinal “atuação 21”, que deixa as unidades de distância (ANSI 21) aptas a operarem. Assim, como os casos da Tabela 8 possuem frequências superiores à de oscilação instável, a coluna de “Instante atuação por 21 MCC” contempla o instante em que a impedância cruzou o *blinder* interno. Em função do ajuste do temporizador OSTD, o MCC enxergou estes casos como falta. Já o MVTCE, que não possui ajustes definidos pelo usuário, detectou o evento como uma oscilação instável, liberando o sinal de *trip* por 78. Assim, tanto o MCC quanto o MVTCE apresentaram comportamento adequado em frequências elevadas de escorregamento.

Vale destacar que a elevação da frequência de escorregamento proporcionou maiores erros na estimação fasorial, o que tornou os laços na trajetória da impedância mais representativos, os quais são reduzidos em baixas frequências, como mostrado na trajetória da Figura 5.13. A elevação deste erros não impactou significativamente nos métodos até a frequência de 5,5 Hz, contudo, a partir de 6 Hz o MVTCE demorou muito tempo para detecção da oscilação, permitindo atuação por 21, semelhante ao MCC.

5.2.5 Faltas simétricas e assimétricas sem oscilação de potência

Um importante requisito para os algoritmos de bloqueio e disparo por oscilação de potência é ser capaz de diferenciar faltas simétricas e assimétricas de oscilações de potência. Os casos da Tabela 9 foram simulados utilizando-se a formulação descrita de (3.29) a (3.33), semelhante ao item 5.2.1, com $t_0 = 0,5 s$, $t_{osc} = 3 s$, $\delta_0 = 10^\circ$ e $\delta_{máx} = 110^\circ$. Contudo, ainda no período de carga, no instante $t = 0,3 s$, tem-se a ocorrência da falta com duração de 166,66 ms.

Tabela 9 – Casos simulados para faltas simétricas e assimétricas sem oscilação de potência.

CASO	Tipo de falta	Local a partir da barra l	$R_F (\Omega)$	Oscilação detectada		Funcionamento correto	
				MCC	MVTCE	MCC	MVTCE
62	ABCT	10%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
63	ABCT	10%	0,4	NÃO	NÃO	SIM	SIM
64	ABCT	50%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
65	ABCT	50%	0,4	NÃO	NÃO	SIM	SIM
66	ABCT	90%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
67	ABCT	90%	0,4	NÃO	NÃO	SIM	SIM
68	AT	10%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
69	AT	10%	5	NÃO	NÃO	SIM	SIM
70	AT	10%	100	NÃO	NÃO	SIM	SIM
71	AT	50%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
72	AT	50%	5	NÃO	NÃO	SIM	SIM
73	AT	50%	100	NÃO	NÃO	SIM	SIM
74	AT	90%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
75	AT	90%	5	NÃO	NÃO	SIM	SIM
76	AT	90%	100	NÃO	NÃO	SIM	SIM
77	AB	10%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
78	AB	10%	10	NÃO	NÃO	SIM	SIM
79	AB	50%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
80	AB	50%	10	NÃO	NÃO	SIM	SIM
81	AB	90%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
82	AB	90%	10	NÃO	NÃO	SIM	SIM
83	ABT	10%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
84	ABT	10%	0,4	NÃO	NÃO	SIM	SIM
85	ABT	50%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
86	ABT	50%	0,4	NÃO	NÃO	SIM	SIM
87	ABT	90%	0,01	NÃO	NÃO	SIM	SIM
88	ABT	90%	0,4	NÃO	NÃO	SIM	SIM

Como pode ser observado, em nenhum caso ocorre bloqueio ou *trip* por oscilação de potência, sendo verificado comportamento satisfatório dos dois métodos. Ou seja, os algoritmos MCC e MVTCE não atuaram para faltas na linha, as quais devem ser detectadas por outras funções de proteção, tais como 21, 21N, 67N e 67.

A metodologia descrita no item 3.2.3 referente ao cálculo de faltas no domínio do tempo foi eficaz para a execução das faltas assimétricas deste item, pois possibilitou a geração de oscilografias no MATLAB®, contemplando período de carga e transitório de falta sem descontinuidades, de forma similar ao *software* ATP. Tomando-se como exemplo o caso 87, que contempla falta entre fases e a terra, é possível constatar por meio da Figura 5.17, o efeito de elevação da corrente nas fases A e B, e um comportamento pouco alterado da fase C (sã).

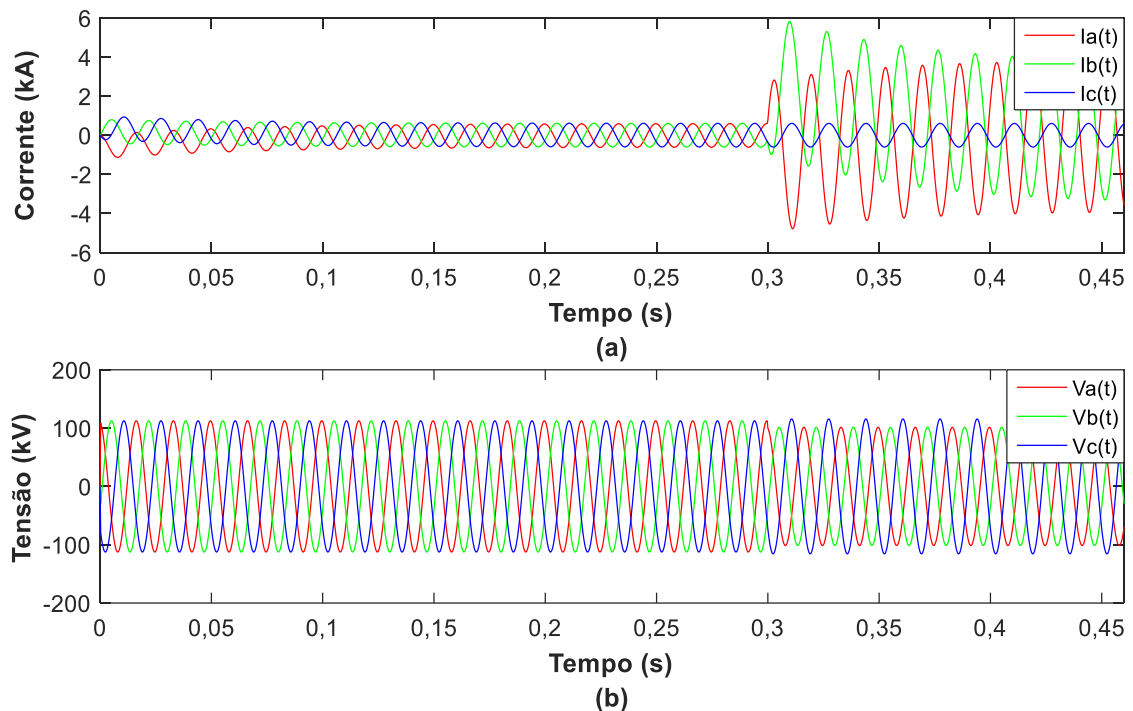


Figura 5.17 - Sinais instantâneos gerados de corrente (a) e tensão (b) para o caso 87.

Na Figura 5.18 são apresentados os seis *loops* de impedância para o caso 87, que possibilitam identificação do tipo de falta. Percebe-se que apenas os *loops* AB, AT, e BT identificaram a impedância dentro de suas zonas de atuação, validando-se a falta ABT. Os parâmetros das zonas e *blindings* são os mesmos utilizados em todos os resultados, e estão contidos na Tabela 3.

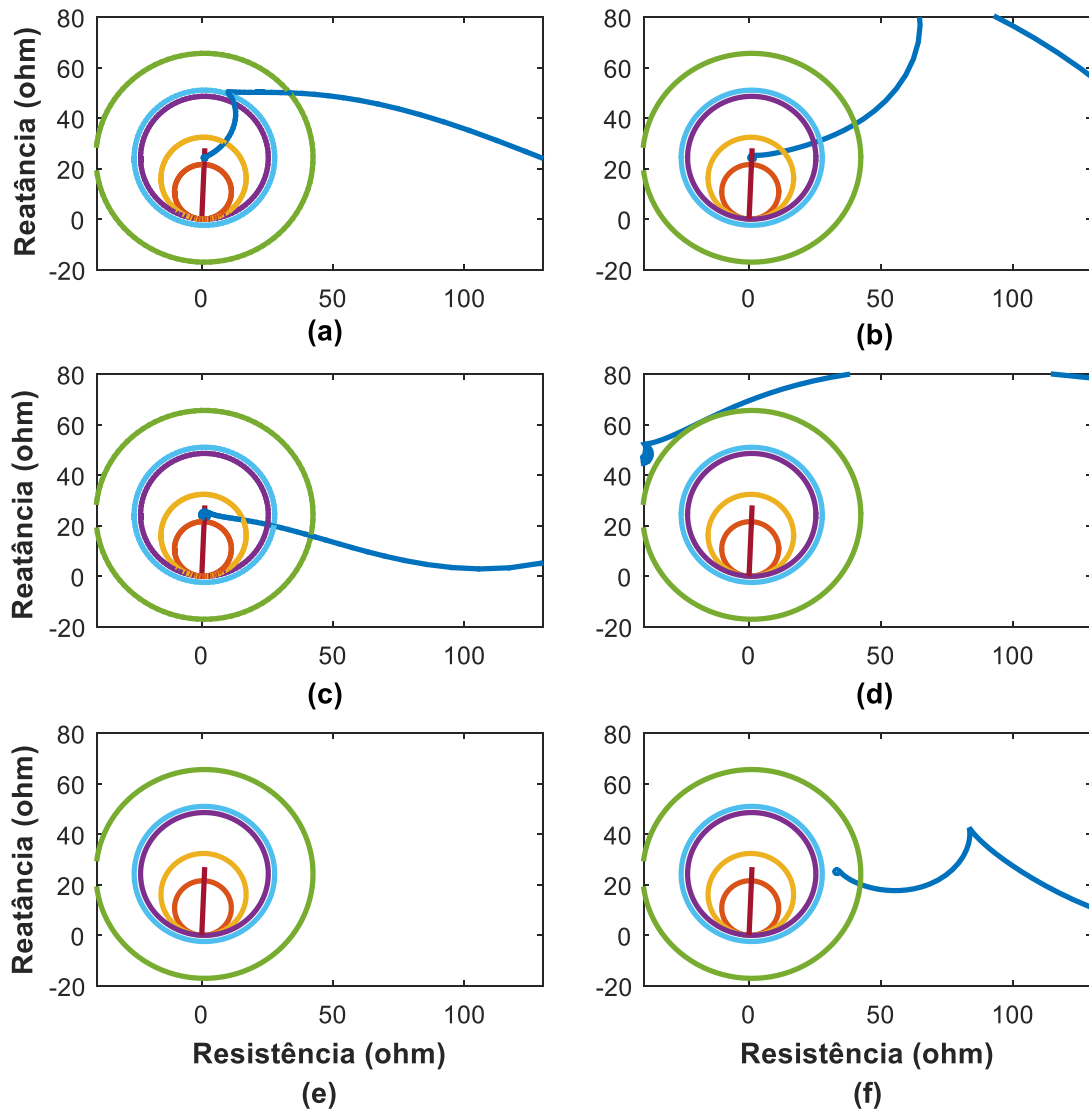


Figura 5.18 - Impedância estimada nos *loops* AT (a), AB (b), BT (c), BC (d), CT (e) e CA (f) para o caso 87.

5.3 Aplicação do modelo de uma máquina

Os parâmetros do modelo de uma máquina utilizado nas simulações são apresentados na Tabela 10. Conforme já descrito no item 3.3, este modelo possibilita simulação de trajetórias formadas por segmentos de retas com velocidade constante em cada trecho. Contudo, em uma oscilação de potência real, a velocidade varia ao longo do tempo, sendo mínima no centro elétrico, como visto na Figura 2.14. Dessa forma, a utilização deste modelo visa testar de maneira rápida e simples as funções 68/78, pois basta que o usuário defina pontos da trajetória e velocidades da impedância compatíveis com o fenômeno de oscilação que se deseja simular.

Tabela 10 – Parâmetros do sistema de uma máquina e ajustes.

Parâmetros	Valores
Ajustes das zonas (pu)	$Z1= 0,8, Z2= 1,2$ e $Z3= 1,8$ (com o mesmo ângulo da LT)
Ajustes dos <i>blindings</i> (pu)	$BI = 1,1 \times Z3$ e $BE = 1.7 \times Z3$
Impedâncias de sequência positiva da LT	$Z_{LT}^{(1)} = 1,1227959 + j27 \Omega$
Impedância do equivalente	$R_s = 0,112 \Omega$ $L_s = 0,7162 \text{ mH}$
Tensão de linha rms da fonte E_s e frequência	$E_s = 138 \text{ kV}$ $f_s = 60 \text{ Hz}$
Temporizadores do MCC	OSBD = 6 ciclos e OSTD = 3 ciclos.

É importante destacar que, utilizando-se $\left| \frac{dz}{dt} \right|$ fixa, não é possível relação direta com a frequência de escorregamento para definição de casos para simulação. Nos métodos em que são utilizados temporizadores para medição de tempo entre *blindings*, como o MCC implementado, a utilização deste modelo tem cunho prático. Uma vez conhecida a distância ôhmica entre os *blindings*, e os ajustes OSBD e OSTD, o cálculo da velocidade é direto. Entretanto, já para o MVTCE que não utiliza este princípio de funcionamento, a definição de velocidades adequadas pode não ser analiticamente realizada. Neste contexto, é razoável a utilização das velocidades obtidas para o MCC, considerando que se deseja obter o mesmo comportamento nos métodos.

Verifica-se, então, que este modelo é essencialmente destinado à validação dos algoritmos de relés e não para avaliação do fenômeno, pois as oscilações simuladas não são realísticas, como aquelas obtidas no sistema de duas máquinas.

5.3.1 Oscilações de potência estáveis com trajetórias editáveis

Uma maneira usual para definição de trajetórias de oscilações estáveis é possibilitar que a impedância atinja zonas de atuação, mas que retorne a uma condição de carga, que pode ou não ser a mesma inicial. Nas simulações a seguir foram definidos quatro pontos (A, B, C e D) de impedâncias no plano RX, sendo eles $\dot{Z}_A = 50 + j10 \Omega$, $\dot{Z}_B = 10 + j10 \Omega$, $\dot{Z}_C = 10 + j40 \Omega$ e $\dot{Z}_D = 50 + j40 \Omega$. As velocidades dos três segmentos de retas (\overrightarrow{AB} , \overrightarrow{BC} e \overrightarrow{CD}) podem ser diferentes, porém, nas simulações a seguir

é utilizada uma única velocidade para toda a trajetória. Considerou-se ainda, que a impedância ficou no ponto \dot{Z}_A durante 0,5 s, apenas para simulação da condição de carga.

A distância ôhmica entre os *blindings* depende da trajetória em que ocorrerá a entrada da impedância. No caso de trajetória perpendicular entre *blindings* circulares concêntricos, o cálculo é simples, bastando-se apenas calcular a diferença entre os raios. Todavia, nos casos de trajetórias não-perpendiculares, é mais fácil visualizar no plano RX os interceptos da reta de entrada com os *blindings*, e assim calcular a distância. A trajetória utilizada nas simulações intercepta o *blinding* externo no ponto $\dot{Z}_{BE} = 39,93 + j10,01 \Omega$ e o *blinding* interno no ponto $\dot{Z}_{BI} = 23,66 + j10,01 \Omega$. Assim a velocidade máxima para oscilações estáveis é dada por:

$$\left| \frac{d\dot{z}}{dt} \right|_{\text{máx estável}} = \frac{|\dot{Z}_{BE} - \dot{Z}_{BI}|}{OSBD} = \frac{16,27}{6 \cdot \left(\frac{1}{60}\right)} = 162,7 \Omega/s \quad (5.3)$$

Na Tabela 11 são apresentados os resultados para bloqueio do MCC e MVTCE para velocidades de impedância até 160 Ω/s , limite real identificado nas simulações.

Tabela 11 – Casos simulados para oscilações estáveis com trajetória editável.

CASO	Tempo total da simulação (s)	$\left \frac{d\dot{z}}{dt} \right $ (Ω/s)	Instante do bloqueio (s) MCC	Instante do bloqueio (s) MVTCE	Funcionamento correto	
					MCC	MVTCE
89	7,833	15	2,266	2,717	SIM	SIM
90	4,167	30	1,386	1,613	SIM	SIM
91	2,944	45	1,093	1,245	SIM	SIM
92	2,333	60	0,946	1,061	SIM	SIM
93	1,967	75	0,859	0,950	SIM	SIM
94	1,722	90	0,800	0,876	SIM	SIM
95	1,548	105	0,758	0,824	SIM	SIM
96	1,417	120	0,727	0,784	SIM	SIM
97	1,315	135	0,702	0,754	SIM	SIM
98	1,233	150	0,683	0,729	SIM	SIM
99	1,188	160	0,671	0,715	SIM	SIM

Na Figura 5.19 é apresentada a trajetória da impedância referente ao caso 98, e na Figura 5.20 o *log* de eventos do MCC. Analisando-se os tempos identificados, é possível constatar a correta relação entre a trajetória definida e a correta identificação pelo MCC.

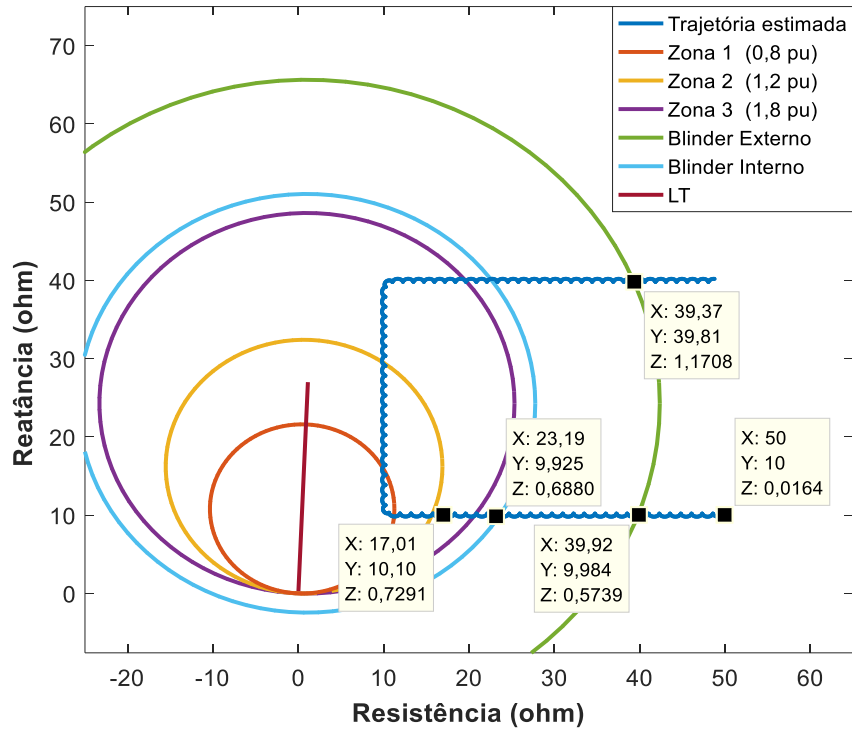


Figura 5.19 – Trajetória da impedância vista pelo *loop* AT para o caso 98, cujas coordenadas X, Y e Z referem-se respectivamente às grandezas: resistência, reatância e tempo

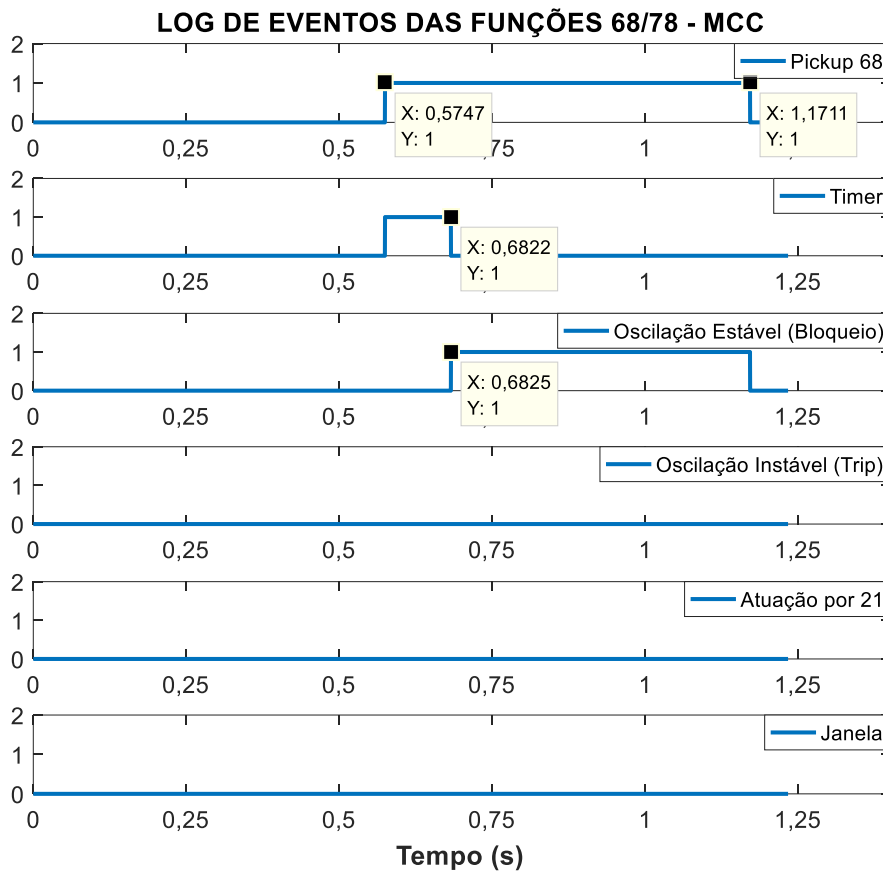


Figura 5.20 - Log de eventos do MCC para o caso 98.

Por meio da oscilografia gerada para o caso 98, apresentada na Figura 5.21, é possível identificar que após 0,5 s da condição de carga é iniciada a oscilação de potência, tendo elevação de corrente. Já a tensão, como o equivalente possui impedância suficientemente baixa, permanece quase inalterável durante a oscilação, tendo valor quase igual à fonte E_s . Por ser um fenômeno equilibrado, o comportamento das três fases é similar, tendo apenas o deslocamento angular de 120° entre si.

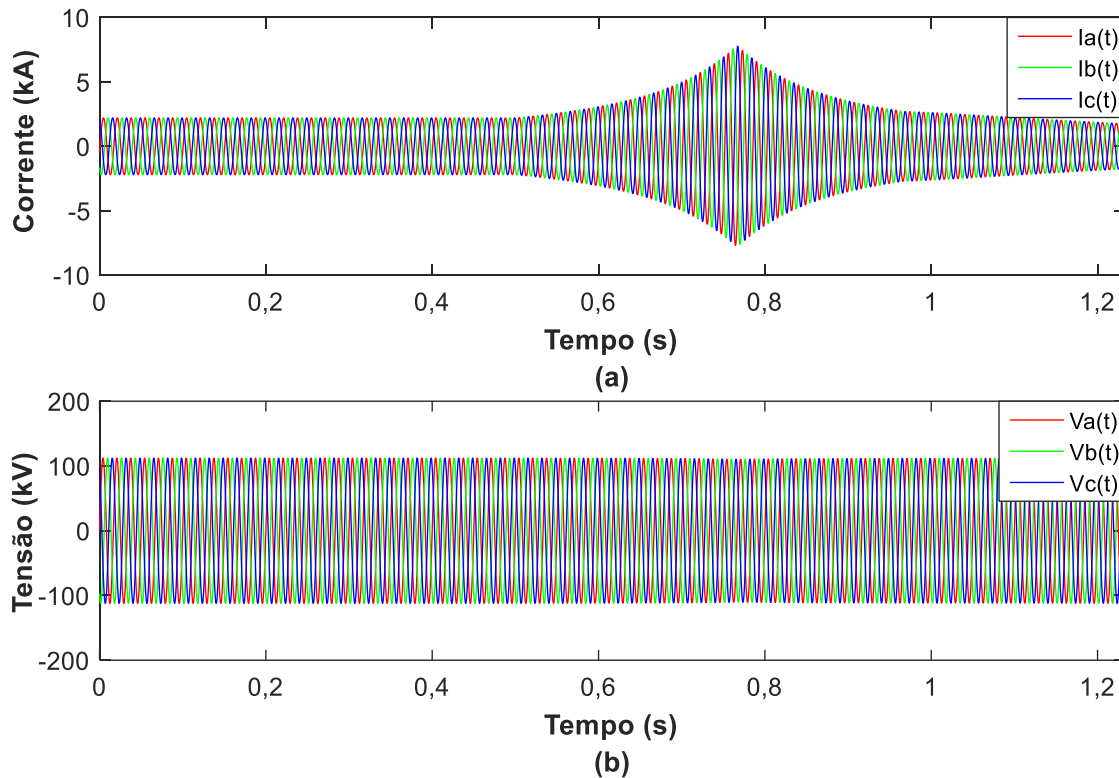


Figura 5.21 - Sinais instantâneos gerados de corrente (a) e tensão (b) para o caso 98.

Com base nas simulações realizadas foi possível identificar que a estimação fasorial da velocidade da impedância começa a apresentar pequenas oscilações em torno do valor definido quando em velocidades mais elevadas. Nas quinças observadas nas trajetórias, como há um deslocamento não realístico da direção, percebe-se também um transitório da velocidade. A ilustração destas constatações é feita na Figura 5.22 referente à velocidade estimada para o caso 98.

É importante destacar que a utilização de um filtro *Butterworth* sobre o fasor velocidade de impedância estimado, elimina parcialmente os ruídos, mas não traz melhorias significativas na atuação do bloqueio ou *trip* por 78. Analisando-se manuais de

relés de proteção, não foi encontrada informação sobre esse tratamento do sinal, o que a princípio deve demandar mais processamento, quando embarcado em *hardwares*. Dessa forma, optou-se nesse trabalho também por não realizar a aplicação do referido filtro, objetivando-se simulações já nos piores cenários (velocidade estimada com ruídos).

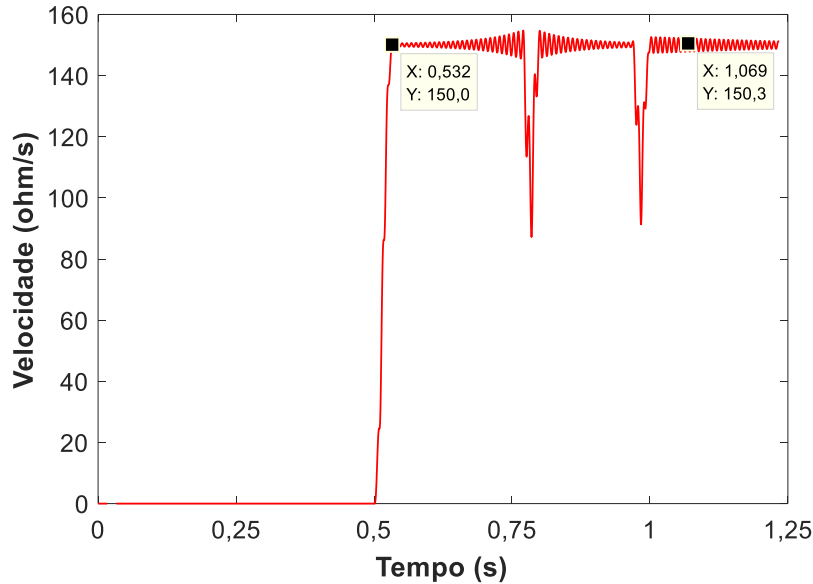


Figura 5.22 - Velocidade da impedância vista pelo *loop* AT para o caso 98.

5.3.2 Oscilações de potência instáveis com trajetórias editáveis

A simulação de oscilações de potência instáveis utilizando o modelo de uma máquina consiste em se definir segmentos de retas que cruzem o eixo das reatâncias, uma vez que neste trabalho o MCC e o MVTCE já efetuam o *trip* por 78 durante o primeiro giro da impedância no plano RX. Nas simulações a seguir foram definidos quatro pontos (A, B, C e D) de impedâncias no plano RX, sendo eles $\dot{Z}_A = 60 + j20 \Omega$, $\dot{Z}_B = 50 + j10 \Omega$, $\dot{Z}_C = -50 + j10 \Omega$ e $\dot{Z}_D = -60 + j20 \Omega$.

De modo semelhante ao item anterior, foi considerada apenas uma velocidade para todos segmentos, e 0,5s de condição de carga inicial. Considerando que a interseção da trajetória com os *blindings* é idêntica à simulada no item anterior, a velocidade máxima para oscilações instáveis é dada por:

$$\left| \frac{d\dot{Z}}{dt} \right|_{\text{máx instável}} = \frac{|\dot{Z}_{BE} - \dot{Z}_{BI}|}{OSTD} = \frac{16,27}{3 \cdot \left(\frac{1}{60}\right)} = 325,4 \Omega/s \quad (5.4)$$

Na Tabela 12 são apresentados os resultados para bloqueio do MCC e MVTCE para a faixa de velocidades de impedância de 175 Ω/s até 320 Ω/s , que caracteriza oscilações instáveis. O limite real identificado nas simulações foi de 320 Ω/s , sendo que a partir desta o MCC já considera o evento com atuação por 21.

Tabela 12 – Casos simulados para oscilações instáveis com trajetória editável.

CASO	Tempo total da simulação (s)	$\left \frac{dz}{dt} \right $ (Ω/s)	Instante do <i>trip</i>	Instante do	Funcionamento	
			por 78 (s) MCC	<i>trip</i> por 78 (s) MVTCE	MCC	MVTCE
100	1,233	175	0,738	1,092	SIM	SIM
101	1,175	190	0,720	1,046	SIM	SIM
102	1,126	205	0,704	1,007	SIM	SIM
103	1,083	220	0,691	0,973	SIM	SIM
104	1,046	235	0,679	0,944	SIM	SIM
105	1,013	250	0,669	0,917	SIM	SIM
106	0,984	265	0,659	0,895	SIM	SIM
107	0,958	280	0,651	0,874	SIM	SIM
108	0,935	295	0,644	0,856	SIM	SIM
109	0,914	310	0,637	0,839	SIM	SIM
110	0,901	320	0,633	0,828	SIM	SIM

A trajetória da impedância referente ao caso 110 é apresentada na Figura 5.23, sendo plenamente realizada conforme parametrização dos pontos ABCD especificados. Os pontos identificados no plano correspondem aos instantes de bloqueio ($t = 0,6555$ s) e *trip* por 78 (= 0,8284 s) pelo MVTCE, os quais também podem ser confirmados pelo log de eventos do caso 110, mostrado na Figura 5.24.

Em todos os casos simulados ocorreu o *trip* por 78 adequadamente, sendo no *blinder* interno, pelo MCC, e no *blinder* externo pelo MVTCE. Destaca-se, contudo, que para a emissão do sinal de *trip* por 78 no MVTCE faz-se necessário o bloqueio, por meio do sinal OSB_1, devendo este ocorrer antes da atuação das zonas de proteção, a fim de que ao cruzar o eixo das reatâncias as unidades 21 estejam bloqueadas. Este fato foi verificado para os casos simulados, tendo comportamento satisfatório. Constatou-se ainda que o MVTCE possibilitou o bloqueio até velocidades próximas a 830 Ω/s , condição em que o *trip* por 78 foi possível. Acima desta velocidade, as funções 68/78 não mais operaram, ficando a cargo das unidades de distância a detecção do evento, que de acordo com os ajustes utilizados nestas simulações, caracteriza-se como falta.

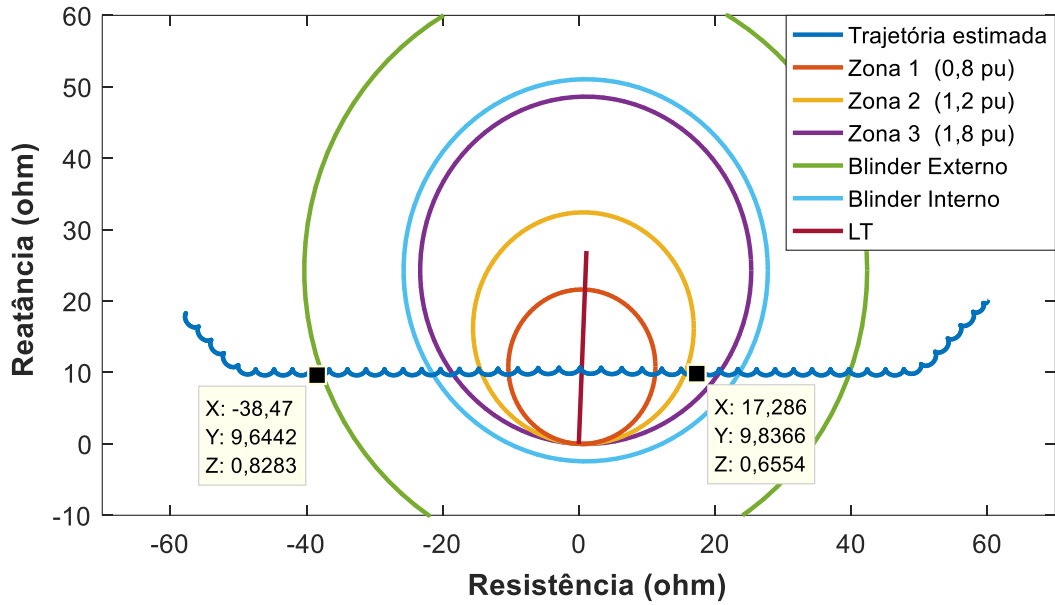


Figura 5.23 - Trajetória da impedância do caso 110, cujas coordenadas X, Y e Z referem-se respectivamente às grandezas: resistência, reatância e tempo

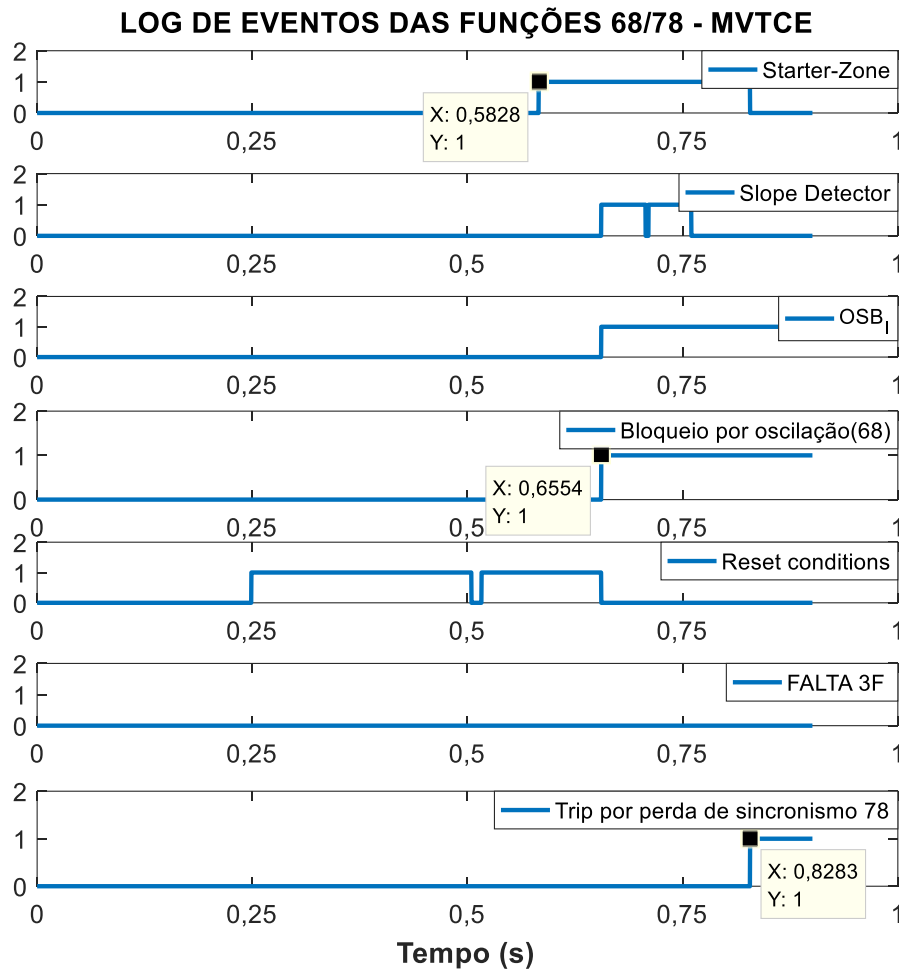


Figura 5.24 – Log de eventos do MVTCE para o caso 110.

6 Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1 Conclusões

6.1.1 *Caracterização do fenômeno*

Quando uma linha de transmissão é submetida à uma oscilação de potência, os relés instalados em seus terminais identificam flutuações nos fasores tensão e corrente, propiciando alternância cíclica na direcionalidade do fluxo de potência ativa, tendo apenas componentes de sequência positiva. Os sinais instantâneos de corrente, tensão e potência apresentam modulação em amplitude, constituída por uma envoltória pulsante, cuja frequência é dada pelo escorregamento em relação à frequência síncrona.

Por se tratar de um transitório eletromecânico, sua ocorrência no sistema elétrico depende da inércia associada à massa girante, pois a variação de frequência de uma ou mais máquinas síncronas afetadas pelo desequilíbrio carga-geração caracteriza-se como a principal causa do fenômeno.

Verificou-se que embora a trajetória da impedância vista pelo relé possa alcançar as zonas de atuação da função 21 durante o fenômeno, tendo em vista o ângulo máximo de deslizamento alcançado, sua velocidade é substancialmente inferior à de curtos-circuitos, sendo este um critério tradicional para detecção de oscilações de potência. Destaca-se ainda que a ocorrência de oscilações numa dada linha depende das impedâncias e tensões de seus equivalentes, os quais influenciam na formação do centro elétrico. Durante oscilações instáveis, a trajetória da impedância cruza a linha de transmissão no plano RX, passando pelo centro elétrico do sistema, com velocidade mínima. Neste instante, a direcionalidade do fluxo de potência ativa é invertida, tendo comportamento senoidal nos casos de sistema puramente indutivo.

Assim, a velocidade da impedância e a potência ativa mostraram-se como as principais grandezas que caracterizam o fenômeno, sendo então relevantes para algoritmos destinados ao bloqueio e disparo por oscilação de potência.

6.1.2 Modelos para geração de sinais de oscilação de potência

Dois modelos foram equacionados neste trabalho, sendo eles: o sistema de duas máquinas, constituído de uma linha de transmissão separada por dois equivalentes, e o modelo de uma máquina, que contempla apenas uma linha e um equivalente.

O equacionamento do circuito RL trifásico acoplado, para o modelo de duas máquinas, foi essencial na geração das oscilografias trifásicas, pois permitiu inclusive a geração de faltas, sem descontinuidade em seu transitório, durante oscilações de potência. Assim, nos casos simulados no capítulo 5, todos os tipos de faltas com resistência foram possíveis de realização, utilizando-se a metodologia detalhada no capítulo 3 referente ao cálculo de faltas no domínio do tempo.

As oscilações instáveis geradas com esse modelo foram realizadas simplesmente pela alteração da frequência de uma das fontes, o que também foi possível diretamente no *software* ATP. Entretanto, já para simulações de oscilações estáveis, a parametrização da fonte descrita neste trabalho possibilitou flexibilidade na geração das oscilografias, permitindo ajustes nos tempos da trajetória e ângulos envolvidos, conferindo entendimento e total controle do fenômeno, visto também no plano RX. Esta parametrização da fonte de tensão não é disponível diretamente no ATP, sendo necessária implementação via MODELS ou TACS, podendo-se utilizar as equações apresentadas neste trabalho para expressar o comportamento do ângulo $\delta(t)$ da fonte.

O modelo de uma máquina possibilitou geração de trajetórias editáveis pelo usuário, por meio dos pontos especificados no plano RX e velocidades associadas. Tal modelo foi útil para geração de oscilações estáveis e instáveis, dado que a trajetória pôde ser definida no plano RX objetivando atingir zonas específicas, ou regiões de interesse do bloqueio. Percebe-se ainda, que há uma correlação imediata entre os temporizadores OSBD e OSTD, com a velocidade a ser utilizada no modelo, o que facilita na especificação das velocidades da trajetória para teste do MCC.

Em ambos modelos, ao longo de suas formulações e equacionamentos, foram sendo validadas as soluções numéricas adotadas com as soluções do ATP, obtendo resultados satisfatórios (sobreposição de curvas). A validação das oscilografias geradas se deu ainda por meio das trajetórias da impedância estimadas, pois foi possível verificar a localização da impedância no plano RX em cada instante, e se os parâmetros ajustados foram aceitos, tais como temporizações, ângulos e excursão (caminho), em todos os *loops* de medição, obtendo resultados satisfatórios.

O modelo de duas máquinas é mais realístico em termos de trajetória e velocidade da impedância, e por este fato não possibilita ao usuário especificar diretamente a trajetória da impedância. Logo, quando deseja-se avaliar o comportamento das oscilações de potência em função da frequência de escorregamento da fonte, ou quando deseja-se realizar faltas sem descontinuidade no transitório, o modelo de duas máquinas é indicado.

Já o modelo de duas máquinas é indicado para o levantamento da característica dos *blindings*, pois o usuário pode especificar diretamente as trajetórias em todos os quadrantes do plano RX, e realizar caminhos alternativos da oscilação de potência. Nos casos em que se deseja avaliar os ajustes OSBD e OSTD este modelo também é indicado, pois é possível inserir diretamente os valores de velocidade de impedância, até obter o limiar que faz o algoritmo operar nas ações de bloqueio por 68 ou *trip* por 78.

Assim, os modelos apresentados neste trabalho são complementares e possibilitam a realização de testes sob diversas condições sistêmicas nas funções 68/78, estando elas embarcadas ou não em *hardwares* (relés de proteção físicos).

6.1.3 Algoritmos MCC e MVTCE

Os 110 casos simulados não esgotam as possibilidades de aplicação dos modelos equacionados e dos métodos de bloqueio e disparo por oscilação de potência implementados. Contudo, a filosofia de testes empregada para geração de casos contemplou em sua maioria, as principais ocorrências práticas envolvendo oscilações estáveis e instáveis, inclusive com ocorrências de faltas, o que tem sido fruto de pesquisas em trabalhos recentes.

No geral, percebeu-se o comportamento assertivo dos dois métodos implementados para mais de 90% dos casos simulados. Nas oscilações estáveis, foi identificada atuação correta de ambos métodos, pois o bloqueio ocorreu antes da atuação das zonas de distância. Nestes casos, o MVTCE possibilitou bloqueio poucos milissegundos após o MCC, em função dos ajustes internos de $SCV^{(1)}$ e do módulo de sua derivada $|dSCV_{1s}|$, que devem ser atingidos. Contudo, a diferença observada não impactou no desempenho do método.

Nos casos de faltas trifásicas durante oscilações, o algoritmo de desbloqueio incorporado ao MCC possibilitou detecção em tempos substancialmente inferiores ao MVTCE implementado, tendo valores médios de aproximadamente 50 ms e 90 ms, respectivamente. Isso ocorreu porque no MVTCE a derivada $|dSCV_{1s}(k)|$ apresentou ruídos excessivos durante o período de falta, que culminou em uma demora na estabilização inferior a 0,01. A elevação da resistência de falta proporcionou redução no tempo de desbloqueio em alguns casos no MVTCE, mas no MCC não teve impacto representativo. Vale ressaltar, que nos casos trifásicos, com resistência de falta de 1Ω em cada fase, não foi possível a detecção pelo MVTCE implementado.

As faltas assimétricas durante oscilações de potência foram simuladas apenas no MCC, apresentando tempo de desbloqueio médio inferior a 70 ms. Nos casos com resistência de 100Ω , a detecção não foi possível, pois a impedância deslocou-se para fora de todas as zonas de atuação, fato este já esperado. As oscilações instáveis foram detectadas por ambos os métodos em tempos adequados, até em elevadas frequências de escorregamento próximas a 5 Hz. Contudo, acima deste valor percebeu-se uma demora excessiva do MVTCE para realização do bloqueio, possibilitando atuação pela função 21. A diferença entre faltas e oscilações foi satisfatória para todos os casos simulados, não sendo realizado bloqueio por oscilação de potência ou *trip* por 78, ficando a identificação da falta a cargo das funções de distância 21/21N e outras como 67/67N.

É importante frisar que os métodos implementados não são idênticos àqueles utilizados em relés de proteção, uma vez que foram realizadas simplificações e adaptações devido ao fato de não se dispor de outras funções de proteção previstas nos manuais dos relés. A versão oficial completa do MCC e do MVTCE encontra-se disponível no relé SEL-411L, o qual foi submetido a testes com casos de oscilações geradas em RTDS,

conforme descrito no trabalho de (ALVES et al., 2018). Assim, o comportamento observado dos algoritmos neste trabalho pode diferir se aplicadas as mesmas oscilografias no relé SEL-411L.

Vale destacar que além de apresentar na íntegra os fluxogramas específicos de cada método, foram fornecidas e aplicadas as equações básicas para cálculos dos ajustes de ambos algoritmos, o que contribui para entendimento e controle dos métodos nos diversos casos de oscilações de potência.

6.2 Propostas de Continuidade

Todos os algoritmos desenvolvidos neste trabalho foram implementados no *software* MATLAB[®], que embora muito difundido no ambiente acadêmico, requer licenças para utilização. Assim, almeja-se em trabalhos futuros implementar na plataforma MODELS do ATP todos os algoritmos descritos, de forma a dar abrangência aos modelos para geração de sinais de oscilação de potência, e algoritmos das funções 68-78.

Considerando-se que os modelos equacionados geram oscilografias (*.mat*) que podem ser convertidas em arquivos COMTRADE no ATP, sugere-se a aplicação dos 110 casos simulados neste trabalho no relé SEL-411L em laboratório, comparando-se os tempos de atuação e performance, com aqueles resultados obtidos no capítulo 5.

Em relação à geração de oscilografias, deseja-se ainda a modelagem de um sistema teste com maior número de barras, máquinas síncronas e sistemas de controle, especificando-se detalhes para entrada de dados no ATP, de forma a possibilitar oscilações de potências após curtos-circuitos, desligamentos de cargas e/ou geração. Neste sistema, deseja-se avaliar a atuação das funções 68-78 nos diversos relés envolvidos, demonstrando-se que apenas em algumas linhas será identificado o fenômeno.

Sugere-se ainda a implementação de outros algoritmos não-convencionais das funções 68-78, semelhantes ao de relés comerciais, de forma a possibilitar comparação com o MCC e MVTCE.

Caso sejam disponibilizadas oscilografias reais de oscilação de potência pelos Agentes de Operação, por meio dos arquivos COMTRADES gravados em relés de proteção instalados em subestações de transmissão ou distribuição, sugere-se sua leitura e tomada de decisão pelos algoritmos MCC e MVTCE implementados neste trabalho, em ambiente computacional no MATLAB[®] ou ATP. Dessa forma, pretende-se comparar o funcionamento e performance dos algoritmos implementados com aqueles de relés físicos, para os casos reais de oscilações sistêmicas.

Por caracterizar-se como uma linha recente de pesquisa e de grande importância para o sistema elétrico, sugere-se o desenvolvimento de algoritmos para desbloqueio de faltas simétricas e assimétricas durante oscilações de potência, incorporando o critério de direcionalidade. Logo, além de detectar rapidamente a falta, o algoritmo deverá ser capaz de distinguir se a falta é interna ou externa à LT, contemplando seleção do *loop* de falta e localização.

Referências Bibliográficas

ABB RESEARCH LTD. SU, Bin. JING, Lei. LIU, Qianjin. European Patent Specification EP2304857B2. International application number WO 2010/003282 A1. **Fast Power Swing unblocking method and apparatus for distance protection in power system.** 2008. 59, 60

ABB, Grid Automation Products. **Line distance protection REL650, Version 2.2 IEC, Application manual.** Relion® 650 SERIES. Document ID 1MRK 506 381 –UEN, Revision C, May 2019. 51

ALVES, T. M. T de, et al. **Avaliação do desempenho de diferentes metodologias de aplicação das funções de bloqueio e disparo por oscilação de potência e perda de sincronismo utilizando um simulador digital em tempo real (RTDS).** XIV STPC – Seminário Técnico de Proteção e Controle, Foz do Iguaçu, PR, 2018. 1, 21, 22, 32, 54, 63, 73, 88, 107

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Relatório de Fiscalização RF-ONS-10/2010-SFE.** 2010. 3

BENMOUYAL, G.; HOU, D.; TZIOUVARAS, D. **Zero-Setting Power-Swing Blocking Protection.** Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2005. 63, 68

CHATTERJEE, S.; ROY, B. K. S. **Fast Identification of Symmetrical or Asymmetrical Faults During Power Swings with Dual Use Line Relays.** CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 6, n° 1, March 2020. 59

DOMMEL, H. W. **Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks.** IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, pp. 388-399. 1969. 13, 34, 37, 47

FERNANDES, R. O. et al. **Novas Abordagens de Detecção de Oscilação de Potência Baseadas em Medição Sincronizada de fasores via WAMPAC**. XIV Symposium of Specialists in Electric Operation and Expansion Planning (SEPOPE), Recife –PE, Brasil. 2018. 17

FISCHER N., BENMOUYAL G. et al.; **“Tutorial on Power-Swing Blocking and Out-of-Step Tripping”**. 39TH Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, USA, 16-18 October, 2012. 23

GAZEN, Y. N. **Proteção contra perda de excitação em geradores síncronos: uma nova proposta utilizando o método do cálculo contínuo da impedância aparente**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015. 52

GENERAL ELECTRIC MULTILIN INC (GE Multilin). **D60 Line Distance Relay, UR Series Instruction Manual**. D60 Revision 7.8x (Rev. AH1). 2019. 51

HASHEMI, S. M.; SANAYE-PASAND, M.; SHAHIDEHPOUR, M. **Fault Detection During Power Swings Using the Properties of Fundamental Frequency Phasors**. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, nº 2, March 2019. 58

IEEE PSRC WG D6 - **Power Swing and Out-Of-Step Considerations on Transmission Lines**. Working Group D-6 Report, p.1-59, 2005. 1, 3, 21, 51, 52, 53, 67,

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**, McGraw-Hill, Inc., USA, 1994. 9, 19, 20

LAZARO, C.; MARQUES, J.; MARCHESAN, G.; CARDOSO, G. **Waveform asymmetry of instantaneous current signal based symmetrical fault detection during power swing**. Electric Power Systems Research, nº 155, pp. 340-349, November 2017. 58

LIN, X.; GAO, Y.; LIU, P. **A novel scheme to identify symmetrical faults occurring during power swings.** v. 23, n. 1, p. 73-78, 2008. 24, 25

LIN, X; LI, Z.; WENG, H. **An enhanced power swing simulation model applicable to protective relaying operation behavior analysis based on EMTP software.** Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control, Okayama, 2010, pp. 595-599. 33

MAHAMED, B; FLETCHER, J. E. **Setting-free method for detection of asymmetrical faults during power.** Electric Power Systems Research, nº 181, January, 2020. 9, 59

MARTUSCELLO L.; KRIZIAUSKAS, E.; HOLBACH J. and LU Y. **Tests of distance relay performance on stable and unstable power swings reported using simulated data of the August 14th 2003 system disturbance.** Power Systems Conference, Clemson, SC, 2009, pp. 1-21, doi: 10.1109/PSAMP.2009.5262383. 18

MOONEY, J.; FISCHER, N. **Application Guidelines for Power Swing Detection on Transmission Systems.** 42nd Annual Minnesota Power Systems Conference, Saint Paul, Minnesota, November 7–9, 2006. 62

MORAIS, A. P. de. **Algoritmo de alto desempenho para proteção numérica de linhas de transmissão imune a oscilações de potência.** 182 p. Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012. 32, 52

MENCO, C. A. L. **Método para detecção de oscilação de potência no domínio do tempo.** 101 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018. 25, 52

NARI – NR ELECTRIC CO.,LTD. **PCS-902 Line Distance Relay, Instruction Manual.** Version R3.01. 2018. 52, 57

NERC – North American Electric Reliability Corporation. **Protection System Response to Power Swings**. System Protection and Control Subcommittee. August, 2013. 2, 3 ,23

NERC – North American Electric Reliability Corporation. **PRC-026-1 — Relay Performance During Stable Power Swings**. NERC Standard. 2014. 54

OKOŃ T. and WILKOSZ K. **Setting methods of the impedance type power swing blocking functions applied in distance protections**. Acta Energetica, vol. 3, no. 8, pp. 61-67, Jul. 2011. 23

Operador Nacional do Sistema (ONS). **Relatório de Análise de Perturbação RAP ONS-RE-3-252/2009**. 2009. 2, 3

PATEL, B. **A new technique for detection and classification of faults during power swing**. Electric Power Systems Research, nº 175, June 2019. 58

PATEL, B.; BERA, P.; DEY, S. H. N. **Differential voltage-based fault detection during power swing**. IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 14, pp. 157-165, December 2019. 58

PATEL, B.; BERA, P.; DEY, S. H. N. **A Novel Method to Distinguish Internal and External Faults during Power Swing**. IEEE Transactions on Power Delivery, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3023026. September of 2020. 58

Power Systems Engineering Research Center (PSERC). **Representation, Modeling, Data Development and Maintenance of Appropriate Protective Relaying Functions in Large Scale Transient Stability Simulations**. Final Project Report, Arizona State University, September, 2017. 22

Procedimentos de Rede – Submódulo 11.7 – Proteções de Caráter Sistêmico. Operador Nacional do Sistema (ONS). Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020. 4

Procedimentos de Rede – Submódulo 2.6 – Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações. Operador Nacional do Sistema (ONS). Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2019. 73

ROCHA, R. V. **Algoritmos Recursivos e Não-Recursivos Aplicados à Estimação Fasorial em Sistemas Elétricos de Potência.** Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2016. 16

SALGE, G. S. et al. **Análise das metodologias de detecção de oscilações de potência e verificação do desempenho dos IEDs.** XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, SC, 2011. 32

SIEMENS. **Manual Distance Protection 7SA6 SIPROTEC® 5.** V7.8. Manual N° C53000-G5040-C010-A. 52

SILVA, C. D. L da. **Estimação Fasorial aplicada a relés de proteção numéricos utilizando os métodos de ajuste de curvas e redes neurais artificiais.** Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014. 16

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. **“SEL – 421 Relay Protection and Automation System, Instruct Manual”.** Instruction Manual. Reference Manual. Data Code 20111215. 2011. 51

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. **“SEL – 411L Relay Protection and Automation System, Instruct Manual”.** Protection Manual. Reference Manual. Data Code 20151029. 2015. 52, 57

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. Daqing Hou, Boise. Gabriel Benmouyal. Demetrios Tziouvaras. United States Patet N° US 7,457,088 B2. **Systems and Methods for Protection of Electrical Networks.** 2008. 69, 70, 71, 72, 73

SCHNEIDER ELECTRIC. **MiCOM P54x Current Differential Relay, Technical Manual**. P54x/EN M/J74. Software Version 41 & 51. Hardware Suffix k. 2011. 52

STADHEIM, T. **Implementering av relévern i ATPDraw**. Master thesis. Institutt for elkraftteknikk, Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet, Juni, 2012. 26

VERZOSA, Q. Jr. **Realistic Testing of Power Swing Blocking and Out-of-Step Tripping Functions**. 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2013. 32