

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Henrique dos Reis Paula

Novos Algoritmos para Proteção de Linhas de Transmissão Durante Oscilações de Potência

Belo Horizonte - Minas Gerais

Novembro, 2022

Henrique dos Reis Paula

**Novos Algoritmos para Proteção de Linhas de
Transmissão Durante Oscilações de Potência**

Tese de doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes

Belo Horizonte - Minas Gerais

Novembro, 2022

P324n

Paula, Henrique dos Reis.

Novos algoritmos para proteção de linhas de transmissão durante oscilações de potência [recurso eletrônico] / Henrique dos Reis Paula. - 2022.

1 recurso online (189 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho.

Coorientador: Adriano Peres de Moraes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 174-189.

Bibliografia: f.170-173.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Algoritmos - Teses. 3. Oscilações - Teses. 4. Proteção elétrica - Teses. I. Pereira, Clever. II. Moraes, Adriano Peres de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

"NOVOS ALGORITMOS PARA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DURANTE OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA"

HENRIQUE DOS REIS PAULA

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 04 de novembro de 2022. Por:

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

Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes - (UFSM)

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

Prof. Dr. João Ricardo da Mata Soares de Souza - DEE (UFMG)

Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira - (CEFET MG)

Prof. Dr. Felipe Vigolvinho Lopes - (UFPB)



Documento assinado eletronicamente por **Clever Sebastião Pereira Filho, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 07/11/2022, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Ricardo da Mata Soares de Souza, Professor do Magistério Superior**, em 07/11/2022, às 13:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Gonzaga da Silveira, Usuário Externo**, em 07/11/2022, às 15:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Felipe Vigolvinho Lopes, Usuário Externo**, em 07/11/2022,



às 22:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alberto Resende de Conti, Professor do Magistério Superior**, em 08/11/2022, às 09:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriano Peres de Moraes, Usuário Externo**, em 16/11/2022, às 12:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1858923** e o código CRC **69C99577**.

A Minha esposa Katiana

A minha filha Lara

A minha família

Amo vocês!

Agradecimentos

Agradeço a Deus, sempre presente em todas as etapas de minha vida.

Ao professor Clever Pereira pela oportunidade e orientação.

Aos professores Adriano Peres, Eduardo Gonzaga e Alberto De Conti por estarem sempre disponíveis e pelas importantes orientações.

Aos colegas de estudos, especialmente Johnny Souza Andrade.

Ao meu pai José Bonifácio (*in memoriam*), por ser referência em honestidade e responsabilidade. Esses valores foram essenciais para a conclusão deste estudo.

A minha mãe Maria pelas orações e incentivo. Lembro que no início do ensino fundamental eram horas dedicadas a mim. Concluir as tarefas escolares era um desafio. Mas sempre conseguíamos!

Aos meus irmãos, Fabrício e Amanda, e a minha tia Celeste. O carinho, orações e a presença de vocês ao meu lado tornaram essa caminhada mais leve.

A minha esposa Katiana pelo companheirismo e amor, principalmente nos momentos mais difíceis ao longo deste curso.

A toda minha família e amigos que sempre torceram por mim.

Ao CEFET-MG pelo incentivo à capacitação profissional.

*"We cannot solve our problems with the same
thinking we used to create them."*

Albert Einstein

*"...me fala de coisas bonitas que eu acredito que não deixarão de existir
amizade, palavra, respeito, caráter, bondade, alegria e amor..."*

Milton Nascimento e Fernando Brant

Resumo

Novos Algoritmos para Proteção de Linhas de Transmissão Durante Oscilações de Potência

Autor: Henrique dos Reis Paula

Orientador: Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes

A literatura técnica atual, relativa à proteção de sistema elétricos de potência, tem dado destaque importante ao estudo de oscilações de potência, em especial as oscilações de potência simétricas. Nesses casos, observam-se efeitos iguais, ou aproximadamente iguais, nos sinais trifásicos de tensão e corrente. No entanto, oscilações de potência assimétricas também podem acontecer. Nessas condições é notório o desequilíbrio existente nos sinais trifásicos. Durante qualquer condição de oscilação de potência, simétrica ou assimétrica, a impedância aparente se desloca no plano RX , podendo entrar nas zonas de operação da proteção de distância. Esse é um problema para a proteção de distância, que pode detectar como falta uma condição de oscilação de potência. Para evitar esse mau funcionamento, a função de bloqueio por oscilação de potência deve bloquear a proteção de distância durante oscilações de potência. Contudo, estando a proteção de distância bloqueada, o rápido desbloqueio é necessário se ocorrer um curto-circuito durante a oscilação de potência. Nesse caso, a função de desbloqueio deve detectar a existência da falta e desbloquear a proteção de distância, que eliminará a falta. É nesse contexto de funções complementares, de bloqueio e desbloqueio, que se desenvolve este estudo, sendo propostos dois novos algoritmos. O primeiro algoritmo proposto (ALG-A) é desenvolvido considerando formulação matemática, amplamente encontrada na literatura, utilizada para modelar oscilações de potência simétricas. Logo, o algoritmo proposto ALG-A se limita a este contexto. Já o segundo algoritmo proposto (ALG-B) é desenvolvido a partir de nova formulação matemática, proposta originalmente neste estudo, capaz de modelar condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Portanto, o algoritmo proposto ALG-B se aplica a um amplo contexto, que considera condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas, caracterizando-o como um método de proteção multifunção. É comum aos dois algoritmos propostos (ALG-A e ALG-B) o emprego de solução analítica, também originalmente desenvolvida no escopo deste estudo. É demonstrado que o filtro de Fourier em conjunto com o teorema de Fortescue estimam fasores de sequência negativa durante oscilações de potência. Então, esses fasores podem ser utilizados para detectar oscilações de potência e faltas durante oscilações de potência. Entre as vantagens, cita-se que os algoritmos propostos dispensam estudos sistêmicos complexos para definir ajustes de parametrização. Além disso, demandam baixa frequência de amostragem e utilizam

ferramentas matemáticas comumente encontradas em relés de proteção, como filtros Butterworth, filtro de Fourier e o teorema de Fortescue. Os dois algoritmos são validados inicialmente diante de cenários de testes obtidos a partir do software *Matlab/Simulink*, onde foi modelado um sistema elétrico IEEE-9 Barras. Os resultados mostram que a função de bloqueio atuou corretamente diante de todos os testes realizados. A função de desbloqueio também obteve bom desempenho, se mostrando superior a dois algoritmos disponíveis na literatura. Diante de casos reais de oscilações de potência, entre os algoritmos propostos, apenas o algoritmo proposto ALG-B obteve desempenho totalmente adequado, corroborando com a confiabilidade e segurança deste novo método.

Palavras-chave: Oscilações de potência simétricas, Oscilações de potência assimétricas, Bloqueio por oscilação de potência, Detecção de falta durante oscilações de potência, Proteção de distância.

Abstract

Novel Algorithms for Transmission Line Protection During Power Swings

Autor: Henrique dos Reis Paula

Orientador: Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes

The current technical literature, concerning power system protection, has given emphasis to the study of power swings, especially symmetrical power swings. In such cases, equal or approximately equal effects are observed in the three-phase voltage and current signals. However, asymmetrical power swings can also occur. Under these conditions, the existing unbalance in the three-phase signals is noticeable. During any power swing condition, symmetrical or asymmetrical, the apparent impedance shifts in the RX plane and may enter the operating zones of the distance protection. This is a problem for the distance protection, which can detect a power swing condition as a fault. To avoid this malfunction, the power swing blocking function must block the distance protection during power swings. However, as the distance protection is blocked, fast unlocking is required if a short circuit occurs during power swing. In this case, the unblocking function must detect the existence of the fault and unblock the distance protection, which will clear the fault. It is in this context of complementary functions, blocking and unblocking, that this study is developed, and two novel algorithms are proposed. The first proposed algorithm (ALG-A) is developed considering mathematical formulation, widely found in the literature, used to model symmetrical power swings. Therefore, the ALG-A proposed algorithm is limited to this context. The second proposed algorithm (ALG-B) is developed from a novel mathematical formulation, originally proposed by this study, capable of modeling symmetrical and asymmetrical power swings conditions. Therefore, the ALG-B proposed algorithm applies to a broad context, which considers symmetrical and asymmetrical power swings conditions, characterizing it as a multifunction protection method. Common to both proposed algorithms (ALG-A and ALG-B) is the employment of analytical solution, also originally developed in the scope of this study. It is shown that the Fourier filter and Fortescue's theorem estimates negative sequence phasors during power swings. Then, these phasors can be used to detect power swings and faults during power swings. Among the advantages, it is mentioned that the proposed algorithms do not require complex systemic studies to define parameterization adjustments. In addition, they work with low sampling frequency and use mathematical tools commonly found in protective relays, such as Butterworth filters, Fourier filter and Fortescue's theorem. Both algorithms are initially validated against test scenarios obtained from the software *Matlab/Simulink*, where an

IEEE-9 Bus electrical system was modeled. The results show that the blocking function worked correctly in all tests performed. The unblocking function also performed well, outperforming two other algorithms available in the literature. When analyzing real cases of power swings, among the proposed algorithms, only the ALG-B proposed algorithm performed fully adequately, corroborating the reliability and safety of this novel method.

Keywords: Symmetrical power swings, Asymmetrical power swings, Power swing blocking, Fault detection during power swings, Distance protection.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Plano RX . Trajetória da impedância durante Oscilações de potência: (a) Simétricas. (b) Assimétricas. Z_{CT} não está representado apenas para obter melhor visualização.	43
Figura 2 – Sistema elétrico trifásico de duas máquinas.	44
Figura 3 – (a) e (b) Diagrama fasorial das tensões.	47
Figura 4 – Plano RX . Diagrama de impedância.	47
Figura 5 – Plano RX . A trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_1 , durante uma oscilação de potência simétrica e instável, é uma linha reta.	48
Figura 6 – Trajetória da impedância durante oscilações de potência simétricas e instáveis, considerando $n < 1$, $n = 1$ e $n > 1$	49
Figura 7 – Plano RX . Zona 1 da linha protegida Z_{BC} é afetada por oscilação de potência.	49
Figura 8 – Distribuição de tensão no sistema elétrico da Fig. 2.	50
Figura 9 – Centro elétrico no sistema para $n = 1$. Defasagem angular (δ) entre as fontes de tensão (\dot{E}_S e \dot{E}_R) é igual a 180°	50
Figura 10 – (a) Centro elétrico para $n > 1$. Defasagem angular (δ) menor que 180° . (b) Centro elétrico para $n < 1$. Defasagem angular (δ) maior que 180°	51
Figura 11 – (a) Distribuição de tensão no sistema elétrico da Fig. 2. (b) Defasagem angular (δ) e defasagem angular (δ_L).	52
Figura 12 – Topologia do sistema elétrico IEEE-9 barras.	52
Figura 13 – Plano RX . A trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 que protege a linha (LT_{96}), durante uma oscilação de potência simétrica e instável, é uma linha reta.	53
Figura 14 – Máquinas síncronas (<i>Synchronous Machine Block</i>).	56
Figura 15 – Sistema de excitação (<i>Excitation System Block</i>).	57
Figura 16 – Linhas de transmissão (<i>Distributed Parameters Line block</i>).	58
Figura 17 – Transformadores de potência (<i>Three-Phase Transformer block</i>).	58
Figura 18 – Oscilação de potência simétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.	62
Figura 19 – Oscilação de potência simétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.	62

Figura 20 – Oscilação de potência simétrica e instável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6	63
Figura 21 – Oscilação de potência simétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente. . . .	64
Figura 22 – Oscilação de potência simétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente. . . .	64
Figura 23 – Oscilação de potência simétrica e estável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6	65
Figura 24 – Oscilação de potência assimétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente. . . .	66
Figura 25 – Oscilação de potência assimétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente. . . .	67
Figura 26 – Oscilação de potência assimétrica e instável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6 . Simulação truncada no instante de tempo 1,5 s para possibilitar melhor visualização.	67
Figura 27 – Oscilação de potência assimétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente. . . .	69
Figura 28 – Oscilação de potência assimétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente. . . .	69
Figura 29 – Oscilação de potência assimétrica e estável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6 . Simulação truncada no instante de tempo 1,5 s para possibilitar melhor visualização.	70
Figura 30 – Potência trifásica ativa calculada pelo relé R_9 . Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável. Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável	71
Figura 31 – Potência trifásica reativa calculada pelo relé R_9 . Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável. Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável	72
Figura 32 – Coluna da esquerda: frequências f_9 e f_6 . Coluna da direita: $f_{slip} = f_9 - f_6$. Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável. Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável	73
Figura 33 – Defasagem Angular (δ_L). Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável. Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável	74
Figura 34 – Sistema elétrico trifásico de duas máquinas	77
Figura 35 – Oscilação de potência simétrica. Fasores de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ girantes. (a) Janela de dados 1. (b) Janela de dados 2 (incremento de $23,625^\circ$).	84

Figura 36 – Regime permanente senoidal. Fasores de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ nulos. (a) Janela de dados 1. (b) Janela de dados 2.	85
Figura 37 – Oscilação de potência simétrica e instável (intervalo de tempo 3). Sinais trifásicos de tensão registrados pelo relé R_9	86
Figura 38 – Ângulo do fasor tensão de sequência negativa Φ_{va2} . Destaque em dois instantes diferentes que mostram a característica girante do fasor (onda dente de serra decrescente).	86
Figura 39 – Plano RX . Excursão da impedância durante oscilações de potência simétricas, estável e instável. Característica Mho.	88
Figura 40 – Fluxograma do algoritmo proposto para detectar o padrão de onda dente de serra.	89
Figura 41 – $\phi_{va2(k)}$ e $\Delta\phi_{va2(k)}$ para o primeiro intervalo já mostrado na Fig. 38 (entre 0,8 s e 0,85 s).	90
Figura 42 – Algoritmo proposto ALG-A: Bloqueio e desbloqueio da proteção de distância.	91
Figura 43 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos	93
Figura 44 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos.	93
Figura 45 – Regime permanente senoidal na frequência fundamental ($f_0 = 60$ Hz). Cálculo analítico: (a) $f_1 = f_0$ e (b) $f_1 \approx f_0$	94
Figura 46 – (a) Sinal de tensão registrado na fase C . (b) Frequência f_9 calculada a partir do método de cruzamento por zero (Sorrentino e Carvalho, 2010).	95
Figura 47 – Oscilação de Potência Simétrica e Instável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . As variáveis C_1 e C_2 indicam a posição da impedância Z_{AT} em diferentes momentos que serão aplicadas faltas (próxima seção). (b) Análise de eventos. Bloqueio em 0,5599 s e desbloqueio em 1,066 s.	97
Figura 48 – Oscilação de Potência Simétrica e Instável. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Bloqueio em 0,5599 s e desbloqueio em 1,066 s.	97
Figura 49 – Oscilação de Potência Simétrica e Estável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . A variável C_3 indica a posição da impedância Z_{AT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção). (b) Análise de eventos. Bloqueio em 0,5755 s e desbloqueio em 0,975 s.	98
Figura 50 – Oscilação de Potência Simétrica e Estável. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Bloqueio em 0,5755 s e desbloqueio em 0,975 s.	99

Figura 51 – Cenário de teste 1. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9323 s.	102
Figura 52 – Cenário de teste 1. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9323 s.	102
Figura 53 – Cenário de teste 1. Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Índice de detecção de falta. (c) Derivada dos sinais trifásicos de tensão. Falta detectada no instante 0,93025 s.	103
Figura 54 – Cenário de teste 1. Algoritmo baseado na assimetria dos sinais de corrente (ALG-2). (a) Sinais trifásicos de corrente. (b) Coeficiente de Assimetria de Fischer (CAF). Falta detectada no instante 0,93802 s.	104
Figura 55 – Cenário de teste 7. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,96146 s.	104
Figura 56 – Cenário de teste 7. (a) Sinais de trifásicos de tensão. (b) Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (c) Sinais trifásicos de corrente (d) algoritmo baseado na assimetria dos sinais de corrente (ALG-2). Falha de atuação dos dois algoritmos.	105
Figura 57 – Cenário de teste 13. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Falta durante oscilação de potência de potência não detectada (Falha de atuação).	106
Figura 58 – Cenário de teste 13. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Falta durante oscilação de potência de potência não detectada (Falha de atuação).	106
Figura 59 – Cenário de teste 5. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9349 s.	107
Figura 60 – Cenário de teste 5. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9349 s.	108
Figura 61 – Cenário de teste 5. Componente Contínua e distorções após incidência de falta simétrica. (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.	108
Figura 62 – Cenário de teste 13. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9445 s.	110

Figura 63 – Cenário de teste 13. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9445 s.	111
Figura 64 – Cenário de teste 8. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9443 s.	111
Figura 65 – Cenário de teste 8. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9443 s.	112
Figura 66 – Sistema elétrico trifásico de duas máquinas	116
Figura 67 – Sinais trifásicos registrados pelo relé R_9 . (a) Oscilação de potência Simétrica. (b) Oscilação de potência Assimétrica.	117
Figura 68 – (a) e (b) Regime permanente senoidal, equilibrado ou desequilibrado. $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ é nulo. (c) e (d) Oscilações de potência, simétricas ou assimétricas. $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ gira no sentido horário.	122
Figura 69 – Comportamento durante oscilações de potência. (a) Onda dente de serra decrescente. (b) Diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{ya2}$). (c) $\Delta\Phi_{ya2}$ após eliminar a descontinuidade. (d) Giro no plano cartesiano.	124
Figura 70 – Plano RX . Excursão da impedância durante: (a) oscilações de potência simétricas. (b) oscilações de potência assimétricas. Característica Mho.	125
Figura 71 – Fluxograma: rotina de processamento de dados.	126
Figura 72 – Resposta em frequência. Filtro passa alta do tipo Butterworth com $N = 4$, $f_c = 30$ Hz e $f_s = 1920$ Hz.	127
Figura 73 – $\Delta\Phi_{lim} = -19,125^\circ$ para separar regiões de oscilações de potência e faltas durante oscilações de potência.	129
Figura 74 – Algoritmo proposto ALG-B: bloqueio e desbloqueio da proteção de distância.	129
Figura 75 – Topologia do sistema elétrico IEEE-9 barras.	130
Figura 76 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal equilibrado. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos	132
Figura 77 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal equilibrado. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$	132
Figura 78 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal desequilibrado. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$	134

Figura 79 – Oscilação de potência simétrica e instável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . C_1 e C_2 indicam a posição da impedância Z_{AT} em diferentes momentos que serão aplicadas faltas (próxima seção). (b) Análise de eventos.	135
Figura 80 – Oscilação de potência simétrica e instável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$	136
Figura 81 – Oscilação de potência simétrica e estável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . A variável C_3 indica a posição da impedância Z_{AT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção). (b) Análise de eventos.	137
Figura 82 – Oscilação de potência simétrica e estável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$	137
Figura 83 – Oscilação de potência assimétrica e instável. (a) Trajetória da impedância Z_{CT} no plano RX . A variável C_4 indica a posição da impedância Z_{CT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção). (b) Análise de eventos.	138
Figura 84 – Oscilação de potência assimétrica e instável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$	138
Figura 85 – Oscilação de potência assimétrica e estável. (a) Trajetória da impedância Z_{CT} no plano RX . A variável C_5 indica a posição da impedância Z_{CT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção) (b) Análise de eventos.	139
Figura 86 – Oscilação de potência assimétrica e estável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$	140
Figura 87 – Cenário de teste 1. (a) Sinais Trifásicos de tensão. (b) Ângulo do fasor de sequência negativa (Φ_{va2}). (c) Diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{vA2}$). (d) Fasor girante durante oscilações de potência (entre P_1 e P_2), e fasor estacionário após a falta (entre P_3 e P_4).	142
Figura 88 – Cenário de teste 1. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,7177 s.	143
Figura 89 – Cenário de teste 3. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência.	144
Figura 90 – Cenário de teste 3. Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Derivada dos sinais trifásicos de Tensão. (c) Índice de detecção de falta. Falta não detectada (Falha de atuação).	144

Figura 91 – Cenário de teste 3. Algoritmo baseado na assimetria dos sinais de corrente (ALG-2): (a) Sinais trifásicos de corrente. (b) Coeficiente de Assimetria de Fisher (CAF). Falta não detectada (Falha de atuação).	145
Figura 92 – Cenário de teste 15. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos. Falta não detectada (Falha de atuação).	146
Figura 93 – Cenário de teste 15. Relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente.	147
Figura 94 – Cenário de teste 15. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Falta não detectada (Falha de atuação).	147
Figura 95 – Cenário de teste 15. Relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente.	149
Figura 96 – Cenário de teste 15. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência.	149
Figura 97 – Cenário de teste 10. Relé R_9 . Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Falta não detectada (Falha de atuação).	152
Figura 98 – Cenário de teste 10. Relé R_6 . Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência.	152
Figura 99 – Oscilação de potência simétrica e estável. (a) Sinal de tensão $V_c(k)$. (b) Sinal de ruído $V_c^r(k)$. (c) Sinal contaminado $V_c(k) + V_c^r(k)$. (d) Relação sinal-ruído (SNR).	154
Figura 100 – Oscilação de potência simétrica e estável na presença de ruído (SNR \approx 41 dB). Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Atuação confiável do algoritmo proposto ALG-B.	156
Figura 101 – Oscilação de potência assimétrica e estável na presença de harmônicas e ruído (SNR \approx 41 dB). Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Atuação indevida do algoritmo proposto ALG-B.	156
Figura 102 – Oscilação de potência assimétrica e estável na presença de harmônicas e ruído (SNR \approx 41 dB). (a) Sinal de tensão $V_c(k)$. (b) Destaque no intervalo entre 0,8 e 1 s. (c) Distorção harmônica total (Thd).	157
Figura 103 – Cenário de teste 1. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Destaque para $\Delta\Phi_{lim} = -9,5625^\circ$ ($f_s = 3840$ Hz).	158
Figura 104 – Caso 1 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.	160
Figura 105 – Caso 2 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.	161

Figura 106 – Caso 3 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.	162
Figura 107 – Caso 4 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.	163
Figura 108 – Caso 2 de oscilação de potência real. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . Falha de atuação do ALG-A.	164
Figura 109 – Caso 2 de oscilação de potência real. Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Índice de detecção de falta. Condição de oscilação de potência detectada como falta pelo ALG-1 (Falha de atuação).	165
Figura 110 – Caso 2 de oscilação de potência real. Algoritmo baseado na assimetria da corrente (ALG-2). (a) Sinais trifásicos de Corrente. (b) Coeficiente de Assimetria de Fisher (CAF). Desempenho correto do ALG-2.	165
Figura 111 – Filtro de Fourier não recursivo ($N_a = 4$). (a) Janela de dados no instante $k = 4$. (b) Janela de dados no instante $k = 5$	183
Figura 112 – Correção angular aplicada ao Filtro de Fourier não recursivo ($N_a = 4$). (a) Janela de dados no instante $k = 4$. (b) Janela de dados no instante $k = 5$	184
Figura 113 – Resposta em frequência. Filtro passa alta, tipo Butterworth ($f_s = 1920$ Hz).	186
Figura 114 – Caso 2 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$	188

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Revisão da literatura: Métodos para proteção de linhas de transmissão durante oscilações de potência (OP) Simétricas (S) e Assimétricas (AS)	41
Tabela 2 – Oscilações de potência e respectivos sinais trifásicos.	70
Tabela 3 – Oscilação de potência simétrica. Fasores estimados para duas janelas de dados.	84
Tabela 4 – Regime permanente senoidal. Fasores estimados para duas janelas de dados.	85
Tabela 5 – Local da Impedância no instante da Falta durante oscilações de potência simétricas.	100
Tabela 6 – Avaliação do relé R_9 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.	100
Tabela 7 – Avaliação do relé R_6 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.	109
Tabela 8 – Local da Impedância no instante da Falta durante oscilações de potência simétricas.	140
Tabela 9 – Avaliação do relé R_9 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.	141
Tabela 10 – Avaliação do relé R_6 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.	148
Tabela 11 – Local da Impedância no instante da Falta durante oscilações de potência assimétricas.	150
Tabela 12 – Avaliação do relé R_9 e R_6 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência assimétricas.	151
Tabela 13 – Revisão da literatura: Métodos para proteção de linhas de transmissão durante oscilações de potência (OP) Simétricas (S) e Assimétricas (AS)	176
Tabela 14 – Geradores Síncronos	177
Tabela 15 – Sistema elétrico IEEE-9 Barras. Condições Iniciais dos Geradores: Oscilações de Potência Simétricas	177
Tabela 16 – Sistema elétrico IEEE-9 Barras Modificado. Condições Iniciais dos Geradores: Oscilações de Potência Assimétricas	178
Tabela 17 – Sistema de Excitação	178

Tabela 18 – Parâmetros dos Transformadores de Potência	178
Tabela 19 – Cargas	178
Tabela 20 – Parâmetros das Linhas de Transmissão em pu	178
Tabela 21 – Parâmetros das Linhas de Transmissão em unidades elétricas	179

Lista de Abreviaturas e Siglas

ALG-A	Algoritmo originalmente proposto por este estudo no capítulo 5
ALG-B	Algoritmo originalmente proposto por este estudo no capítulo 6
ALG-1	Algoritmo proposto por Patel (2019)
ALG-2	Algoritmo proposto por Lazaro et al. (2017)
CE	Centro elétrico
CAF	Coefficiente de Assimetria de Fisher
FFT	Transformada rápida de Fourier
NI	Não investigado
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões
ODS	Onda dente de serra
OP	Oscilações de potência
SE	Subestação elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIPD	Número de amostras entre dois picos sucessivos
SNR	Relação sinal-ruído
Thd	Distorção harmônica total

Lista de Símbolos

$ANSI_{68}$	Bloqueio por oscilação de potência
$C_1, C_2 \dots C_5$	Círculos que indicam posição de faltas no plano RX
$DJ-4, DJ-5, \dots$	Disjuntores
$DJ-6, DJ-9$	
\dot{E}_S, \dot{E}_R	Fonte de tensão: modelo de máquina equivalente
$E_{xy}(k)$	Coefficiente associado a parte real do fasor de fase
f_c	Frequência de corte
f_s	Frequência de amostragem
f_{slip}	Frequência de escorregamento
$F_{xy}(k)$	Coefficiente associado a parte imaginária do fasor de fase
F_k	Fator de segurança menor que 1
f_0	Frequência fundamental
f_1, f_2, \dots	Frequência calculada no barramento
f_6, f_9	
$\dot{F}_1^-(t_i)$	Fasor calculado no instante t_i
$\dot{F}_2^-(t_f)$	Fasor calculado no instante t_f
\dot{I}_x	Fasor de fase: corrente
\dot{I}_{a0}	Fasor de corrente de sequência zero
k	Passo de amostragem
k_0	Fator de compensação de sequência zero
$LT_{54}, LT_{96}, LT_{98}$	Linhas de transmissão

N_a	Número de amostras em um ciclo da frequência fundamental
ODS_y	Padrão de onda dente de serra
P	Potência trifásica ativa
Q	Potência trifásica reativa
R_1, R_6, R_9	Relé de proteção
S	Potência trifásica complexa
t_i	Tempo de início da janela de dados
t_f	Tempo final da janela de dados
$\dot{V}_x, \dot{V}_A^{R2}, \dots$	Fasor de fase: tensão
$\dot{V}_C^{R6}, \dot{V}_C^{R9}$	
x	Variável que representa as fases A , B e C
y	Variável que pode ser tensão (v) ou corrente (i)
Y	Variável que pode ser tensão (V) ou corrente (I)
$y_x(k)$	Sinal discretizado
$\dot{Y}_x(k)$	Fasor de fase
Y_0, Y_1	Valores de pico: condições equilibradas
Y_{x0}, Y_{x1}	Valores de pico: condições equilibradas e desequilibradas
$\dot{Y}_{a2}(t_f)$	Fasor de sequência negativa
Z_{xT}	Impedância no loop de terra
Z_{LT}	Impedância da linha de transmissão
Z_{LT0}	Impedância de sequência zero da linha
Z_p	Zona de partida do relé de distância
Z_S, Z_R	Impedância: modelo de máquina equivalente
Z_T	Impedância total do sistema
Z_1	Zona 1 do relé de distância
Z_2	Zona 2 do relé de distância

α_{y0}, α_{y1}	Ângulo de fase
δ	Defasagem angular entre duas fontes
δ_L	Defasagem angular entre tensões medidas nas extremidades da linha de transmissão
$\delta_{L1}, \delta_{L2}, \dots$	Ângulo da tensão calculada no barramento
δ_{L6}, δ_{L9}	
$\Delta\Phi_{ya2}$	Diferença entre dois ângulos consecutivos
$\Delta\Phi_{yA2}$	Diferença entre dois ângulos consecutivos: dados filtrado
Δt	Intervalo de tempo entre duas amostras
$\Delta\Phi_{lim}$	Valor limite para separar faltas e oscilações de potência
$\Delta\Phi_{vi}$	Diferença entre dois ângulos consecutivos: calculo analítico
$\Delta\Phi_{vi}^c$	Valor central calculado a partir de $\Delta\Phi_{vi}$
μ	Média
σ	Desvio padrão
θ_x	Deslocamento angular
Φ_{ya2}	Ângulo do fasor de sequência negativa
X	Variável aleatória que segue distribuição gaussiana
ω^-	Frequência angular do fasor de sequência negativa obtido durante oscilações de potência

Sumário

1	Introdução	30
1.1	Considerações Iniciais	30
1.2	Contribuições e Objetivos	32
1.2.1	Contribuições	32
1.2.2	Objetivos	32
1.3	Organização do Texto	33
1.4	Produção Bibliográfica	34
2	Revisão da Literatura	35
2.1	Função de Bloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas	35
2.2	Funções de Bloqueio e Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas	36
2.3	Função de Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas	37
2.4	Função de Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas	38
2.5	Função de Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Assimétricas	39
2.6	Contextualização Entre os Métodos Disponíveis na Literatura Técnica e os Algoritmos Propostos	39
3	Oscilações de Potência: Estudo Baseado em Soluções Analíticas	42
3.1	Oscilações de Potência: Caracterização quanto ao Plano RX	42
3.2	Trajetória da Impedância, Vista pelo Relé de Distância, no Plano RX : Solução Analítica	43
3.2.1	Centro Elétrico (CE)	49
3.3	Exemplo de Aplicação: Sistema Elétrico IEEE-9 Barras	52
3.4	Considerações Finais	54
4	Oscilações de Potência: Estudo Baseado em Simulações	55
4.1	Modelagem do Sistema Elétrico IEEE-9 Barras no Software <i>Matlab/Simulink</i>	55
4.1.1	Máquinas Síncronas (<i>Synchronous Machine</i>)	56
4.1.2	Sistema de Excitação (<i>Excitation System</i>)	57
4.1.3	Linhas de Transmissão (<i>Distributed Parameters Line</i>)	57
4.1.4	Transformadores de potência (<i>Three-Phase Transformer</i>)	58
4.2	Filtro de Fourier e a Impedância Vista pelo Relé de Distância	59
4.3	Oscilações de Potência: Caracterização quanto ao Plano RX	60
4.3.1	Oscilação de Potência Simétrica e Instável	61
4.3.2	Oscilação de Potência Simétrica e Estável	63
4.3.3	Oscilação de Potência Assimétrica e Instável	65
4.3.4	Oscilação de Potência Assimétrica e Estável	68

4.4	Análise das Principais Grandezas Elétricas que Caracterizam Oscilações de Potência	70
4.4.1	Potências Trifásicas Ativa e Reativa	71
4.4.2	Frequência	72
4.4.3	Defasagem Angular	74
4.5	Considerações Finais	75
5	Proteção de Linhas de Transmissão Durante Oscilações de Potência Simétricas	76
5.1	Fundamentos Teóricos	76
5.1.1	Sinais Trifásicos de Tensão e Corrente Durante Oscilações de Potência Simétricas	77
5.1.2	Filtro de Fourier e o teorema de Fortescue: Análise no domínio do tempo contínuo	77
5.1.3	Análise Gráfica do Fasor Girante de Sequência de Negativa	83
5.1.4	Considerações a Respeito dos Fasores de Sequência Negativa Estimados Durante Oscilações de Potência Simétricas	85
5.2	Algoritmo Proposto	88
5.2.1	Algoritmo Proposto para Detectar o Padrão de Onda Dente de Serra (ODS)	88
5.2.2	Algoritmo Proposto para Bloqueio e Desbloqueio da Proteção de Distância (ALG-A).	90
5.3	Resultados: Cenários de Testes Obtidos via Software de Simulação	91
5.3.1	Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-A Considerando a Incidência de Faltas Durante Regime Permanente Senoidal Equilibrado	92
5.3.2	Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-A Diante de Oscilações de Potência Simétricas	96
5.3.2.1	Oscilação de Potência Simétrica e Instável	96
5.3.2.2	Oscilação de Potência Simétrica e Estável	98
5.3.3	Desempenho dos Algoritmos Diante de Faltas Ocorridas Durante Oscilações de Potência Simétricas	99
5.3.3.1	Análise de Desempenho dos Algoritmos Quando Implementados no Relé R_9	99
5.3.3.2	Análise de Desempenho dos Algoritmos Quando Implementados no Relé R_6	109
5.4	Considerações Finais	112
6	Proteção de LTs Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas	114
6.1	Fundamentos Teóricos	115

6.1.1	Sinais Trifásicos de Tensão e Corrente Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas	115
6.1.2	Filtro de Fourier e o Teorema de Fortescue: Análise no Domínio do Tempo Contínuo	117
6.1.3	Seleção de Características do Fasor de Sequência Negativa	119
6.1.4	Análise Gráfica do Fasor Girante de Sequência Negativa	121
6.1.5	Considerações Finais sobre os Fasores de Sequência Negativa Estimados Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas	123
6.2	Algoritmo Proposto	125
6.2.1	Processamento de Dados	125
6.2.2	Algoritmo Proposto para Bloqueio e Desbloqueio da Proteção de Distância (ALG-B)	127
6.3	Resultados: Cenários de Testes Obtidos via Software de Simulação	130
6.3.1	Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Considerando a Incidência de Falhas Durante Regime Permanente Senoidal Equilibrado	131
6.3.2	Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Considerando a Incidência de Falhas Durante Regime Permanente Senoidal Desequilibrado	133
6.3.3	Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Diante de Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas	134
6.3.3.1	Oscilação de Potência Simétrica e Instável	135
6.3.3.2	Oscilação de Potência Simétrica e Estável	136
6.3.3.3	Oscilação de Potência Assimétrica e Instável	136
6.3.3.4	Oscilação de Potência Assimétrica e Estável	139
6.3.4	Desempenho dos Algoritmos Diante de Falhas Ocorridas Durante Oscilações de Potência Simétricas	139
6.3.4.1	Falhas Durante Oscilações de Potência Simétricas: Relé R_9	140
6.3.4.2	Falhas Durante Oscilações de Potência Simétricas: Relé R_6	148
6.3.5	Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Diante de Falhas Ocorridas Durante Oscilações de Potência Assimétricas	150
6.3.6	Análise do Algoritmo Proposto ALG-B sob Condições de Ruído, Harmônicas e Diferentes Frequências de Amostragem	153
6.3.6.1	Ruídos e Harmônicas	153
6.3.6.2	Diferentes Frequências de amostragem	158
6.4	Resultados: Casos Reais de Oscilações de Potência.	159
6.4.1	Análise Comparativa com Outros Métodos.	162
6.5	Considerações Finais	166
7	Conclusões	167
7.1	Propostas de Continuidade	168
7.1.1	Primeira Proposta	168

7.1.2	Segunda Proposta	169
7.1.3	Terceira Proposta	169
7.1.4	Quarta Proposta	169
Referências		170
Apêndice A	Comparação Entre os Métodos: Análise Quantitativa	174
Apêndice B	Parâmetros do Sistema Elétrico IEEE-9 Barras	177
Apêndice C	Modelagem do Sistema Elétrico IEEE-9 Barras no Software <i>Matlab/Simulink</i>	180
Apêndice D	Filtro de Fourier de um Ciclo não Recursivo	182
Apêndice E	Filtro Passa Alta do Tipo Butterworth	186
Apêndice F	Filtro Passa Baixa do Tipo Butterworth aplicado a $\Delta\Phi_{y\alpha 2}$	188

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Oscilações de potência são fenômenos observados em sistemas elétricos de potência, que podem ser causados por variações de carga, chaveamento de linhas, perdas de geração, curtos-circuitos, entre outros. São caracterizadas pela variação do fluxo de potência devido à aceleração ou desaceleração do rotor do gerador em relação à velocidade angular síncrona (Mcdonald e Tziouvaras, 2005). Além disso, são classificadas em dois tipos: durante oscilações de potência simétricas são observados efeitos iguais, ou aproximadamente iguais, nos sinais trifásicos de tensão e corrente. Já durante oscilações de potência assimétricas é notório o desequilíbrio entre os sinais trifásicos (Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018).

Na literatura técnica atual é predominante o estudo de oscilações de potência simétricas. No entanto, oscilações de potência assimétricas também podem acontecer (Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018). Essa é uma condição específica, normalmente decorrente da abertura monopolar de disjuntores. Essa manobra acontece para eliminar apenas a fase faltosa, mantendo as fases sãs em funcionamento. Após alguns segundos (normalmente entre 1 a 4 s) é realizado o religamento monopolar, buscando restabelecer o fornecimento de potência trifásico. Embora a abertura monopolar possa evitar a completa separação do sistema elétrico, ela pode forçar um grande fluxo de potência nas fases sãs, podendo levar o sistema elétrico para uma condição de oscilação de potência assimétrica. A probabilidade de ocorrência deste fenômeno aumenta consideravelmente em linhas de transmissão fortemente carregadas, conectadas em áreas fracas do sistema de potência (Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018).

Nesse ponto, não importando se é do tipo simétrica ou assimétrica, deve-se ressaltar os efeitos sistêmicos causados por oscilações de potência. Uma vez que são decorrentes da aceleração ou desaceleração dos geradores, durante sua ocorrência será observada, simultaneamente, em diversos barramentos do sistema elétrico, variação de frequência e de amplitude nos sinais trifásicos de tensão e corrente. Isso certamente afetará o desempenho

do sistema de proteção. Por exemplo, é conhecido que a impedância aparente vista pelo relé de distância no plano RX ¹ sofre deslocamento lento e contínuo durante oscilações de potência. Durante esse deslocamento, a trajetória da impedância pode entrar nas zonas de operação da proteção de distância, que poderá atuar indevidamente, detectando como falta uma condição de oscilação de potência. Para evitar esse mau funcionamento, outra função, destinada ao bloqueio por oscilação de potência (ANSI 68), deve impedir a operação da proteção de distância durante oscilações de potência.

No entanto, o ajuste da função de bloqueio não é uma tarefa simples e a maioria dos métodos demandam estudos sistêmicos complexos prévios. Quando a função de bloqueio é ajustada incorretamente ou está desabilitada, a proteção de distância torna-se vulnerável e atuações indevidas podem acontecer durante oscilações de potência.

Para exemplificar, cita-se o blecaute ocorrido no Brasil em 10/11/2009 (ONS, 2009). Nesse caso, a incidência de curtos-circuitos, causados por condições climáticas adversas, próximos a Subestação (SE) Itaberá, e posterior eliminação desse defeito, a partir do desligamento das linhas de transmissão de 765 kV que conectam SE Ivaiporã e SE Itaberá, originou uma condição de oscilação de potência simétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Em decorrência dessa oscilação de potência houve desligamentos de diversas outras linhas de transmissão. Foram registradas atuações das seguintes funções de proteção: sobrecorrente instantânea de neutro (ANSI 50N), perda de sincronismo (ANSI 78), sobretensão temporizada (ANSI 59), proteção térmica (ANSI 49), subtensão (ANSI 27), sobrecorrente temporizada (ANSI 51) e proteção de distância (ANSI 21). Embora todas essas proteções tenham atuado indevidamente, o relatório de análise de perturbação desse caso mostrou que a proteção de distância atuou em pelo menos treze diferentes pontos do sistema elétrico (ONS, 2009). Esse resultado revela que a função de bloqueio por oscilação de potência não atuou, o que pode ser em razão de ajuste incorreto ou por estar desabilitada, normalmente decorrente da dificuldade no seu ajuste. Portanto, esse caso ilustra que a busca por novos métodos de bloqueio é indispensável para aumentar a confiabilidade da proteção de distância durante oscilações de potência.

Ainda nesse contexto, outra função, destinada a realizar o desbloqueio da proteção de distância, tem sido um tema recorrente na literatura técnica atual. Isto é, durante oscilações de potência, mesmo após o bloqueio, podem acontecer curtos-circuitos. Após sua ocorrência, a função de desbloqueio deve detectar a existência da falta e desbloquear a proteção de distância, que eliminará a falta. Vale destacar que alguns cenários de falta são difíceis de detectar, principalmente quando acontecem faltas no momento em que a impedância está próxima ao centro elétrico². Alguns métodos, recentemente publicados na

¹ A expressão "impedância aparente vista pelo relé de distância no plano RX " e a expressão simplificada "impedância vista pelo relé" devem ser entendidas como equivalentes

² Centro elétrico é o ponto onde a impedância intercepta o sistema elétrico durante uma oscilação de potência. Esse conceito será amplamente discutido nos capítulos 3 e 4.

literatura técnica, têm buscado resolver esse problema.

Neste ponto, fica claro que o desempenho da proteção de distância, durante oscilações de potência, depende de funções complementares, como a função para bloqueio por oscilação de potência (ANSI 68) e a função de desbloqueio para detectar faltas durante oscilações de potência. Portanto, é neste contexto que se desenvolve este trabalho.

1.2 Contribuições e Objetivos

1.2.1 Contribuições

É conhecido que os métodos de estimação fasorial apresentam melhores resultados diante de sinais senoidais que oscilam na frequência fundamental. Então, este estudo investiga o desempenho do filtro de Fourier de um ciclo não recursivo, diante de sinais senoidais que oscilam em frequências diferentes da fundamental, como acontece durante oscilações de potência. Assim, a primeira contribuição dada por este estudo pode ser escrita como:

1. é demonstrado, por meio de solução analítica originalmente desenvolvida neste trabalho, que durante oscilações de potência, simétricas e assimétricas, podem ser estimados fasores de sequência negativa girantes.

Outro fato, recorrente na literatura técnica atual, refere-se ao estudo predominante de oscilações de potência simétricas. No entanto, oscilações de potência assimétricas também podem acontecer. Então, a segunda contribuição dada por este estudo pode ser resumida como:

2. é proposto originalmente neste estudo nova formulação matemática capaz de modelar condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas.

1.2.2 Objetivos

A partir das contribuições 1 e 2, anteriormente citadas, são desenvolvidos dois novos algoritmos. O primeiro algoritmo proposto (ALG-A) considera formulação matemática, amplamente encontrada na literatura técnica atual, capaz de modelar apenas condições de oscilações de potência simétricas. A partir dessa formulação, é mostrado que o filtro de Fourier e o teorema de Fortescue estimam fasores de sequência negativa girantes (contribuição 1) durante oscilações de potência simétricas. Já o segundo algoritmo proposto (ALG-B) utiliza nova formulação matemática, capaz de modelar condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas (contribuição 2). A partir dessa nova formulação, é mostrado que o filtro de Fourier e o teorema de Fortescue (contribuição 1) estimam

fasores de sequência negativa durante oscilações de potência simétricas e assimétricas. Nesse caso, é mostrado que a característica girante do fasor de sequência negativa pode ser selecionada.

Conhecendo a característica girante do fasor de sequência de negativa durante oscilações de potência, e respeitando o contexto de aplicação, pode-se dizer que o objetivo deste estudo se concentra em propor dois novos novos algoritmos capazes de:

- realizar o bloqueio da proteção de distância por detecção de oscilação de potência (ANSI 68);
- desbloqueio da proteção de distância por detecção de falta na linha protegida durante oscilações de potência.

As principais vantagens desses algoritmos podem ser citadas como:

- utilizam ferramentas matemáticas comumente encontradas em relés de proteção, como o filtro de Fourier, filtro Butterworth e o teorema de Fortescue;
- demandam baixa frequência de amostragem, o que contribui para um menor esforço computacional, uma vez que as funções de proteção devem ser executadas a cada nova amostra;
- independem de estudos sistêmicos complexos prévios para definir os ajustes de parametrização.

Entre estas vantagens, destaca-se que os ajustes de parametrização dos algoritmos propostos ALG-A e ALG-B são de simples configuração. Isto é, para o ajuste dos algoritmos propostos ALG-A e ALG-B é necessário conhecer apenas a frequência fundamental do sistema elétrico e algumas características do relé de proteção utilizado, como o número de amostras por ciclos e o tipo da característica de operação da proteção de distância (Mho, poligonal, ...). Vale destacar que a maioria dos métodos de bloqueio e desbloqueio disponíveis na literatura técnica dependem de estudos sistêmicos complexos, a ser realizado pelo engenheiro de proteção, para definir o correto ajuste de parametrização dessas funções.

1.3 Organização do Texto

Este estudo está organizado da seguinte maneira.

O presente capítulo contextualiza e apresenta a relevância do tema investigado, além de descrever os objetivos principais.

O Capítulo 2 contempla a revisão bibliográfica, onde são abordadas as principais características e limitações dos trabalhos publicados nessa área de pesquisa. Nessa etapa já poderá ser notada a superioridade do algoritmo proposto ALG-B, em relação aos outros métodos disponíveis na literatura técnica atual.

No Capítulo 3 é apresentado um estudo conceitual e analítico, que busca caracterizar oscilações de potência de acordo com a trajetória da impedância no plano RX .

Já o Capítulo 4, por meio de resultados obtidos via software de simulação, caracteriza oscilações de potência simétricas e assimétricas, observando a trajetória da impedância no plano RX , variação de frequência, potência trifásica e defasagem angular (ângulo de potência).

O Capítulo 5 apresenta o algoritmo proposto ALG-A, capaz de realizar funções de bloqueio e desbloqueio no contexto de oscilações de potência simétricas. Também estão contemplados os resultados obtidos a partir desse algoritmo.

Já no Capítulo 6 é desenvolvido o algoritmo proposto ALG-B, um método de proteção multifunção, capaz de realizar funções de bloqueio e desbloqueio no contexto de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Os resultados obtidos a partir desse algoritmo também são apresentados.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões gerais do trabalho, assim como, propostas de continuidade.

1.4 Produção Bibliográfica

Este estudo gerou a publicação do seguinte artigo:

- Paula, H.; Pereira, C. S.; De Conti, A.; Morais, A. P.; Silveira, E. G.; Andrade, J. S. Rotating Negative-Sequence Phasors for Blocking and Unblocking the Distance Protection During Power Swings. *Electric Power Systems Research*, 202, August 2021. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107554>

Além disso, um novo artigo já foi escrito e estará sendo submetido nos próximos meses em periódico de relevância. Vale destacar que o conteúdo desse novo artigo se concentra na metodologia desenvolvida no Capítulo 6.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

É conhecido que a função de bloqueio por detecção de oscilações de potência (ANSI 68), e a função de desbloqueio por detecção de falta durante oscilações de potência, são essenciais para aumentar a confiabilidade e segurança da proteção de distância (ANSI 21). Entre os algoritmos disponíveis na literatura, alguns podem ser capazes de realizar essas duas funções complementares (bloqueio e desbloqueio). No entanto, a maioria se limita a uma função específica (bloqueio ou desbloqueio). Com relação ao contexto de aplicação, o desempenho dessas funções é predominantemente investigado durante oscilações de potência simétricas. Poucos algoritmos têm sido investigados durante oscilações de potência assimétricas. Estas questões serão evidenciadas neste capítulo por meio da revisão bibliográfica realizada, que está organizada da seguinte maneira:

- seção 2.1 - função de bloqueio durante oscilações de potência simétricas;
- seção 2.2 - funções de bloqueio e desbloqueio durante oscilações de potência simétricas;
- seção 2.3 - função de desbloqueio durante oscilações de potência simétricas;
- seção 2.4 - função de desbloqueio durante oscilações de potência simétricas e assimétricas;
- seção 2.5 - função de desbloqueio durante oscilações de potência assimétricas.

Esses itens serão comentados separadamente a seguir.

2.1 Função de Bloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas

Em [Mcdonald e Tziouvaras \(2005\)](#), [Andrade \(2020\)](#) e [Morais \(2012\)](#) podem ser encontrados métodos, convencionais e não convencionais, destinados a realizar a função de

bloqueio durante oscilações de potência simétricas. Entre os métodos convencionais, cita-se o método das características concêntricas e o método do duplo blinder, que basicamente monitoram o tempo de deslocamento da impedância por uma região delimitada no plano RX . Já métodos não convencionais independem do tempo de deslocamento e, entre eles, podem ser citados o método do cálculo contínuo da impedância, o método da tensão do centro elétrico e o método baseado em sincrofasores. Algumas aplicações dessas técnicas podem ser encontradas em relés comerciais (ABB, 2019; GE, 2019; Schweitzer, 2011).

Da mesma forma, na literatura técnica, a função de bloqueio também é amplamente investigada por artigos científicos. Por exemplo, em Lazaro (2018) e Lazaro et al. (2021) é proposto um algoritmo baseado na derivada da potência ativa para detectar oscilações de potência no domínio do tempo. Já em Mooney e Fischer (2006), a partir da estimação de fasores e monitorando a taxa de variação de impedância, é proposta uma técnica de acordo com o método do duplo blinder. Esse método depende de estudos de estabilidade para ajuste das zonas interna e externa. Um outro método, desenvolvido por Kang e Gokaraju (2016), calcula uma máquina equivalente, vista a partir do ponto de medição, e utilizando técnica de cruzamento por zero, a velocidade relativa dessa máquina é monitorada para realizar a função de bloqueio durante oscilações de potência estáveis¹. Contudo, durante oscilações de potência instáveis² esse método não é eficiente. Por fim, vale ressaltar que os métodos citados nessa seção não foram investigados (NI), por seus respectivos autores, diante de casos de oscilações de potência assimétricas. Isso não significa que esses métodos falham. No entanto, não é conhecido o desempenho nessas condições.

2.2 Funções de Bloqueio e Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas

Alguns métodos disponíveis na literatura são capazes de realizar as funções de bloqueio e desbloqueio durante oscilações de potência simétricas. Entre eles, tem-se o método apresentado por Khodaparast e Khederzadeh (2016), que calcula o erro de estimação fasorial para encontrar a localização do círculo concêntrico (método das características concêntricas adaptativas). Outro algoritmo, proposto por Nayak et al. (2010), utiliza fasores e derivadas no tempo para cálculo de tensão do centro elétrico e assim realizar as funções de bloqueio e desbloqueio. Esses dois algoritmos dependem de ajustes de parametrização. Além disso, a função de desbloqueio é eficiente apenas na ocorrência de faltas simétricas³, sendo incapazes de detectar faltas assimétricas⁴.

¹ Durante oscilações de potência estáveis a impedância excursiona pelo plano RX , mas retorna para um novo ponto de equilíbrio. Esse conceito será amplamente discutido nos capítulos 3 e 4.

² Durante oscilações de potência instáveis a impedância excursiona com tendência de giro pelo plano RX . Esse conceito será amplamente discutido nos capítulos 3 e 4.

³ Falta simétrica ou simplesmente falta trifásica.

⁴ Faltas assimétricas podem ser do tipo monofásica, bifásicas ou bifásicas para a terra.

Para superar essa limitação, alguns métodos são desenvolvidos para detectar faltas assimétricas, mantendo a capacidade de detectar faltas simétricas e realizar o bloqueio por oscilação de potência, como antes. Por exemplo, em [Lin et al. \(2010\)](#) é proposto um algoritmo denominado como característica concêntrica modificada, e em [Brahma \(2007\)](#) a transformada Wavelet é combinada com proteção de distância convencional. Embora esses métodos sejam capazes de realizar três diferentes funções, a técnica proposta por [Lin et al. \(2010\)](#) pode apresentar atuação lenta durante oscilações de potência estáveis, enquanto o método proposto por [Brahma \(2007\)](#) depende de alta frequência de amostragem. Outros métodos demandam baixa carga computacional, como a técnica proposta por [Jafari et al. \(2014\)](#), que calcula trajetórias circulares de admitância durante oscilações de potência. Da mesma forma, demandam baixa carga computacional o método proposto por [Tekdemir e Alboyaci \(2014\)](#), que utiliza série de Taylor e derivadas numéricas para estimar amostras futuras dos sinais de corrente e o algoritmo proposto por [Apostolov et al. \(2004\)](#), que se fundamenta no conceito de correntes superpostas. No entanto, esses três métodos anteriores dependem de ajustes de parametrização para correta operação. Por fim, o método desenvolvido por [Rao e Pradhan \(2015\)](#), que se baseia na média móvel dos sinais de corrente por fase, é capaz de realizar bloqueios e desbloqueios durante oscilações de potência. No entanto, a função de desbloqueio pode falhar se o aumento na corrente de falta for pequeno, como acontece quando incidem faltas no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico. Da mesma forma que na seção 2.1, os métodos apresentados nessa seção não são investigados (NI), por seus respectivos autores, diante de oscilações de potência assimétricas.

2.3 Função de Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas

A partir desse ponto, as referências citadas se concentram em realizar a função de desbloqueio. Esse é um tema bastante abordado na literatura atual, onde novos algoritmos são propostos para exclusivamente detectar faltas durante oscilações de potência simétricas. Eles buscam resolver cenários difíceis, como detectar faltas que acontecem no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico. Entre eles, tem-se o método proposto por [Lin et al. \(2008\)](#), que monitora a incidência de faltas calculando a taxa de variação das potências trifásicas instantâneas, ativa e reativa, que são senoidais durante oscilações de potência e tendem ser zero após o início da falta. Em [Mahamedi e Zhu \(2012\)](#), é utilizada FFT⁵ para identificar a componente fundamental (50 ou 60 Hz) da potência ativa trifásica instantânea, que surge após o início da falta. Esses dois algoritmos são propostos para detectar exclusivamente faltas simétricas durante oscilações de potência simétricas. Essa

⁵ Transformada rápida de Fourier, do inglês: Fast Fourier Transform (FFT).

limitação é parcialmente superada por [Mahamedi e Fletcher \(2020\)](#), que utilizam técnica de cruzamento por zero para detectar componentes de 120 Hz na potência ativa trifásica instantânea, gerada após a incidência de faltas assimétricas. No entanto, esse método não é capaz de detectar faltas simétricas.

Alguns métodos são capazes de detectar todos os tipos de faltas (simétricas e assimétricas). Por exemplo, o algoritmo descrito em [Khodaparast e Khederzadeh \(2015\)](#) utiliza transformada de Fourier-Taylor para calcular a diferença entre amostras futuras de corrente e amostras atuais, e assim monitorar transitórios. Da mesma forma, com capacidade de detectar faltas simétricas e assimétricas, o método apresentado em [Rao e Pradhan \(2012\)](#) estima sinais futuros de tensão e corrente para monitorar variações de potência, e o método proposto em [Patel \(2019\)](#) obtém figuras de Lissajous a partir de amostras futuras de corrente e tensão e compara com figuras de Lissajous obtidas a partir de amostras atuais. Esses três métodos anteriores aplicam a técnica dos mínimos quadrados a cada nova amostra, o que exige alto custo computacional. Já o algoritmo desenvolvido por [Pang e Kezunovic \(2010\)](#) calcula componentes de alta frequência, em ondas viajantes induzidas por faltas, através da transformada Wavelet, e o método descrito em [Patel et al. \(2019\)](#) monitora o surgimento de distorções, por meio de derivadas, que ocorrem nos sinais trifásicos após o início da falta. Esses dois algoritmos anteriores requerem alta frequência de amostragem. Em [Musa et al. \(2019\)](#) tem-se um método que se baseia no índice de covariância dos sinais trifásicos de corrente. Contudo, esse é um método de dois terminais que necessita de dados sincronizados. Outro algoritmo, como o desenvolvido por [Lazaro et al. \(2017\)](#), detecta faltas por meio do coeficiente de assimetria de Fisher aplicado aos sinais trifásicos de corrente. Será mostrado, a partir dos testes realizados neste estudo, que esse método não apresenta bom desempenho diante de faltas que incidem próximas ao centro elétrico. Da mesma forma que nas seções 2.1 e 2.2, os métodos apresentados nessa seção não são investigados (NI), por seus respectivos autores, diante de oscilações de potência assimétricas.

2.4 Função de Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas

Existem alguns métodos de desbloqueio, publicados recentemente na literatura, que são investigados durante condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Esses algoritmos são apresentados a seguir. Por exemplo, em [Hashemi et al. \(2019\)](#) é proposto um algoritmo que monitora incidência de faltas calculando admitâncias e suas variações por meio da FFT. Da mesma forma, FFT é utilizado por [Chatterjee et al. \(2020\)](#) e [Chatterjee e Roy \(2020\)](#). Em [Chatterjee et al. \(2020\)](#) é calculado o produto entre o ângulo do fator de potência e o módulo dos sinais de corrente de sequência positiva, enquanto em

Chatterjee e Roy (2020) é calculado o produto entre admitância e potência para monitorar transitórios. Essas três últimas técnicas, durante a oscilação de potência retornam valores inferiores a um limite predeterminado. Mas, na ocorrência de uma falta, esse limite é superado. Além disso, esses três métodos se definem como livres de ajustes. No entanto, esses limites foram definidos, por seus respectivos autores, a partir de estudos de simulação. Por fim, em Su et al. (2011) é proposto um método que consiste no monitoramento da taxa de variação de impedância para detectar faltas durante oscilações de potência simétricas e assimétricas. Este é um método de atuação lenta, pois, segundo os próprios autores, ele é capaz de atuar com tempo médio de 60 ms.

2.5 Função de Desbloqueio Durante Oscilações de Potência Assimétricas

Ainda nesse contexto da função de desbloqueio, dois algoritmos, capazes de detectar faltas assimétricas, exclusivamente durante oscilações de potência assimétricas, são propostos por Hashemi e Sanaye-Pasand (2018). O primeiro método se baseia no módulo da derivada da corrente de sequência zero e o segundo método combina módulo dos fasores de fase de corrente e tensão para monitorar incidência de faltas. Embora esse trabalho (Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018) apresente ampla caracterização do fenômeno, as duas técnicas de desbloqueio são investigados diante de poucos cenários de testes.

2.6 Contextualização Entre os Métodos Disponíveis na Literatura Técnica e os Algoritmos Propostos

Para superar todas as limitações já discutidas, são propostos neste trabalho dois algoritmos, capazes de realizar as funções de bloqueio e desbloqueio. O primeiro algoritmo proposto (ALG-A) se aplica apenas no contexto de oscilações de potencia simétricas. Já o segundo algoritmo proposto (ALG-B) abrange um contexto maior de aplicação, que inclui condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Na Tabela 1 é mostrado, detalhadamente, o contexto de aplicação dos algoritmos propostos ALG-A e ALG-B, e dos principais algoritmos discutidos neste capítulo. Nesta tabela, o cabeçalho referente às colunas 3 a 9 deve ser entendido como questionamentos a respeito dos algoritmos em análise. Por exemplo, a coluna 4 pode ser compreendida como: o método é capaz de detectar faltas simétricas durante oscilações de potência simétricas? Dessa maneira, é desejável que as linhas referentes às colunas 3 a 9 estejam preenchidas com a palavra SIM, indicando que o método atende todos os requisitos em questionamento.

Portanto, uma análise geral da Tabela 1 revela cinco importantes informações:

- as funções de bloqueio e desbloqueio são predominante investigadas durante oscilações de potência simétricas, conforme pode ser notado nas colunas 3, 4 e 5;
- apenas 6 métodos (enumerados como 22, 23, 24 25, 26 e 28) são testados durante oscilações de potência assimétricas. Vale destacar que eles se limitam a realizar apenas a função de desbloqueio nessas condições, conforme nota-se coluna 7;
- a maioria dos métodos (23 entre os 28 apresentados) são capazes de detectar faltas simétricas durante oscilações de potência simétricas, conforme pode ser notado na coluna 4. De forma geral, esses métodos buscam detectar faltas trifásicas, que incidem no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico. Conforme já mencionado, esses casos são tratados pela literatura técnica como cenários de difícil detecção de falta;
- apenas 12, entre os 28 métodos apresentados, dispensam estudos sistêmicos complexos para definir ajustes de parametrização, conforme pode ser observado na coluna 8;
- conforme pode ser notado na coluna 9, o desempenho dos métodos disponíveis na literatura técnica (métodos 1 a 26) não têm sido investigado (NI) diante de casos reais de oscilações de potência. Este é um teste que possibilita obter resultados mais realísticos dos métodos, uma vez que os sinais trifásicos de tensão e corrente (obtidos a partir de relés digitais de proteção, por exemplo) podem apresentar distorções em sua forma de onda decorrentes de várias condições, como entradas e saídas de cargas, ruídos, harmônicas, entre outros.

Nesse ponto vale destacar o algoritmo proposto ALG-B (enumerado como 28 na Tabela 1). Além de ser capaz de detectar faltas simétricas, ser independente de estudos complexos para definir seus ajustes de parametrização, e ser testado diante de casos reais (já adianta-se que foi obtido desempenho correto diante deste teste), o algoritmo proposto ALG-B demonstra ser um método de proteção multifunção, capaz de realizar as funções de bloqueio e desbloqueio, durante as condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Nenhum outro método, entre os investigados por este estudo, possui essa capacidade multifuncional. Essas características evidenciam a superioridade do algoritmo proposto ALG-B, único a atender satisfatoriamente (SIM) todos os questionamentos realizados na Tabela 1.

Por fim, vale mencionar que é realizado no apêndice A uma análise quantitativa da Tabela 1. É uma maneira de comparar os métodos, de acordo com a interpretação deste autor, considerando pesos ao contrário das palavras SIM, NÃO e NI.

Tabela 1 – Revisão da literatura: Métodos para proteção de linhas de transmissão durante oscilações de potência (OP) Simétricas (S) e Assimétricas (AS)

Nº	Descrição do método	OP Simétrica		OP Assimétrica		*Livre de Ajuste	Casos reais		
		Bloqueio	Desbloqueio Falta		Bloqueio			Desbloqueio Falta	
			S	AS				AS	
1	(Mooney e Fischer, 2006): Convencional duplo blinder	SIM	NÃO	NÃO	NI	NÃO	NI		
2	(Kang e Gokaraju, 2016): Máquina equivalente vista do ponto de medição	SIM	NÃO	NÃO	NI	NÃO	SIM	NI	
3	(Khodaparast e Khederzadeh, 2016): Característica concêntrica adaptativa	SIM	SIM	NÃO	NI	NÃO	NÃO	NI	
4	(Nayak et al., 2010): Tensão do centro elétrico	SIM	SIM	NÃO	NI	NÃO	NÃO	NI	
5	(Lin et al., 2010): Característica concêntrica modificada	SIM	SIM	SIM	NI	NI	NÃO	NI	
6	(Brahma, 2007): Transformada Wavelet	SIM	SIM	SIM	NI	NI	NÃO	NI	
7	(Jafari et al., 2014): Trajetória circular da admitância	SIM	SIM	SIM	NI	NI	NÃO	NI	
8	(Tekdemir e Alboyaci, 2014): Série de Taylor	SIM	SIM	SIM	NI	NI	NÃO	NI	
9	(Apostolov et al., 2004): Correntes superpostas	SIM	SIM	SIM	NI	NI	NÃO	NI	
10	(Rao e Pradhan, 2015): Média móvel dos sinais de corrente	SIM	SIM	SIM	NI	NI	SIM	NI	
11	(Lin et al., 2008): Derivada no tempo das potências trifásicas ativa e reativa	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NI	
12	(Mahamedi e Zhu, 2012): Potência trifásica ativa instantânea	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NI	
13	(Mahamedi e Fletcher, 2020): Monitora 120 Hz na potência trifásica ativa	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NI	
14	(Khodaparast e Khederzadeh, 2015): Transformada de Fourier-Taylor	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NI	
15	(Rao e Pradhan, 2012): Variação de potência	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NI	
16	(Patel, 2019): Figuras de Lissajous	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NI	
17	(Pang e Kezunovic, 2010): Ondas viajantes e transformada Wavelet	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NI	
18	(Patel et al., 2019): Derivada dos sinais trifásicos de tensão	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NI	
19	(Musa et al., 2019): Índice de covariância	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NI	
20	(Lazaro et al., 2017): Coeficiente de assimetria de Fisher	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NI	
21	(Hashemi et al., 2019): Variação de Admitância	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NI	
22	(Chatterjee et al., 2020): Produto entre ângulo do fator de potência e módulo da corrente	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NI	
23	(Chatterjee e Roy, 2020): Produto entre admitância e potência	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NI	
24	(Su et al., 2011): Taxa de variação de impedância	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NI	
25	(Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018)-a: Método $ dI_0/dt $	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NI	
26	(Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018)-b: Método de detecção de falta fase terra	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NI	
27	Algoritmo Proposto ALG-A	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	
28	Algoritmo Proposto ALG-B	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	

NI significa que o método não foi investigado por seu respectivo autor. Isso não significa que esses métodos falham. No entanto, não é conhecido o desempenho nessas condições.

* Nesta tabela o termo livre de ajuste deve ser entendido como: o método é livre (independente) de estudos sistêmicos complexos prévios para definir o seu correto ajuste de parametrização?

Capítulo 3

Oscilações de Potência: Estudo Baseado em Soluções Analíticas

Este capítulo inicia-se conceituando os tipos de oscilações de potência, de acordo com a trajetória realizada pela impedância, no plano RX . Também é descrito um método analítico, útil para determinar a trajetória da impedância no plano RX e retratar condições de oscilações de potência simétricas (Kundur, 1994; Andrade, 2020). Por fim, como exemplo de aplicação, é mostrado o resultado obtido a partir do método analítico diante do sistema elétrico IEEE-9 barras. Os dados desse sistema elétrico estão disponíveis no apêndice B e estão de acordo com Sauer e Pai (1997), e Anderson e Fouad (2002).

3.1 Oscilações de Potência: Caracterização quanto ao Plano RX

Essa seção conceitua oscilações de potência de acordo com a trajetória das impedâncias, vistas por relés de distância, no plano RX . A Fig. 1 mostra o plano RX , onde estão representadas duas zonas de operação da proteção de distância¹ (Z_1 e Z_2) e uma linha de transmissão (Z_{LT}). Para uma melhor visualização estão representadas apenas as impedâncias vistas nos loops² de terra (Z_{AT} , Z_{BT} e Z_{CT}), mas os conceitos descritos a seguir também se aplicam aos loops de fase (Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CA}).

Na Fig. 1 (a) estão ilustradas condições de oscilações de potência simétricas, decorrentes de sinais trifásicos de tensão e corrente perfeitamente equilibrados entre si³,

¹ A expressão "zonas de operação da proteção de distância" e a expressão simplificada "zonas de proteção" devem ser entendidas como equivalentes.

² A denominação "loop" é comumente encontrada em manuais de relés de proteção. Na literatura técnica utiliza-se normalmente a denominação "unidades de proteção".

³ Essa característica (sinais trifásicos perfeitamente equilibrados) tem sido observada diante de casos simulados de oscilações de potência simétricas. A análise de casos reais de oscilações de potência simétricas, realizada neste estudo, tem revelado sinais trifásicos não perfeitamente equilibrados nessas condições. Essas discussões acontecem, respectivamente, nos capítulos 4 e 6.

resultando em impedâncias iguais vistas nos loops de terra ($Z_{AT} = Z_{BT} = Z_{CT}$). Observa-se ainda, na Fig. 1 (a), que oscilações de potência simétricas podem ser de dois tipos, estáveis ou instáveis. De acordo com McDonald e Tziouvaras (2005), oscilações de potência estáveis são definidas por excursões da impedância no plano RX que podem alcançar as zonas de proteção, mas retornam a um novo ponto de equilíbrio fora destas zonas. Já oscilações de potência instáveis são caracterizadas por grandes variações no ângulo de potência (passando por 180°). Nesse caso a impedância vista pelo relé pode atravessar as zonas de proteção, com tendência de giro no plano RX , e não retornar para um novo ponto de equilíbrio.

Já a Fig. 1 (b) ilustra condições de oscilações de potência assimétricas. Nesses casos é conhecido que os sinais trifásicos de tensão e de corrente são desequilibrados entre si, o que gera impedâncias com trajetórias diferentes nos loops de terra ($Z_{AT} \neq Z_{BT} \neq Z_{CT}$). Observa-se ainda na Fig. 1 (b) que oscilações de potência assimétricas também podem ser estáveis ou instáveis.

Oscilação Estável - - -
Oscilação Instável ———

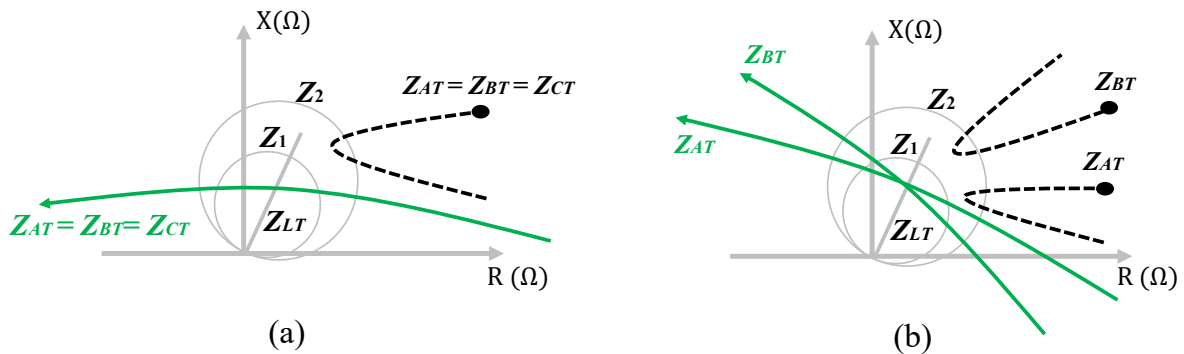


Figura 1 – Plano RX . Trajetória da impedância durante Oscilações de potência: (a) Simétricas. (b) Assimétricas. Z_{CT} não está representado apenas para obter melhor visualização.

3.2 Trajetória da Impedância, Vista pelo Relé de Distância, no Plano RX : Solução Analítica

Conforme já descrito e observado na Fig. 1 (a) e (b), durante oscilações de potência, a impedância vista pelo relé de distância pode entrar em suas zonas de proteção. A seguir, esse efeito é demonstrado a partir de um método analítico simplificado (Kundur, 1994; Andrade, 2020). Para isso, considera-se um sistema elétrico trifásico, composto por duas máquinas modeladas por fontes de tensão (\dot{E}_S e \dot{E}_R), atrás de suas respectivas impedâncias (Z_S e Z_R), e uma linha de transmissão (Z_{LT}), conforme apresentado na Fig. 2. A fonte de tensão \dot{E}_S opera na frequência f_1 e a fonte de tensão de tensão \dot{E}_R opera na frequência

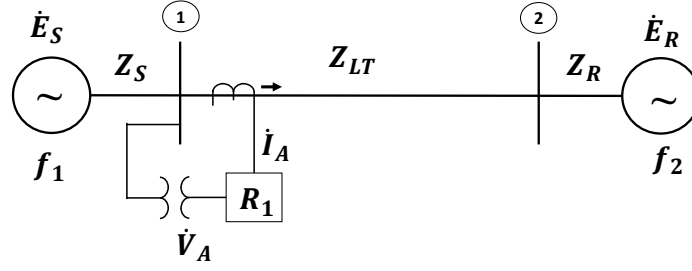


Figura 2 – Sistema elétrico trifásico de duas máquinas.

f_2 . Inicialmente é suficiente saber que f_1 é diferente de f_2 , como acontece em qualquer condição de oscilação de potência. O método analítico é apresentado a seguir.

Sabendo que no loop de terra AT , a impedância Z_{AT} (Ziegler, 1999), vista pelo relé R_1 , é

$$Z_{AT} = \frac{\dot{V}_A}{\dot{I}_A + k_0 \dot{I}_{a0}} \quad (3.1)$$

$$k_0 = \frac{Z_{LT0} - Z_{LT}}{Z_{LT}} \quad (3.2)$$

onde:

- \dot{V}_A é o fasor de tensão calculado na fase A ;
- \dot{I}_A é o fasor de corrente calculado na fase A ;
- \dot{I}_{a0} é o fasor de corrente de sequência zero;
- k_0 é fator de compensação de sequência zero;
- Z_{LT0} é a impedância de sequência zero da linha;
- Z_{LT} é a impedância da linha de transmissão (impedância de sequência positiva).

e considerando que esse sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência simétrica, com sinais trifásicos perfeitamente equilibrados ($\dot{I}_{a0} = 0 A$), tem-se \dot{I}_A , calculado pelo relé R_1 , igual a

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_S - \dot{E}_R}{Z_S + Z_{LT} + Z_R} \quad (3.3)$$

\dot{V}_A , calculado pelo relé R_1 , é igual a

$$\dot{V}_A = \dot{E}_S - Z_S \dot{I}_A \quad (3.4)$$

Portanto, a impedância Z_{AT} é

$$Z_{AT} = \frac{\dot{V}_A}{\dot{I}_A + k_0 \dot{I}_{a0}} = \frac{\dot{V}_A}{\dot{I}_A} = \frac{\dot{E}_S - Z_S \dot{I}_A}{\dot{I}_A} = \frac{\dot{E}_S}{\dot{I}_A} - Z_S \quad (3.5)$$

Substituindo a equação (3.3) na equação (3.5), obtém-se

$$Z_{AT} = \frac{\dot{E}_S}{\dot{E}_S - \dot{E}_R} (Z_S + Z_{LT} + Z_R) - Z_S \quad (3.6)$$

Definindo as fontes de tensão como

$$\begin{aligned} \dot{E}_S &= E_S \angle \delta_1 = E_S (\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) \\ \dot{E}_R &= E_R \angle \delta_2 = E_R \angle 0^\circ = E_R \end{aligned} \quad (3.7)$$

Sendo a defasagem angular (δ), dada pela diferença angular entre as duas fontes, igual a

$$\delta = (\delta_1 - \delta_2) = \delta_1 \quad (3.8)$$

Definindo a variável n como a razão entre as amplitudes das duas fontes, tem-se

$$n = \frac{E_S}{E_R} \quad (3.9)$$

Voltando à equação (3.6) e rescrevendo a seguinte razão

$$\frac{\dot{E}_S}{\dot{E}_S - \dot{E}_R} = \frac{E_S (\cos \delta + j \sin \delta)}{E_S (\cos \delta + j \sin \delta) - E_R} = \frac{n (\cos \delta + j \sin \delta)}{n (\cos \delta + j \sin \delta) - 1} \quad (3.10)$$

E considerando o conjugado do denominador, obtido a partir da equação (3.10),

$$(n \cos \delta - 1) - j \sin \delta \quad (3.11)$$

Racionalizando a equação (3.10), obtém-se

$$\frac{\dot{E}_S}{\dot{E}_S - \dot{E}_R} = \frac{n[(n - \cos \delta) - j \sin \delta]}{(n - \cos \delta)^2 + \sin^2 \delta} \quad (3.12)$$

Substituindo a equação (3.12) na equação (3.6), obtém-se

$$Z_{AT} = \frac{n[(n - \cos \delta) - j \sin \delta]}{(n - \cos \delta)^2 + \sin^2 \delta} (Z_S + Z_{LT} + Z_R) - Z_S \quad (3.13)$$

Para o caso particular onde as amplitudes das fontes são iguais ($n = 1$), tem-se

$$Z_{AT} = \frac{[(1 - \cos \delta) - j \sin \delta]}{2(1 - \cos \delta)} (Z_S + Z_{LT} + Z_R) - Z_S \quad (3.14)$$

Aplicando na equação (3.14) a propriedade trigonométrica apresentada abaixo

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{(1 - \cos \delta)}{\sin \delta} \quad (3.15)$$

A impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_1 , será

$$Z_{AT} = \left(\frac{Z_S + Z_{LT} + Z_R}{2} \right) \left(1 - j \cot \frac{\delta}{2} \right) - Z_S \quad (3.16)$$

Conforme mencionado, a equação (3.16) foi obtida considerando uma condição de oscilação de potência simétrica, perfeitamente equilibrada ($\dot{I}_{a0} = 0 A$). Assim, a solução encontrada para a fase A deve ser estendida para as fases B e C , obtendo $Z_{AT} = Z_{BT} = Z_{CT}$. Além disso, nota-se que esse resultado não é válido para oscilações de potência assimétricas, devido ao desequilíbrio existente entre os sinais trifásicos ($\dot{I}_{a0} \neq 0 A$) nessas condições.

Ainda analisando a equação (3.16), nota-se que a impedância Z_{AT} depende das impedâncias do sistema elétrico (Z_S , Z_R e Z_{LT}) e da defasagem angular (δ). Logo, essa equação pode retratar as seguintes condições operativas:

- regime permanente senoidal, se δ é um valor fixo. Logo, Z_{AT} possui um único valor e está parado no plano RX ;
- oscilação de potência simétrica e estável, se δ aumenta até um valor máximo ($< 120^\circ$) e depois volta a diminuir (a partir de 120° não é mais esperado o retorno da estabilidade (Alves et al., 2018)). No plano RX , isso significa que Z_{AT} se desloca em direção as zonas de proteção e depois retorna para um novo ponto de equilíbrio;
- oscilação de potência simétrica e instável, se δ aumenta continuamente, passando por 180° . Isso significa que Z_{AT} se desloca com tendência de giro no plano RX , podendo atravessar as zonas de proteção.

A fim de ilustrar a trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX , a equação (3.16) será analisada a seguir para a seguinte condição:

- o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência simétrica e instável;
- $Z_S = Z_R$;

Para isso, inicialmente é determinado o plano RX . Aplicando a Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), ao sistema elétrico apresentado na Fig. 2, obtém-se

$$\dot{E}_S = Z_S \dot{I}_A + \dot{V}_A \quad (3.17)$$

$$\dot{E}_S = (Z_S + Z_{LT} + Z_R) \dot{I}_A + \dot{E}_R \quad (3.18)$$

A Fig. 3 (a) mostra o diagrama fasorial obtido a partir das equações anteriores. A Fig. 3 (b) é uma representação equivalente do diagrama fasorial apresentado na Fig. 3 (a). Vale lembrar que \dot{E}_S e \dot{E}_R estão definidos na equação (3.7). Dividindo na Fig. 3 (b) as quedas de tensões por \dot{I}_A , obtém-se um diagrama de impedância, conforme apresentado

na Fig. 4. A Fig. 4 mostra que o plano RX é inserido no ponto de localização do relé R_1 (início de Z_{LT}), e é desenhado preservando a inclinação da linha protegida Z_{LT} . Observa-se ainda a representação das impedâncias do sistema elétrico (Z_S , Z_{LT} e Z_R) e a impedância Z_{AT} , calculada pelo relé R_1 .

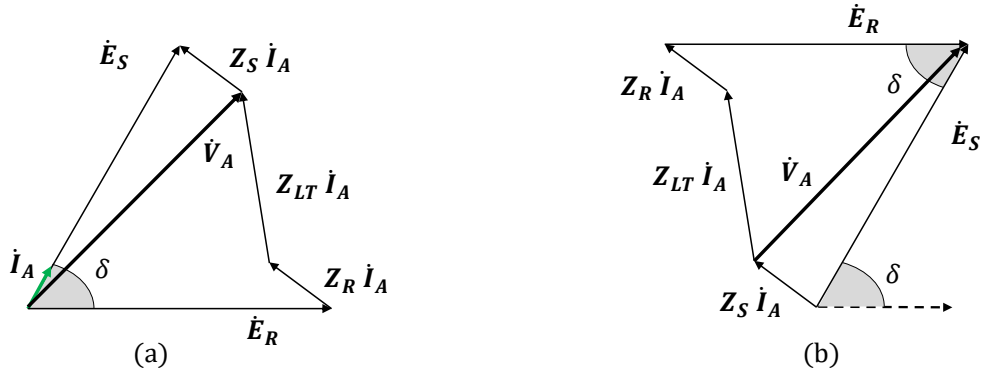


Figura 3 – (a) e (b) Diagrama fasorial das tensões.

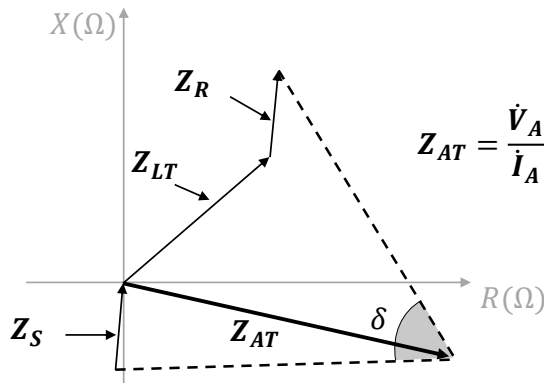


Figura 4 – Plano RX . Diagrama de impedância.

Uma vez definido o plano RX , a trajetória da impedância pode ser obtida a partir da equação (3.16). A Fig. 5 destaca a impedância Z_{AT} para três valores distintos de δ . Observa-se que durante uma oscilação de potência simétrica e instável a trajetória da impedância forma uma linha reta à medida que δ aumenta.

A análise da Fig. 5 ainda permite as seguintes conclusões:

- a linha reta que une os pontos A e B representa a soma da impedância total do sistema (Z_T), dada por

$$Z_T = Z_S + Z_{LT} + Z_R \tag{3.19}$$

- quando a defasagem angular (δ) entre as duas fontes é igual a 180° , a trajetória da impedância intercepta a linha de transmissão Z_{LT} , e a impedância Z_{AT} , vista pelo

relé R_1 , é igual a $Z_{LT}/2$. Esse resultado é também mostrado analiticamente a seguir. Vale lembrar que foi adotado $Z_S = Z_R$.

$$Z_{AT} = \left(\frac{Z_S + Z_{LT} + Z_R}{2} \right) \left(1 - j \cot \frac{180}{2} \right) - Z_S \quad (3.20)$$

$$= \left(\frac{Z_{LT} + 2Z_S}{2} \right) - Z_S = \frac{Z_{LT}}{2} \quad (3.21)$$

- os resultados mostram que a impedância entra na zona de operação da proteção de distância. De acordo com [McDonald e Tziouvaras \(2005\)](#), isso é um indicativo de que funções complementares, de bloqueio e desbloqueio, são necessárias para aumentar a confiabilidade e segurança desse relé de distância durante oscilações de potência.

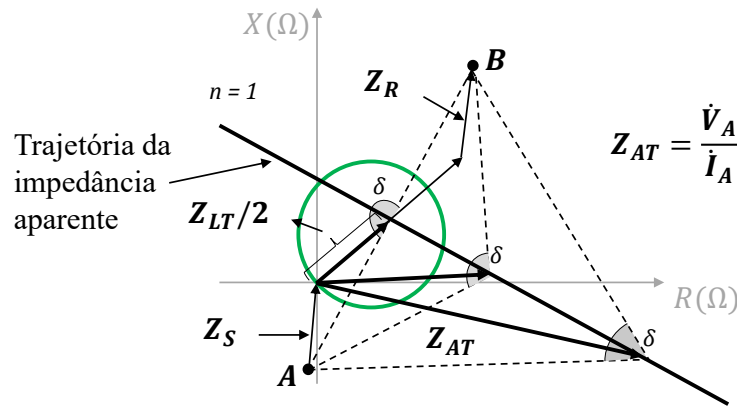


Figura 5 – Plano RX . A trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_1 , durante uma oscilação de potência simétrica e instável, é uma linha reta.

Nesse ponto, vale destacar que a trajetória da impedância apresentada na Fig. 5 foi obtida para $n = 1$. No entanto, a partir da equação (3.13) é possível obter trajetórias para $n \neq 1$. A Fig. 6 mostra que à medida que δ muda, para $n > 1$ são formadas trajetórias circulares na parte superior, e para $n < 1$ são formados círculos na parte inferior. Em ([Kundur, 1994](#); [Andrade, 2020](#)) são apresentadas trajetórias considerando valores específicos de n ($n = 0,5$; $n = 1$; $n = 2$). Essas trajetórias são similares às apresentadas na Fig. 6.

Após ilustrado o comportamento da impedância no plano RX , para uma condição de oscilação de potência simétrica e instável, cabe destacar que apenas relés específicos podem ser afetados por oscilações de potência. Para exemplificar, considere um sistema elétrico formado por duas fontes equivalentes interligadas por três linhas de transmissão em série (Z_{AB} , Z_{BC} e Z_{CD}). O plano RX desse sistema está apresentado na Fig. 7. Para simplificar⁴ é considerada apenas zona 1 e $n = 1$. Nota-se que o relé que protege a linha Z_{BC} está sujeito aos efeitos da oscilação de potência e, portanto, apenas este relé necessita de funções complementares para bloqueio e desbloqueio da proteção de distância.

⁴ Este método depende de n e, portanto, uma avaliação mais criteriosa pode ser realizada admitindo condições de $n > 1$ e $n < 1$. Ou seja, avaliar se para $n > 1$ a impedância vista pelo relé intercepta a linha Z_{CD} , e se para $n < 1$ intercepta a linha Z_{AB} .

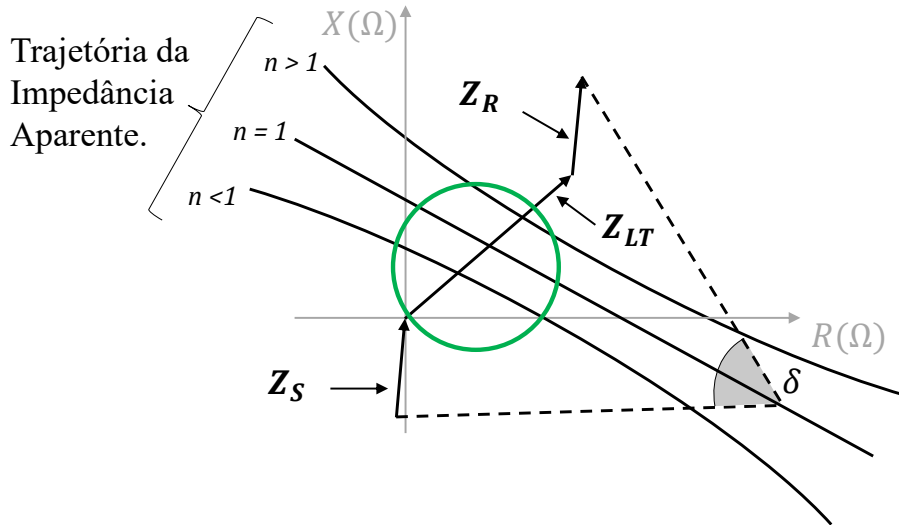


Figura 6 – Trajetória da impedância durante oscilações de potência simétricas e instáveis, considerando $n < 1$, $n = 1$ e $n > 1$.

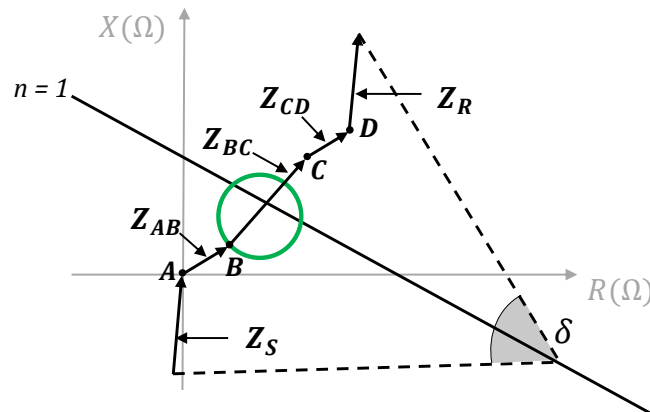


Figura 7 – Plano RX . Zona 1 da linha protegida Z_{BC} é afetada por oscilação de potência.

3.2.1 Centro Elétrico (CE)

Foi mostrado anteriormente que, além de entrar na zona de operação da proteção de distância, a impedância pode interceptar o sistema elétrico durante uma oscilação de potência. O local onde a impedância cruza o sistema elétrico é conhecido como centro elétrico. Tecnicamente, o centro elétrico é definido como o ponto, ou os pontos, no sistema elétrico onde a tensão se torna zero durante uma oscilação de potência instável (McDonald e Tziouvaras, 2005). Para ilustrar essa definição, considere o diagrama fasorial das tensões apresentado na Fig. 3 (b). Indicando nesse diagrama o nó de referência (tensão zero), obtém-se a distribuição de tensão no sistema elétrico, conforme mostrado na Fig. 8.

A Fig. 9 mostra que se forma uma linha reta à medida que δ aumenta, que neste diagrama representa onde a tensão se torna zero durante uma oscilação de potência simétrica e instável. O ponto que essa linha intercepta o sistema elétrico é o centro elétrico (CE). Nesse ponto vale destacar que a Fig. 9 foi obtida considerando $n = 1$. A Fig. 10

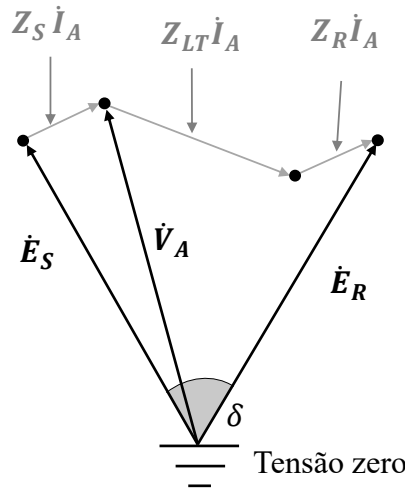


Figura 8 – Distribuição de tensão no sistema elétrico da Fig. 2.

também mostra onde a tensão se torna zero, porém considerando $n > 1$. Portanto, a análise da Fig. 9 e da Fig. 10 permite concluir que:

- para $n = 1$, a defasagem angular (δ) entre as fontes de tensão (\dot{E}_S e \dot{E}_R) é igual a 180° no centro elétrico, conforme observa-se na Fig. 9;
- para $n > 1$, a defasagem angular (δ) entre as fontes de tensão (\dot{E}_S e \dot{E}_R) é menor do que 180° no centro elétrico. A mesma análise, porém sendo $n < 1$, mostra que a defasagem angular (δ) é maior do que 180° . Essa discussão é apresentada na Fig. 10;
- na verdade, $\delta \approx 180^\circ$ no centro elétrico para $n < 1$ ou $n > 1$ e, por isso, é muito comum na literatura se referir que no centro elétrico $\delta = 180^\circ$, para qualquer valor de n .

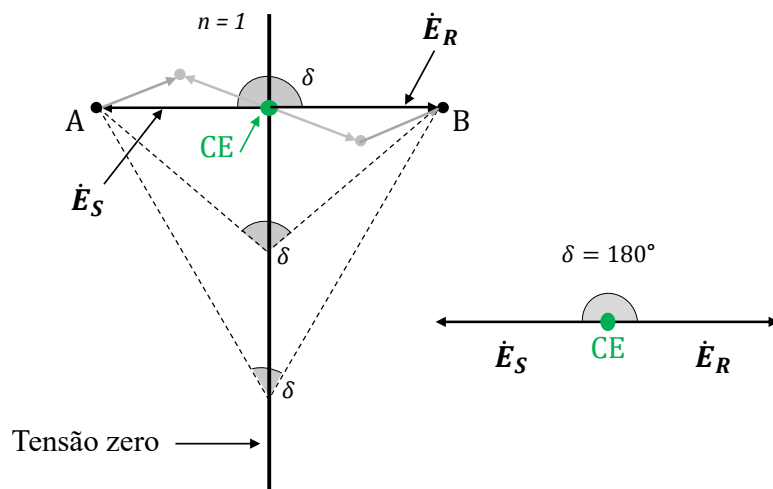


Figura 9 – Centro elétrico no sistema para $n = 1$. Defasagem angular (δ) entre as fontes de tensão (\dot{E}_S e \dot{E}_R) é igual a 180° .

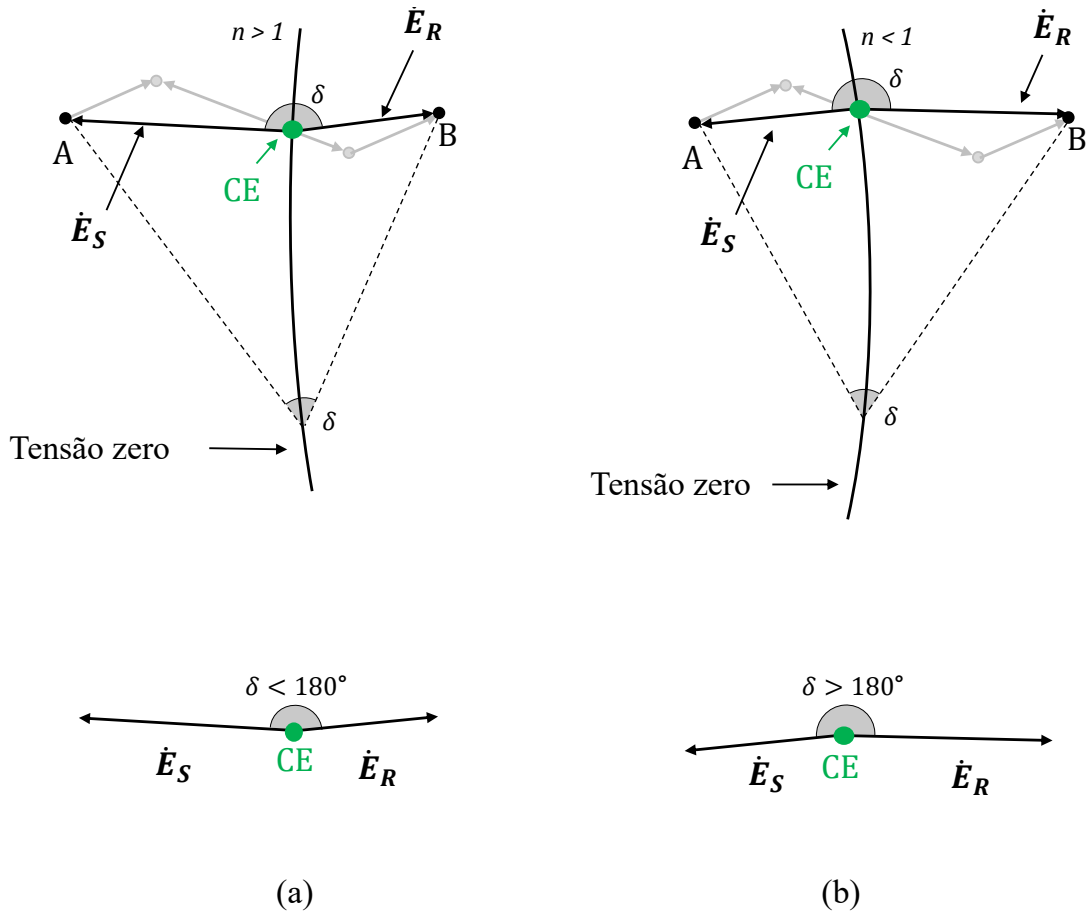


Figura 10 – (a) Centro elétrico para $n > 1$. Defasagem angular (δ) menor que 180° . (b) Centro elétrico para $n < 1$. Defasagem angular (δ) maior que 180°

Por fim, cabe destacar a defasagem angular (δ_L), que pode ser calculada a partir das tensões medidas nas extremidades da linha de transmissão, como

$$\delta_L = \delta_{L1} - \delta_{L2} \tag{3.22}$$

onde:

- δ_{L1} é o ângulo da tensão calculada na fase A do barramento 1 ($\dot{V}_A = V_A \angle \delta_{L1}$);
- δ_{L2} é o ângulo da tensão calculada na fase A do barramento 2 ($\dot{V}_A^{R2} = V_A^{R2} \angle \delta_{L2}$).

No centro elétrico δ_L é sempre 180° , para qualquer valor de n . A Fig. 11 ilustra esse conceito para $n > 1$. Nota-se que no centro elétrico $\delta_L = 180^\circ$, enquanto $\delta < 180^\circ$. Dessa maneira, $\delta_L = 180^\circ$ indica com precisão que a impedância está sobre a linha de transmissão, isto é, no centro elétrico.

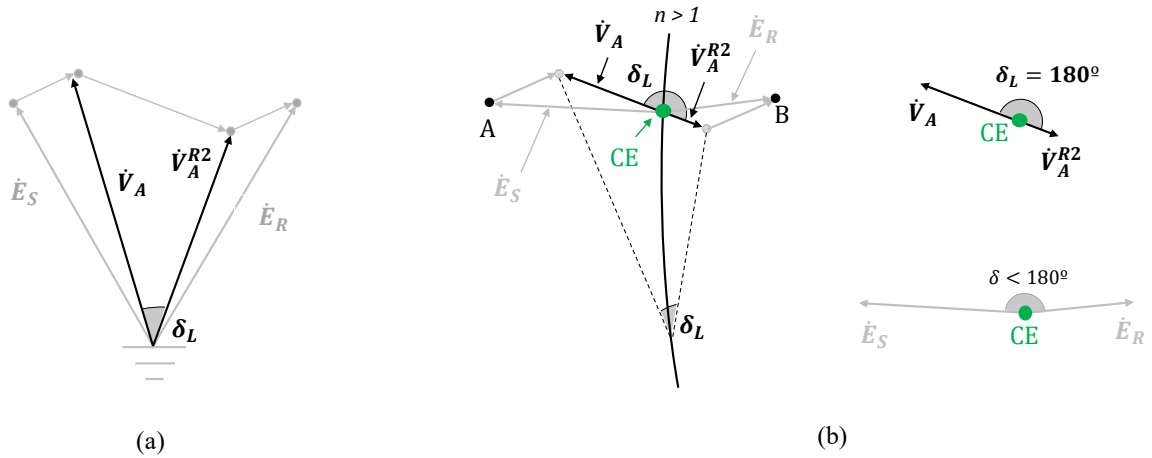


Figura 11 – (a) Distribuição de tensão no sistema elétrico da Fig. 2. (b) Defasagem angular (δ) e defasagem angular (δ_L).

3.3 Exemplo de Aplicação: Sistema Elétrico IEEE-9 Barras

Nessa seção, a metodologia apresentada anteriormente, pautada principalmente na equação (3.16), é aplicada ao sistema elétrico IEEE-9 barras apresentado na Fig. 12. Os parâmetros dos transformadores, linhas de transmissão, cargas e geradores podem ser consultados em Sauer e Pai (1997), e Anderson e Fouad (2002), e estão disponíveis no apêndice B.

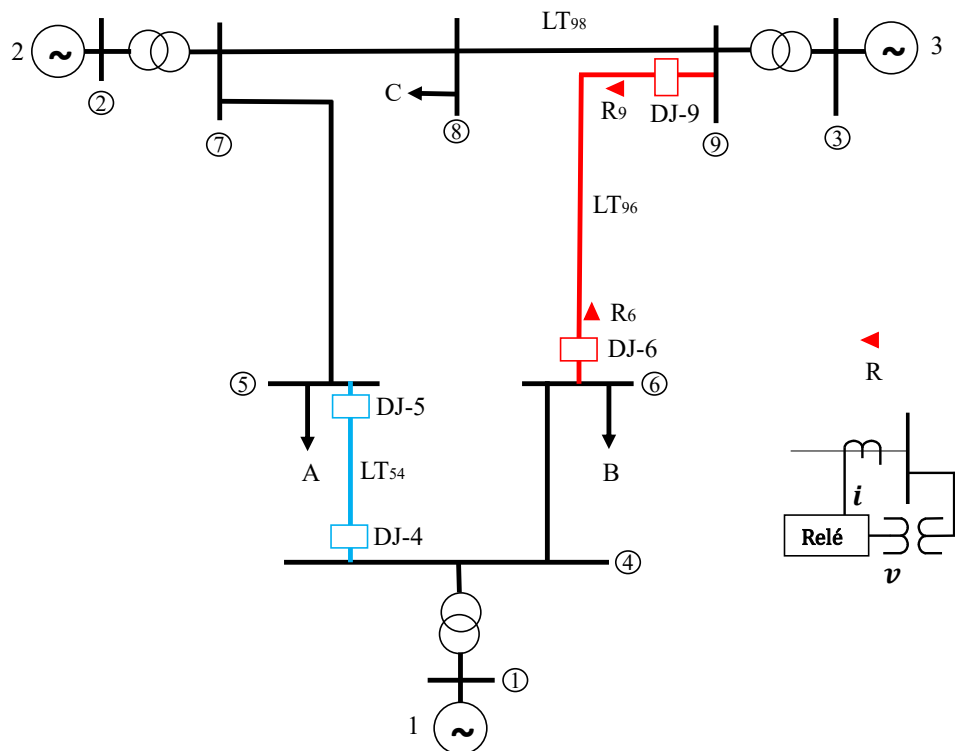


Figura 12 – Topologia do sistema elétrico IEEE-9 barras.

É conhecido, a partir de estudos de simulações realizados em vários trabalhos dessa área de pesquisa (inclusive será mostrado neste estudo), que a linha de transmissão LT_{96} desse sistema pode enfrentar condições de oscilações de potência simétricas e instáveis. No entanto, essa condição pode ser também verificada analiticamente, como será mostrado a seguir a partir da equação (3.16). Inicialmente, o sistema elétrico IEEE-9 barras deve ser reduzido a um sistema de duas barras. Então, as impedâncias equivalentes (Z_S e Z_R) são calculadas a partir da matriz das admitâncias de barra (Y_{bus}), vistas a partir dos barramentos 9 e 6, respectivamente. Objetivando verificar a trajetória da impedância vista pelo relé R_9 , que está conectado próximo ao barramento 9 e protege a linha LT_{96} , a equação (3.16) é analisada considerando:

- $Z_S = 0,0115 + j0,0893$ pu, impedância equivalente vista a partir do barramento 9;
- $Z_R = 0,0246 + j0,1022$ pu, impedância equivalente vista a partir do barramento 6;
- $Z_{LT} = 0,0390 + j0,1700$ pu, impedância série da linha de transmissão LT_{96} .

Os resultados obtidos estão apresentados na Fig. 13. Esses resultados indicam que a linha LT_{96} está sujeita a condições de oscilações de potência simétricas e instáveis, uma vez que a impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 , se desloca em direção ao sistema elétrico à medida que a defasagem angular (δ) aumenta, interceptando a linha LT_{96} (centro elétrico). Portanto, funções complementares para bloqueio e desbloqueio da proteção de distância são necessárias aos relés que protegem essa linha (LT_{96}).

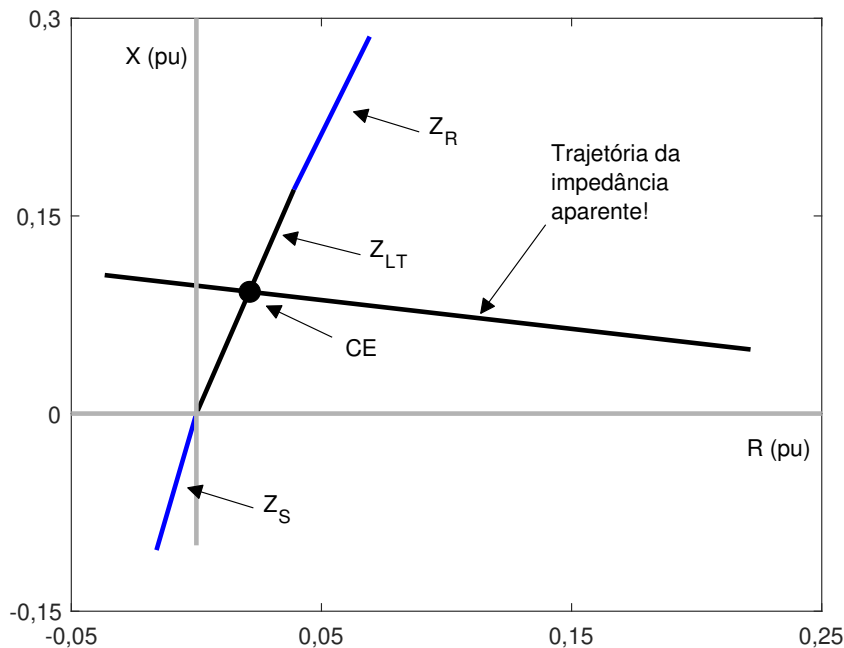


Figura 13 – Plano RX . A trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 que protege a linha (LT_{96}), durante uma oscilação de potência simétrica e instável, é uma linha reta.

3.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foram definidas oscilações de potência simétricas, estáveis e instáveis, assim como oscilações de potência assimétricas, estáveis e instáveis. Considerando uma oscilação de potência simétrica e instável, foi apresentado um método analítico para verificar a formação de centro elétrico nessas condições. Para exemplificar, essa técnica foi aplicada ao sistema elétrico IEEE-9 barras. O método, embora simplificado, pode ser utilizado para indicar a necessidade de funções complementares para bloqueio e desbloqueio da proteção de distância.

Capítulo 4

Oscilações de Potência: Estudo Baseado em Simulações

Neste capítulo é apresentado um estudo baseado em resultados obtidos via simulações. As simulações são realizadas no software *Matlab/Simulink*, onde é modelado o sistema elétrico IEEE-9 barras, já apresentado na Fig. 12. São simuladas condições de oscilações de potência simétricas, estáveis e instáveis, assim como oscilações de potência assimétricas, estáveis e instáveis. Por fim, são analisadas as principais grandezas elétricas associadas a esses fenômenos, podendo citar: dinâmica dos sinais trifásicos de tensão e corrente, trajetória da impedância no plano RX e formação de centro elétrico, oscilações de potências trifásicas, ativa e reativa, variação de frequência e defasagem angular.

4.1 Modelagem do Sistema Elétrico IEEE-9 Barras no Software *Matlab/Simulink*

O sistema elétrico IEEE-9 barras, já apresentado na Fig. 12, é tipicamente encontrado em trabalhos dessa área de pesquisa (Sauer e Pai, 1997; Anderson e Fouad, 2002; Rao e Pradhan, 2012; Khodaparast e Khederzadeh, 2015; Rao e Pradhan, 2015; Lazaro et al., 2017; Musa et al., 2019; Patel et al., 2019; Patel, 2019; Chatterjee e Roy, 2020; Mahamedi e Fletcher, 2020; Chatterjee et al., 2020)¹. Ele é útil para gerar cenários de testes que envolvem oscilações de potência e faltas durante oscilações de potência. Por essa razão, este sistema elétrico foi escolhido e simulado no software *Matlab/Simulink* também neste trabalho. Foi utilizado o bloco de máquinas síncronas denominado *Synchronous Machine* para modelar os geradores. Para o sistema de excitação foi utilizado o bloco denominado *Excitation System 1*. As linhas de transmissão são modeladas através do bloco *Distributed Parameters Line* e o bloco *Three-Phase transformer* foi utilizado para

¹ Pode haver divergências entre os valores dos parâmetros divulgados. Os valores utilizados neste estudo estão de acordo com Sauer e Pai (1997), e Anderson e Fouad (2002).

modelar os transformadores de potência. Os parâmetros de entrada desses blocos estão de acordo com Sauer e Pai (1997), e Anderson e Fouad (2002), e estão disponíveis no apêndice B. Já no apêndice C está disponível uma figura, extraída a partir do software *Simulink*, mostrando uma visualização completa do sistema elétrico IEEE-9 barras simulado. A seguir é apresentada uma breve descrição dos blocos mencionados (informações detalhadas podem ser consultadas em Mathworks (2022)).

4.1.1 Máquinas Síncronas (*Synchronous Machine*)

Esse bloco é proposto para modelar máquinas síncronas trifásicas de polos salientes e de polos lisos, e pode operar no modo gerador ou no modo motor. O modo de operação é determinado pelo sinal da potência mecânica (positivo para modo gerador e negativo para modo motor). Esse modelo considera a dinâmica dos enrolamentos do estator, rotor e amortecedores. A Fig. 14 mostra o bloco desse componente no *Simulink*.

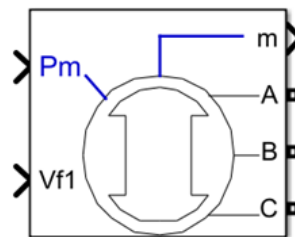


Figura 14 – Máquinas síncronas (*Synchronous Machine Block*).

As entradas e saídas desse bloco são:

- P_m corresponde à potência mecânica entregue no eixo da máquina síncrona, em watt ou pu. No modo motor, essa entrada é usualmente uma constante negativa ou uma função. No modo gerador, essa entrada pode ser uma constante positiva, ou uma função ou proveniente do bloco que modela a máquina primária (turbina hidráulica e regulador de velocidade ou turbina a vapor e regulador de velocidade). Nesse trabalho a entrada P_m foi configurada como uma constante positiva, conforme pode ser consultado no apêndice B;
- V_{f1} é a tensão de campo, que pode ser uma constante positiva ou pode ser fornecida pelo bloco que modela o sistema de excitação. Nesse trabalho a entrada V_{f1} é proveniente do bloco que modela o sistema de excitação;
- m disponibiliza um vetor contendo diversos sinais medidos na máquina. Como exemplo, podem ser selecionadas as tensões do estator projetadas no eixo direto e no eixo de quadratura, potência ativa e reativa de saída, ângulo de potência, entre outros;
- A , B e C representam os enrolamentos de fase do estator.

4.1.2 Sistema de Excitação (*Excitation System*)

Esse bloco modela o sistema de excitação, onde os dois principais componentes são o regulador e a excitatriz. O regulador processa os sinais de controle de entrada, atuando na excitatriz. A excitatriz por sua vez fornece a tensão de campo para a máquina síncrona. Dessa maneira, o sistema de excitação controla a tensão terminal no estator da máquina síncrona, contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico de potência. Esse bloco considera excitatriz do tipo DC (categoria que utiliza geradores de corrente contínua para fornecer corrente ao enrolamento do rotor por meio de escovas). Nesse modelo é desprezada a função de saturação da excitatriz. A Fig. 15 mostra o bloco desse componente disponível no *Simulink*.

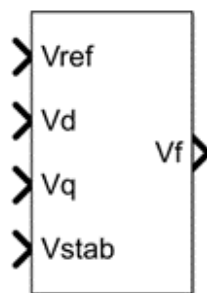


Figura 15 – Sistema de excitação (*Excitation System Block*).

As entradas e saídas desse bloco são:

- V_{ref} é o valor desejado da tensão terminal a ser obtido no estator da máquina síncrona. Nesse trabalho a entrada V_{ref} foi configurada como uma constante positiva, conforme pode ser consultado no apêndice B;
- V_d e V_q são as tensões terminais do estator da máquina síncrona projetadas no eixo direto e no eixo de quadratura, respectivamente;
- V_{stab} representa o sinal recebido a partir do estabilizador do sistema de potência (em inglês: *Power System Stabilizer* ou PSS). Nesse trabalho não foram consideradas as contribuições dessa malha de controle, atribuindo valor zero a essa entrada;
- V_f é a tensão de campo enviada para o enrolamento de campo da máquina síncrona.

4.1.3 Linhas de Transmissão (*Distributed Parameters Line*)

Esse bloco implementa um modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos com perdas concentradas. O modelo se baseia no método de ondas viajantes de Bergeron. Nesse modelo, os parâmetros da linha de transmissão são calculados para uma única frequência escolhida pelo usuário. Uma vez que em linhas de transmissão reais os parâmetros R e L são variantes com a frequência, esse modelo pode apresentar erros ao ser

utilizado para simular fenômenos transitórios. A Fig. 16 mostra o bloco desse componente disponível no *Simulink*.

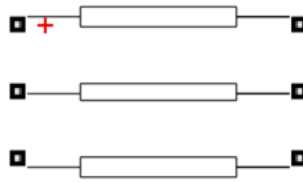


Figura 16 – Linhas de transmissão (*Distributed Parameters Line block*).

4.1.4 Transformadores de potência (*Three-Phase Transformer*)

Esse bloco implementa um transformador trifásico utilizando três transformadores monofásicos. Os dois enrolamentos do transformador trifásico podem ser conectados de diferentes maneiras:

- estrela (Y);
- estrela com neutro acessível (Yn);
- estrela com neutro aterrado (Yg);
- delta atrasado de 30° em relação Y ($D1$);
- delta adiantado de 30° em relação Y ($D11$).

A Fig. 17 mostra o bloco desse componente disponível no *Simulink*.

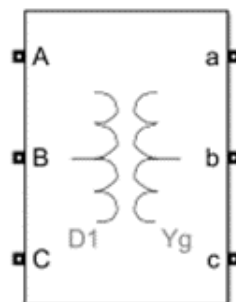


Figura 17 – Transformadores de potência (*Three-Phase Transformer block*).

Nesse trabalho os transformadores possuem enrolamentos ligados em $Yd1$, sendo o enrolamento de alta ligado em estrela com neutro aterrado (Yg) e o enrolamento de baixa ligado em delta atrasado de 30° ($d1$). Além disso, vale mencionar que foram desprezados os parâmetros associados ao circuito de excitação.

4.2 Filtro de Fourier e a Impedância Vista pelo Relé de Distância

Uma vez definido o sistema elétrico IEEE-9 barras e os principais blocos utilizados para sua modelagem no software *Simulink*, esta seção inicia-se apresentando o método de estimação fasorial implementado.

É conhecido que o filtro de Fourier é uma ferramenta eficiente no processo de estimação fasorial e amplamente utilizada por relés de proteção e, por esse motivo, foi escolhida neste estudo. É implementado o filtro de Fourier de um ciclo não recursivo (Thorp e Phadke, 2008). Este filtro² considera em sua formulação matemática a frequência fundamental (f_0) do sistema elétrico. Trabalha com instantes de tempo discreto $t(n)$, onde n depende do passo de amostragem k . Utiliza uma janela de dados deslizante que é atualizada a cada passo de amostragem k . A janela de dados contém N_a amostras do sinal discretizado $y_x(n)$, onde N_a é a quantidade de amostras em um ciclo da frequência fundamental (f_0). Assim, os coeficientes associados à parte real $E_{xy}(k)$ e à parte imaginária $F_{xy}(k)$ do fasor, e o próprio fasor $\dot{Y}_x(k)$ são calculados como

$$E_{xy}(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y_x(n) \sin [2\pi f_0 t(n)] \quad (4.1)$$

$$F_{xy}(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y_x(n) \cos [2\pi f_0 t(n)] \quad (4.2)$$

$$\dot{Y}_x(k) = E_{xy}(k) + jF_{xy}(k) \quad (4.3)$$

Nas equações (4.1), (4.2) e (4.3), y assumirá v para tensão ou i para corrente. Da mesma forma, Y será V para tensão ou I para corrente. As fases A , B e C do sistema elétrico são representadas pela variável x .

Uma vez estimados os fasores de tensão e corrente pelo filtro de Fourier, as impedâncias Z_{xT} (Ziegler, 1999), vistas nos loops de terra pelos relés de distância, são calculadas como

$$Z_{xT}(k) = \frac{\dot{V}_x(k)}{\dot{I}_x(k) + k_0 \dot{I}_{a0}(k)} \quad (4.4)$$

$$k_0 = \frac{Z_{LT0} - Z_{LT}}{Z_{LT}} \quad (4.5)$$

² Deve ser enfatizado que, o filtro de Fourier não recursivo considera em sua formulação matemática a frequência fundamental (f_0) do sistema elétrico. Dessa maneira, é objetivo desse filtro estimar fasores de frequência fundamental (f_0). Outro destaque, é que o filtro de Fourier não recursivo, mesmo diante de um sinal de entrada $y_x(n)$ de frequência fundamental f_0 , não estima fasores estacionários nessas condições. No entanto, correções angulares podem ser realizadas, e assim obter fasores estacionários. As equações (4.1), (4.2) e (4.3) incorporam estas correções angulares aplicadas ao filtro de Fourier não recursivo. Maiores detalhes do processo de correção angular podem ser consultadas no apêndice D.

onde,

- \dot{V}_x é o fasor de tensão;
- \dot{I}_x é o fasor de corrente;
- \dot{I}_{a0} é o fasor de corrente de sequência zero;
- k_0 é fator de compensação de sequência zero;
- Z_{LT0} é a impedância de sequência zero da linha;
- Z_{LT} é a impedância da linha de transmissão (impedância de sequência positiva).

Por fim, vale destacar que estão sendo considerados apenas os loops de terra³, conforme nota-se nas equações (4.4) e (4.5). Mas, os conceitos apresentados a seguir também se aplicam aos loops de fase.

4.3 Oscilações de Potência: Caracterização quanto ao Plano RX

Uma vez definido o método de estimação fasorial, essa seção objetiva caracterizar oscilações de potência, de acordo com a trajetória da impedância vista por relés de distância, no plano RX . Para isso, o sistema elétrico apresentado na Fig. 12 é modelado no software *Simulink*. A partir dos sinais trifásicos de tensão e corrente, registrados pelos relés R_9 e R_6 , que estão próximos, respectivamente, dos barramentos 9 e 6, são estimados os fasores e calculadas as impedâncias Z_{xT} , conforme as equações (4.4) e (4.5) anteriormente apresentadas. A zona 1 (Z_1) e a zona 2 (Z_2), dos relés R_9 e R_6 , são configuradas, respectivamente, com alcance de 80% e 120% da impedância da linha LT_{96} . Assim, nas seções seguintes haverá caracterização, quanto a trajetória da impedância no plano RX , de diversas condições de oscilações de potência, como:

- seção 4.3.1 - oscilação de potência simétrica e instável;
- seção 4.3.2 - oscilação de potência simétrica e estável;
- seção 4.3.3 - oscilação de potência assimétrica e instável;

³ Durante oscilações de potência simétricas, perfeitamente equilibradas ou havendo pequenos desequilíbrios, a corrente de sequência zero é aproximadamente igual a zero. Dessa maneira, as impedâncias vistas nos loops de terra são iguais as impedâncias vistas nos loops de fase. Então, são escolhidos os loops de terra, mas não há distinção em relação aos loops de fase. No entanto, durante oscilações de potência assimétricas, devido aos desequilíbrios existentes entre os sinais trifásicos, a corrente de sequência zero não é desprezível. Nesses casos, a presença da corrente de sequência de zero justifica a escolha dos loops de terra. Assim, os loops de terra são utilizados para apresentar todos os resultados obtidos neste trabalho.

- seção 4.3.4 - oscilação de potência assimétrica e estável.

Vale destacar que todas as condições de oscilações de potência mencionadas anteriormente serão utilizadas como cenários de testes nos capítulos 5 e 6. Esses cenários serão úteis para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos neste estudo. Por esse motivo, nos capítulos 5 e 6 sempre serão referenciados os conceitos e figuras que serão apresentados a seguir.

4.3.1 Oscilação de Potência Simétrica e Instável

Inicialmente, o sistema elétrico em estudo (Fig. 12) é forçado a uma condição de oscilação de potência simétrica e instável. Para isso, foi realizada a sequência de eventos descrita a seguir:

1. inicialmente o sistema elétrico está em regime permanente senoidal (60 Hz);
2. em seguida incide uma falta trifásica sólida no meio da linha de transmissão LT_{54} (linha de transmissão em destaque na cor azul);
3. após 310 ms do início da falta, ela é eliminada pela abertura dos disjuntores $DJ-4$ e $DJ-5$, e como consequência o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência simétrica e instável⁴.

Mostrando os resultados obtidos, observa-se na Fig. 18 (a) e (b) os sinais trifásicos de tensão e corrente registrados pelo relé R_9 . Já na Fig. 19 (a) e (b) estão apresentados os sinais trifásicos de tensão e corrente registrados pelo relé R_6 . Um efeito conhecido que se observa em oscilografias relacionadas as oscilações de potência são as variações lentas nas amplitudes dos sinais de tensão e corrente (flutuações). Isso pode ser verificado na Fig. 18 (a) e (b) e na Fig. 19 (a) e (b) observando o intervalo de tempo 3, que corresponde ao período de oscilação de potência simétrica e instável, descrito anteriormente no item 3. Outro destaque observado nessas figuras é o equilíbrio existente entre os sinais trifásicos, como esperado para condições de oscilações de potência simétricas.

Analisando o plano RX , a Fig. 20 (a) mostra as impedâncias vistas pelo relé R_9 , e a Fig. 20 (b) mostra as impedâncias vistas pelo relé R_6 . É observado na Fig. 20 (a) que as impedâncias são iguais entre si ($Z_{AT} = Z_{BT} = Z_{CT}$), como acontece durante oscilações de potência simétricas. Na Fig. 20 (b) também é observado um resultado equivalente, isto é, $Z_{AT} = Z_{BT} = Z_{CT}$. Esses resultados indicam que os sinais trifásicos, apresentados nas

⁴ Ressalta-se que, para simular/forçar qualquer condição de oscilação de potência, é necessário utilizar vários artifícios, realizando testes com entradas e saídas de cargas, diferentes tempos de eliminação de falta, locais de falta, entre outros. Neste trabalho têm-se utilizado curtos-circuitos e diferentes tempos de eliminação de defeito para forçar uma condição de oscilação de potência no sistema elétrico em estudo (Fig. 12).

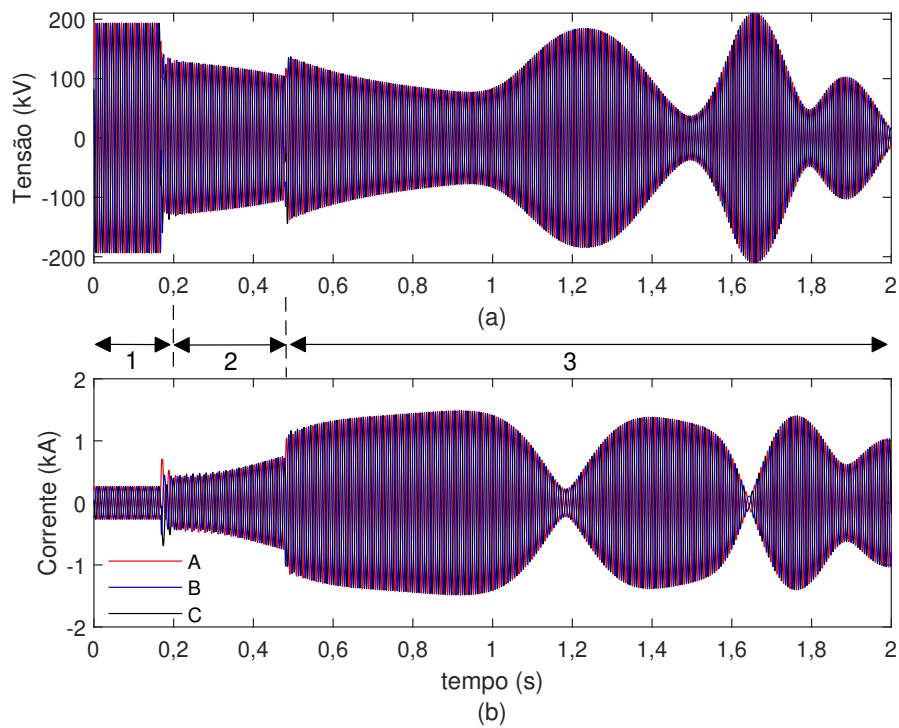


Figura 18 – Oscilação de potência simétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

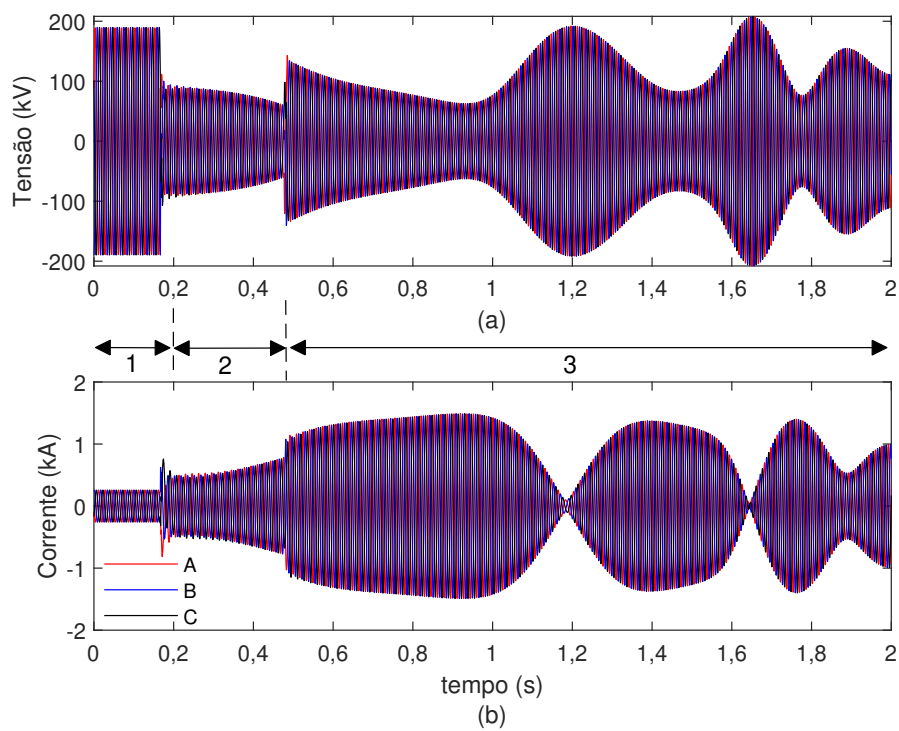


Figura 19 – Oscilação de potência simétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

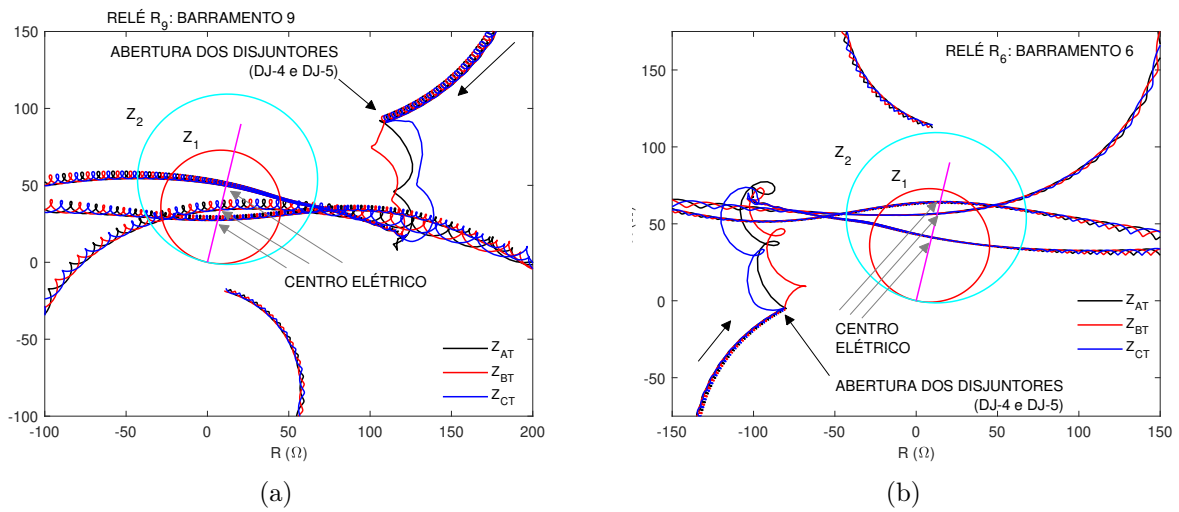


Figura 20 – Oscilação de potência simétrica e instável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6 .

Fig. 18 e Fig. 19, estão perfeitamente equilibrados. Além de simétrica, é também possível identificar na Fig. 20 (a) e (b) que a oscilação de potência é instável, pois as impedâncias estão girando no plano RX , cruzando o eixo das reatâncias mais de uma vez. Por fim, vale mencionar que cada uma das três impedâncias, vistas por cada uma das três unidades de proteção, intercepta o segmento que caracteriza a linha de transmissão em três pontos diferentes, locais conhecidos como centro elétrico.

4.3.2 Oscilação de Potência Simétrica e Estável

Para forçar o sistema elétrico a uma condição de oscilação de potência simétrica e estável são realizados eventos similares aos citados na seção 4.3.1. No entanto, aqui a falta é eliminada 300 ms após sua incidência. Assim:

1. inicialmente o sistema elétrico está em regime permanente senoidal (60 Hz);
2. em seguida incide uma falta trifásica sólida no meio da linha de transmissão LT_{54} (linha de transmissão em destaque na cor azul);
3. após 300 ms do início da falta, ela é eliminada pela abertura dos disjuntores $DJ-4$ e $DJ-5$, e como consequência o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência simétrica e estável (confira a nota de rodapé 4).

Observa-se na Fig. 21 (a) e (b) e na Fig. 22 (a) e (b) que as amplitudes dos sinais trifásicos, registrados respectivamente pelos relés R_9 e R_6 , sofrem variações lentas (flutuações) e que são equilibrados entre si, conforme esperado para condições de oscilações de potência simétricas (intervalo de tempo 3). Vale destacar que não acontecem afundamentos

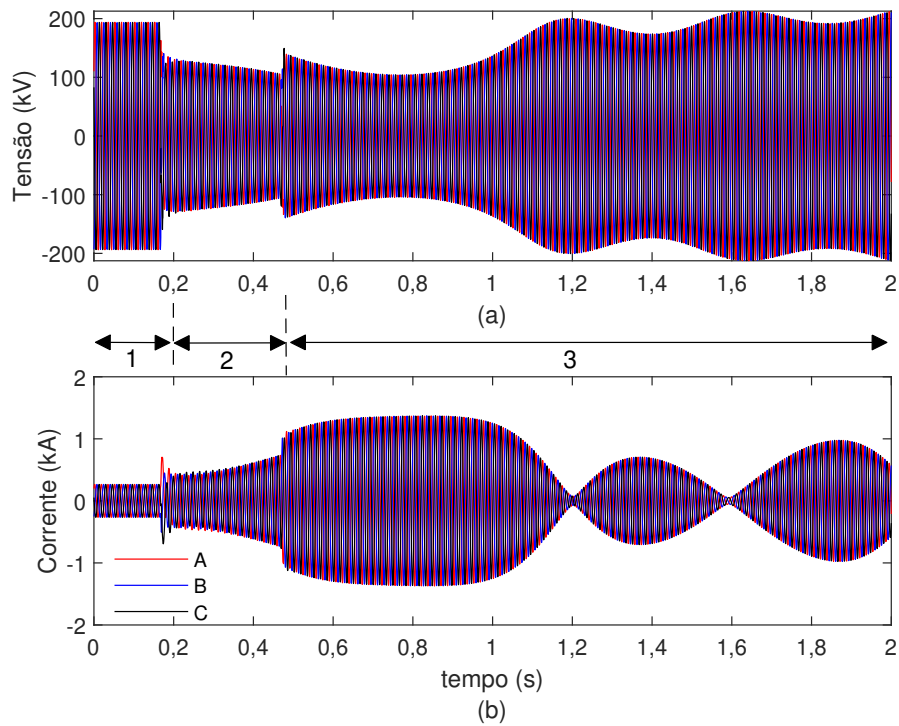


Figura 21 – Oscilação de potência simétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

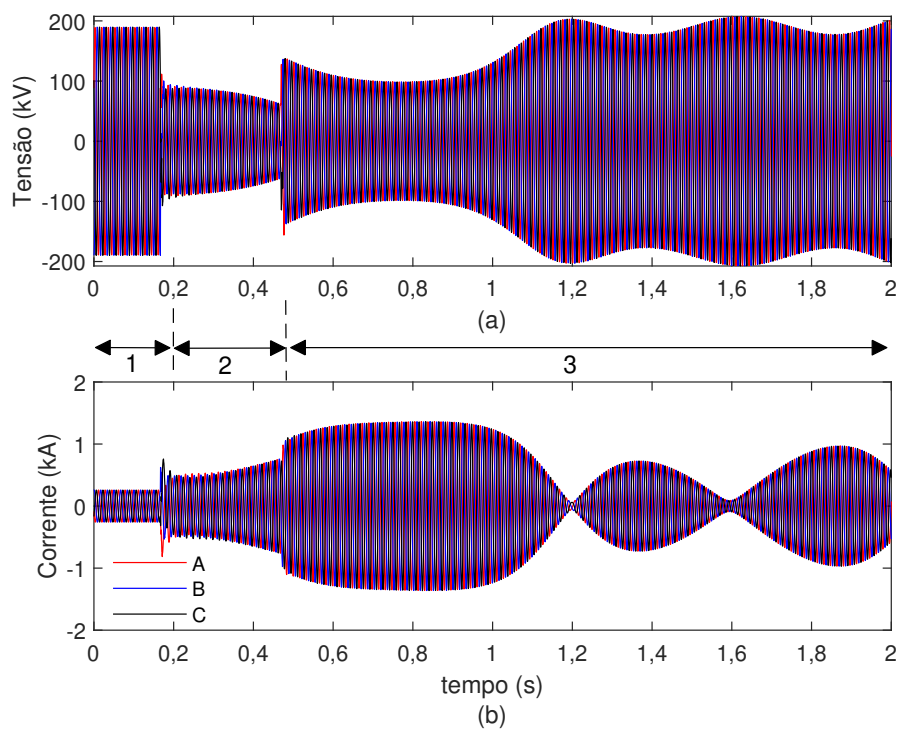


Figura 22 – Oscilação de potência simétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

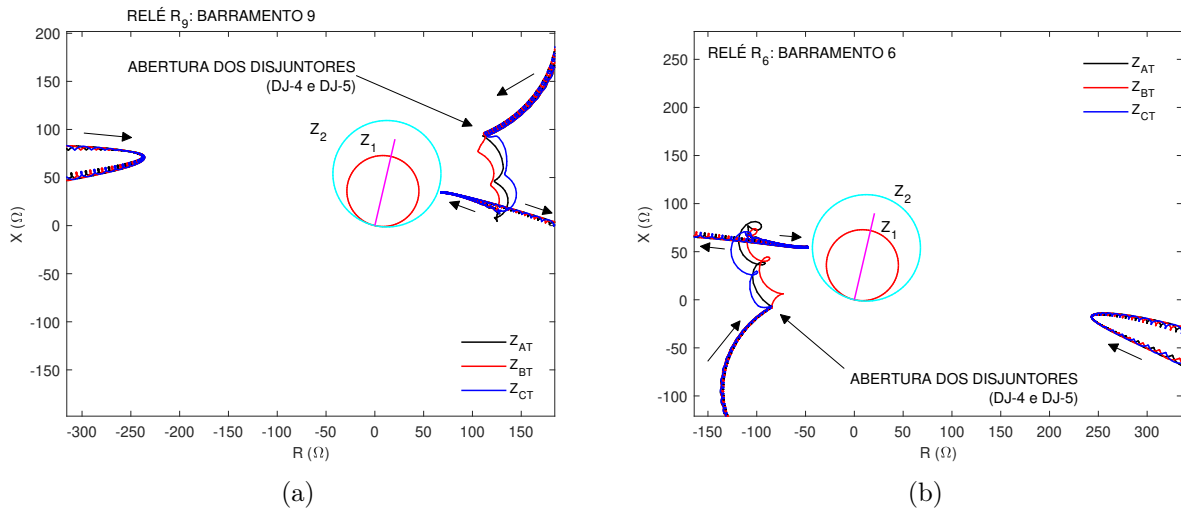


Figura 23 – Oscilação de potência simétrica e estável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6 .

significativos nos sinais de tensão (Fig. 21 (a) e Fig. 22 (a)), como verificou-se durante oscilações de potência instáveis (Fig. 18 (a) e Fig. 19 (a)). Isso é um indicativo que o sistema elétrico pode encontrar um novo ponto operacional aceitável, como esperado para condições de oscilações de potência estáveis.

Analisando o plano RX , como esperado para condições de oscilações de potência simétricas, é observado na Fig. 23 (a) que as impedâncias calculadas pelo relé R_9 são iguais entre si ($Z_{AT} = Z_{BT} = Z_{CT}$). Da mesma forma, verifica-se na Fig. 23 (b) que as impedâncias calculadas pelo relé R_6 são iguais entre si ($Z_{AT} = Z_{BT} = Z_{CT}$). Novamente, isso indica que os sinais trifásicos, apresentados nas Fig. 21 e Fig. 22, estão perfeitamente equilibrados. Além disso, nota-se na Fig. 23 (a) e (b) que trata-se de uma oscilação de potência estável, uma vez que as impedâncias se aproximam das zonas de proteção (Z_1 e Z_2), mas retornam e não interceptam a linha de transmissão. Isto é, a defasagem angular (δ) não se aproxima de 180° (centro elétrico), o que é característico de uma oscilação de potência estável.

4.3.3 Oscilação de Potência Assimétrica e Instável

Para impor uma condição de oscilação de potência assimétrica e instável ao sistema elétrico em estudo (Fig. 12), inicialmente esse sistema elétrico é modificado. É propositalmente desligada a linha de transmissão LT_{98} , conectada entre os barramentos 8 e 9, forçando um grande fluxo de potência na linha de transmissão LT_{96} , mesmo em condições normais de operação.

Definido o sistema elétrico modificado, é realizada a sequência de eventos descrita a seguir para forçá-lo a uma condição de oscilação de potência assimétrica e instável:

1. inicialmente o sistema elétrico modificado (LT_{98} desligada) está em regime permanente senoidal (60 Hz);
2. em seguida incide uma falta monofásica (AT), sem resistência de falta, a 5% distante do barramento 9, na linha de transmissão LT_{96} (linha de transmissão em destaque na cor vermelha);
3. para evitar completa separação do sistema elétrico, após 60 ms a falta é eliminada pela abertura monopolar (fase A) dos disjuntores $DJ-6$ e $DJ-9$ que estão na extremidade dessa linha (LT_{96}). Conseqüentemente o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência assimétrica⁵ e instável (confira a nota de rodapé 4).

Analisando a Fig. 24 (a) e (b) e a Fig. 25 (a) e (b), nota-se que há um grande desequilíbrio entre os sinais trifásicos, registrados respectivamente pelos relés R_9 e R_6 , como esperado para condições de oscilações de potência assimétricas (intervalo de tempo 3). Vale destacar que a corrente registrada na fase A é zero no intervalo de tempo 3 (Fig. 24 (b) e Fig. 25 (b)) devido à abertura monopolar dos disjuntores.

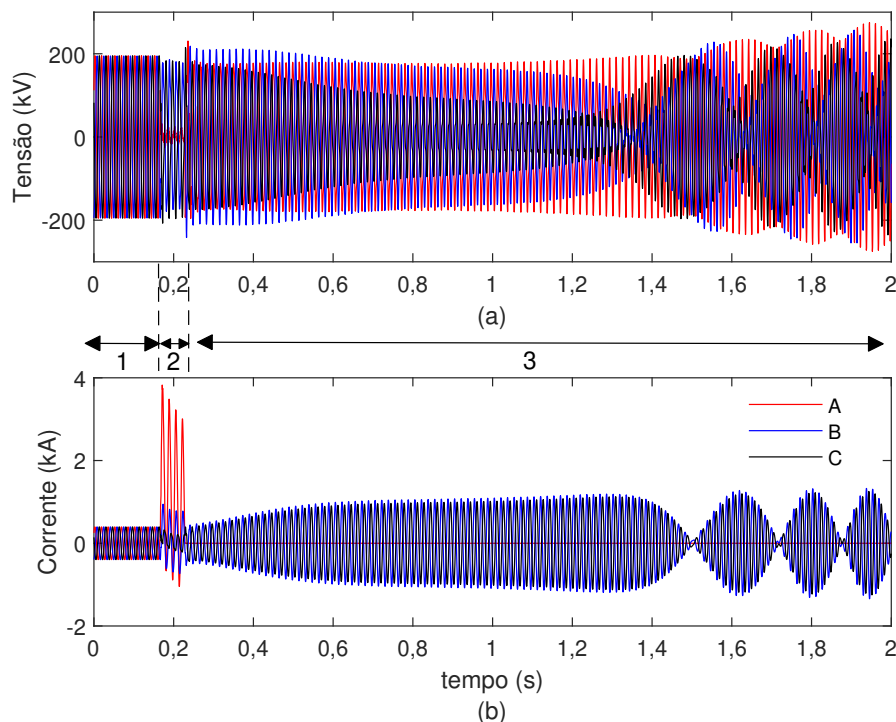


Figura 24 – Oscilação de potência assimétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

⁵ Após abertura monopolar (normalmente entre 1 a 4 s), numa expectativa que a falta esteja extinta acontece uma manobra de religamento monopolar, para que o sistema elétrico volte a operar em condições normais trifásicas. Neste estudo, como o interesse é avaliar o período de oscilação de potência, não tem sido realizado o religamento o monopolar.

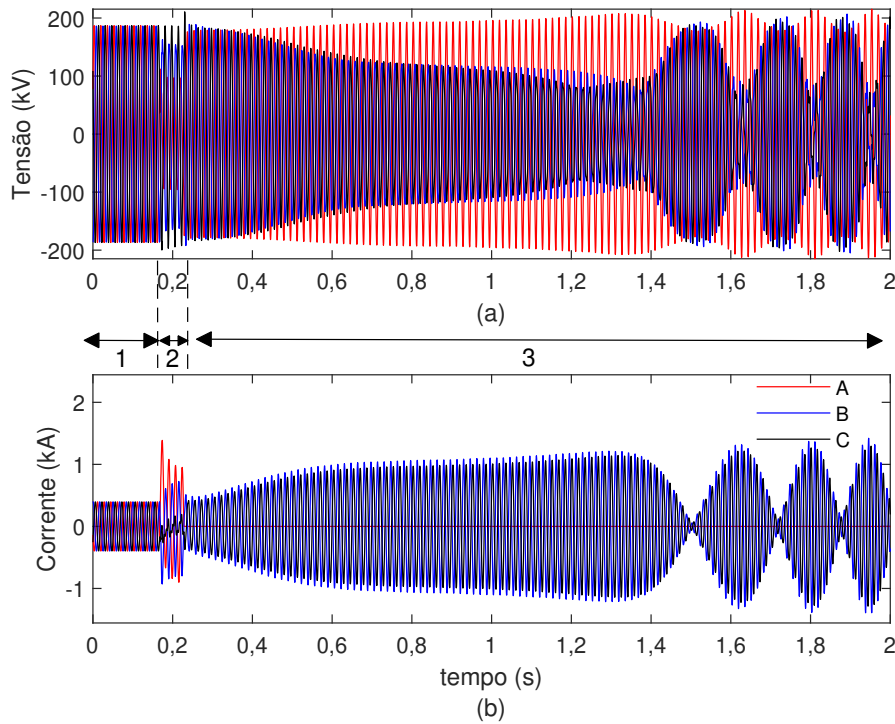


Figura 25 – Oscilação de potência assimétrica e instável. Sinais registrados pelo relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

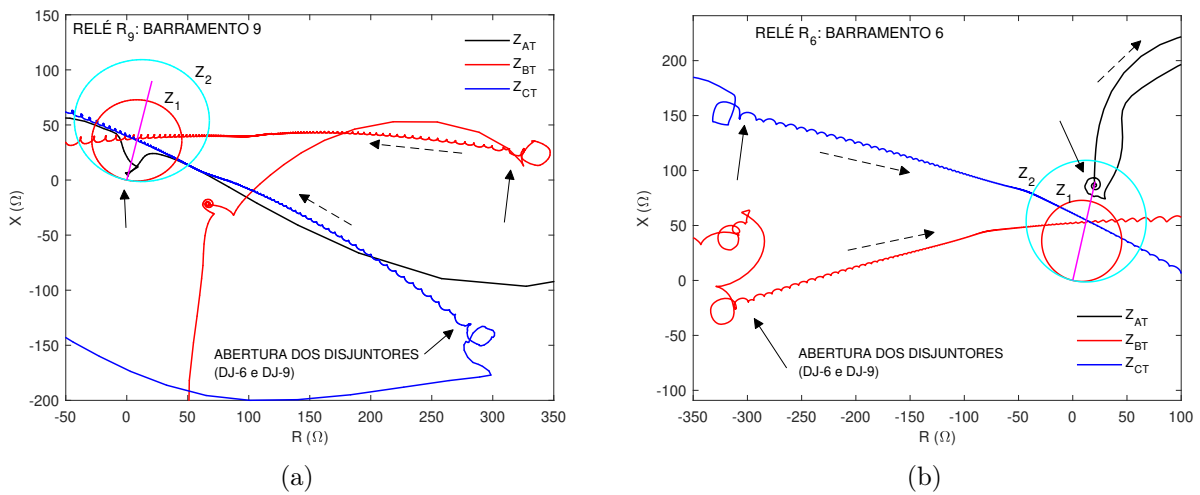


Figura 26 – Oscilação de potência assimétrica e instável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6 . Simulação truncada no instante de tempo 1,5 s para possibilitar melhor visualização.

Um efeito, decorrente do desequilíbrio existente entre os sinais trifásicos, pode ser observado na Fig. 26 (a). Isto é, para oscilações de potência assimétricas, as impedâncias calculadas pelo relé R_9 realizam trajetórias diferentes no plano RX ($Z_{AT} \neq Z_{BT} \neq Z_{CT}$). Da mesma forma, é mostrado na Fig. 26 (b) que o relé R_6 também calcula trajetórias diferentes no plano RX ($Z_{AT} \neq Z_{BT} \neq Z_{CT}$). Além disso, é observado nessas figuras que as

fases B e C enfrentam uma oscilação de potência (as impedâncias Z_{BT} e Z_{CT} excursionam em forma de laço), enquanto que a impedância Z_{AT} se afasta rapidamente das zonas de proteção (Z_1 e Z_2) devido à abertura monopolar dos disjuntores (na Fig. 26 (a) e (b), as setas contínuas indicam a posição da impedância após a abertura monopolar do disjuntor, isto é, após o início da oscilação de potência assimétrica. Já as setas tracejadas indicam a direção de deslocamento da impedância). Além disso, observa-se que as impedâncias Z_{BT} e Z_{CT} interceptam a linha de transmissão durante a oscilação de potência (centro elétrico), o que é característico de oscilações de potência instáveis.

4.3.4 Oscilação de Potência Assimétrica e Estável

Por fim, para forçar o sistema elétrico modificado a uma condição de oscilação de potência assimétrica e estável, são realizados eventos similares aos citados na seção 4.3.3. No entanto, aqui a falta monofásica é eliminada 40 ms após sua incidência. Assim:

1. inicialmente o sistema elétrico modificado (LT_{98} desligada) está em regime permanente senoidal (60 Hz);
2. em seguida incide uma falta monofásica (AT), sem resistência de falta, a 5% distante do barramento 9, na linha de transmissão LT_{96} (linha de transmissão em destaque na cor vermelha);
3. para evitar completa separação do sistema elétrico, após 40 ms a falta é eliminada pela abertura monopolar (fase A) dos disjuntores $DJ-6$ e $DJ-9$ que estão na extremidade dessa linha (LT_{96}). Consequentemente o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência assimétrica e estável (confira as notas de rodapé 4 e 5).

Analisando a Fig. 27 (a) e (b) e a Fig. 28 (a) e (b), observa-se novamente um grande desequilíbrio existente entre os sinais trifásicos, registrados respectivamente pelos relés R_9 e R_6 , como esperado para condições de oscilações de potência assimétricas (intervalo de tempo 3). Vale enfatizar que a corrente registrada na fase A é zero no intervalo de tempo 3 (Fig. 27 (b) e Fig. 28 (b)) devido à abertura monopolar dos disjuntores.

Quanto ao plano RX , nota-se na Fig. 29 (a) que as impedâncias calculadas pelo relé R_9 realizam trajetórias diferentes ($Z_{AT} \neq Z_{BT} \neq Z_{CT}$). Da mesma forma, o relé R_6 calcula trajetórias diferentes ($Z_{AT} \neq Z_{BT} \neq Z_{CT}$), como esperado para oscilações de potência assimétricas. Novamente pode ser observado que as fases B e C enfrentam uma oscilação de potência (as impedâncias Z_{BT} e Z_{CT} excursionam em forma de laço), enquanto que a impedância Z_{AT} se afasta rapidamente das zonas de proteção (Z_1 e Z_2) devido à abertura monopolar dos disjuntores (na Fig. 29 (a) e (b), as setas contínuas indicam a posição da impedância após a abertura monopolar do disjuntor, isto é, após o início da oscilação de potência assimétrica. Já as setas tracejadas indicam a direção

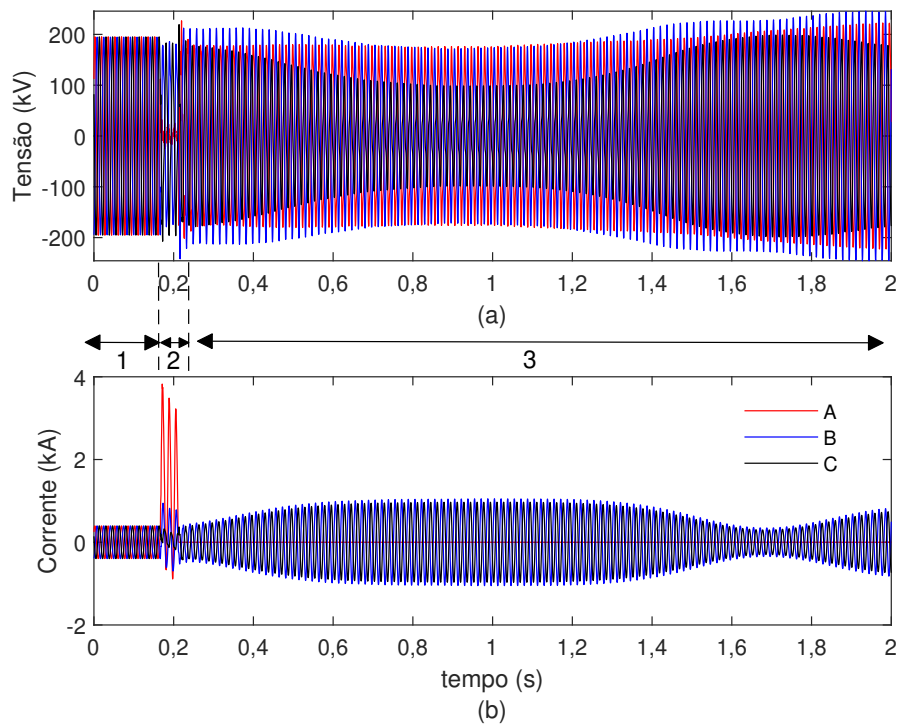


Figura 27 – Oscilação de potência assimétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_9 .
 (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

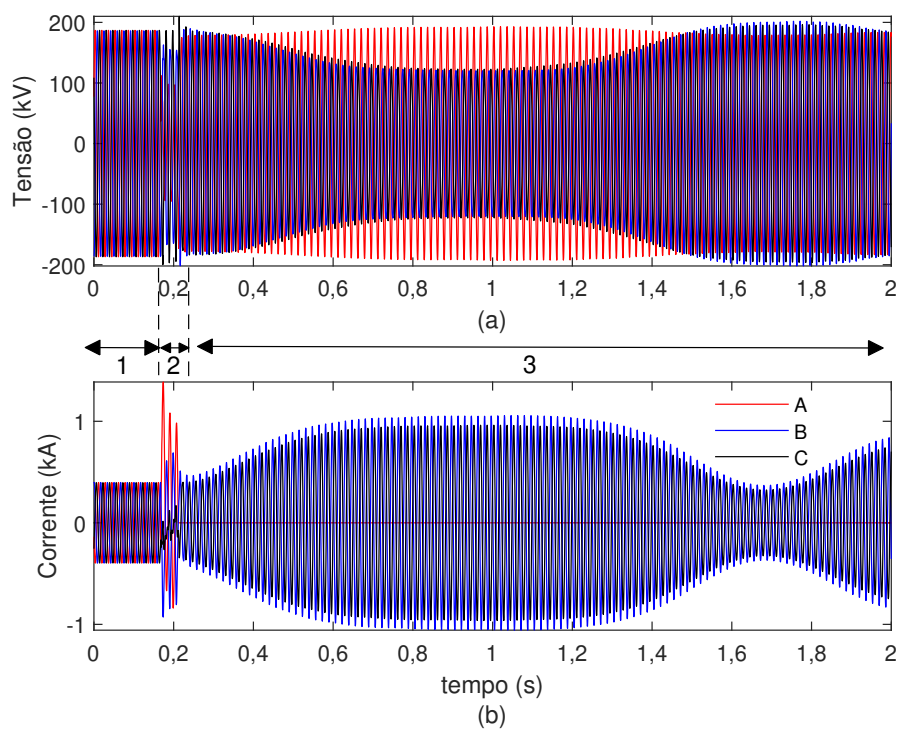


Figura 28 – Oscilação de potência assimétrica e estável. Sinais registrados pelo relé R_6 .
 (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

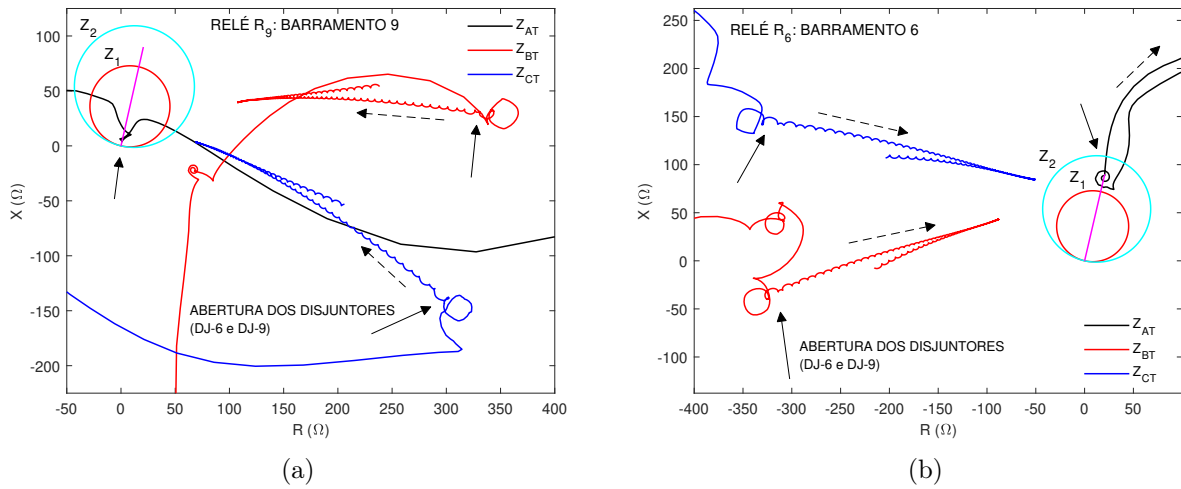


Figura 29 – Oscilação de potência assimétrica e estável. (a) Trajetória da impedância vista pelo relé R_9 . (b) Trajetória da impedância vista pelo relé R_6 . Simulação truncada no instante de tempo 1,5 s para possibilitar melhor visualização.

de deslocamento da impedância). Além disso, verifica-se que trata-se de uma oscilação de potência estável, uma vez que as impedâncias Z_{BT} e Z_{CT} se deslocam em direção as zonas de proteção (Z_1 e Z_2), mas retornam não interceptando a linha de transmissão. Isso significa que não acontece grandes valores para defasagem angular (δ).

4.4 Análise das Principais Grandezas Elétricas que Caracterizam Oscilações de Potência

Essa seção continua o estudo de oscilações de potência, porém, analisando outras grandezas elétricas, como: potências trifásicas ativa e reativa, defasagem angular e variação de frequência. Essas grandezas elétricas são calculadas, a partir dos sinais trifásicos registrados pelos relés R_9 e R_6 , para todos os tipos de oscilações de potência anteriormente apresentadas. A Tabela 2 traz a correspondência entre o tipo de oscilação de potência e os sinais trifásicos utilizados nessa seção.

Tabela 2 – Oscilações de potência e respectivos sinais trifásicos.

Oscilação de potência	Seção	Sinais trifásicos de tensão e corrente	
		R_9	R_6
simétrica e instável	4.3.1	Fig. 18	Fig. 19
simétrica e estável	4.3.2	Fig. 21	Fig. 22
assimétrica e instável	4.3.3	Fig. 24	Fig. 25
assimétrica e estável	4.3.4	Fig. 27	Fig. 28

4.4.1 Potências Trifásicas Ativa e Reativa

Para cálculo das potências trifásicas ativa (P) e reativa (Q) são considerados os fasores de tensão e corrente estimados pelo filtro de Fourier. Assim, P e Q são obtidos a partir da equação que determina a potência trifásica complexa (S), dada por

$$S = \dot{V}_A \dot{I}_A^* + \dot{V}_B \dot{I}_B^* + \dot{V}_C \dot{I}_C^* = P + jQ \quad (4.6)$$

Onde:

- \dot{V}_A , \dot{V}_B e \dot{V}_C são fasores de tensão;
- \dot{I}_A^* , \dot{I}_B^* e \dot{I}_C^* são conjugados complexos dos fasores de corrente \dot{I}_A , \dot{I}_B e \dot{I}_C .

A Fig. 30 e a Fig. 31 mostram, respectivamente, as potências trifásicas ativa (P) e reativa (Q), calculadas pelo relé R_9 , para todos os tipos de oscilações de potência em estudo. De forma geral, observa-se nessas figuras que P e Q variam lentamente ao longo do tempo (intervalo de tempo 3), ilustrando a definição dada em McDonald e Tziouvaras (2005), onde diz que oscilações de potência são caracterizadas pela variação de fluxo de potência.

Em Mahamedi e Fletcher (2020) é mostrado analiticamente que, durante oscilações de potência simétricas, a potência trifásica ativa oscila na frequência de escorregamento

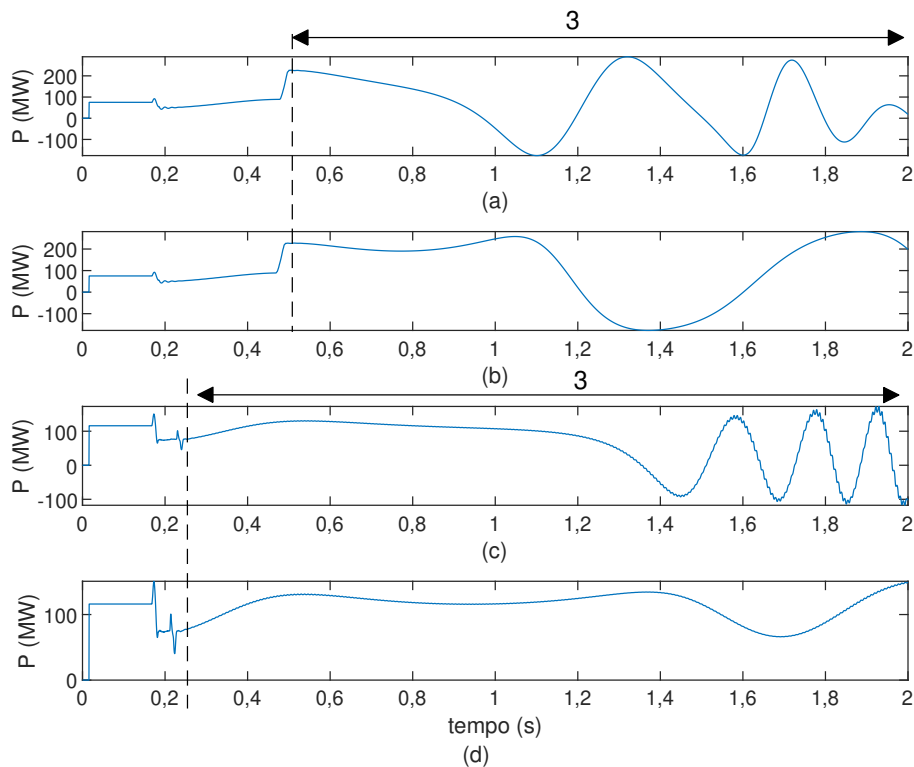


Figura 30 – Potência trifásica ativa calculada pelo relé R_9 .

Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável.

Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável

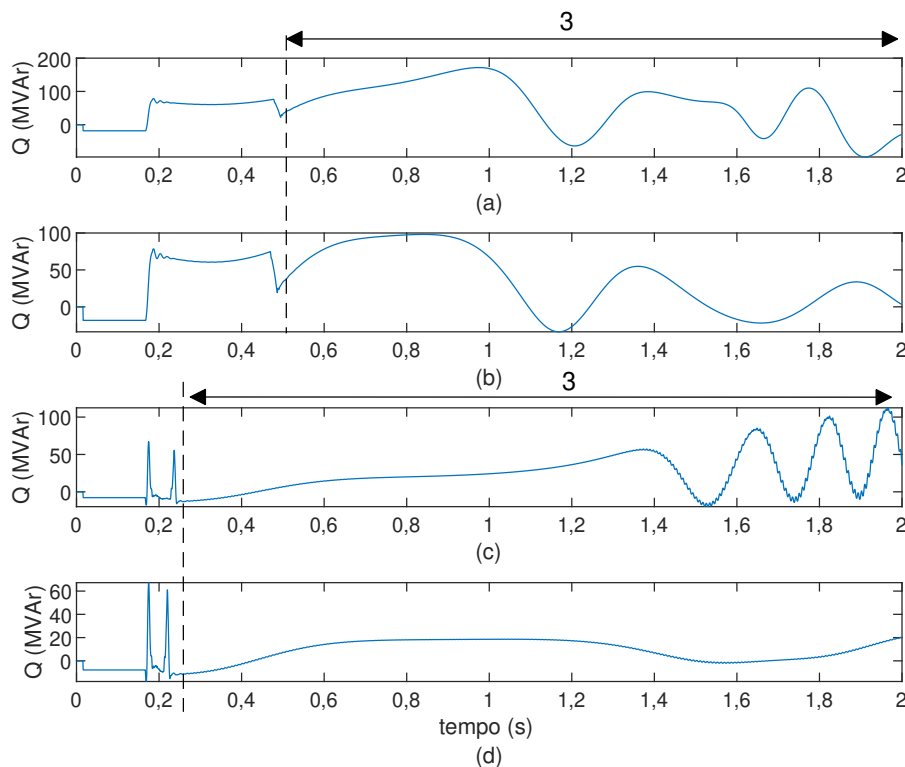


Figura 31 – Potência trifásica reativa calculada pelo relé R_9 .

Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável.

Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável

(f_{slip})⁶. E de acordo com Mahamedi et al. (2016), e Hasani e Haghjoo (2017), a frequência de escorregamento está tipicamente entre 0,3 e 7 Hz. Observando a Fig. 30 (a) e (b), que corresponde aos cenários de oscilações de potência simétricas, nota-se que a potência trifásica ativa oscila em baixa frequência (entre 0,3 e 7 Hz), conforme citado anteriormente. Na revisão da literatura realizada, não foi encontrado nenhum estudo discutindo sobre a frequência em que oscila a potência trifásica ativa durante oscilações de potência assimétricas. No entanto, uma análise da Fig. 30 (c) e (d) revela que P também oscila em baixas frequências.

Por fim, embora não esteja apresentado, foi observado que os valores de P e Q , calculados a partir do relé R_6 , possuem características semelhantes aos valores de P e Q , calculados pelo relé R_9 , ou seja, também oscilam em baixas frequências.

4.4.2 Frequência

Para cálculo da frequência foi implementado no *Matlab* a técnica de cruzamento por zero proposta por Sorrentino e Carvalho (2010)⁷. Esse algoritmo calcula a frequência a

⁶ A frequência de escorregamento (f_{slip}) é dada pela diferença das frequências calculadas nas duas extremidades da linha de transmissão.

⁷ Foi escolhida a técnica de cruzamento por zero, por ser um método eficiente diante de sinais senoidais que oscilam em baixas frequências, como acontece durante oscilações de potência.

partir do intervalo de tempo medido entre dois cruzamentos por zero do sinal amostrado. O instante exato do cruzamento por zero é obtido por interpolação linear entre duas amostras consecutivas de sinais opostos. Enquanto não há um novo cruzamento por zero é possível assumir que a frequência no instante atual é igual ao último valor calculado. No entanto, para melhorar a resposta diante de transitórios, a frequência no instante atual é considerada igual à média das últimas frequências calculadas (nessa etapa do trabalho considerou janelas com as últimas 32 amostras).

Na Fig. 32 estão apresentadas, na coluna da esquerda, as frequências f_9 e f_6 , calculadas respectivamente pelos relés R_9 e R_6 , e na coluna da direita está apresentada a frequência de escorregamento $f_{slip} = f_9 - f_6$. Para esses cálculos foram escolhidos⁸ os sinais de tensão registrados na fase *C*. Cada linha nessa figura correspondente a um tipo de oscilação de potência já descrito. De forma geral, o intervalo de tempo 3 mostra que

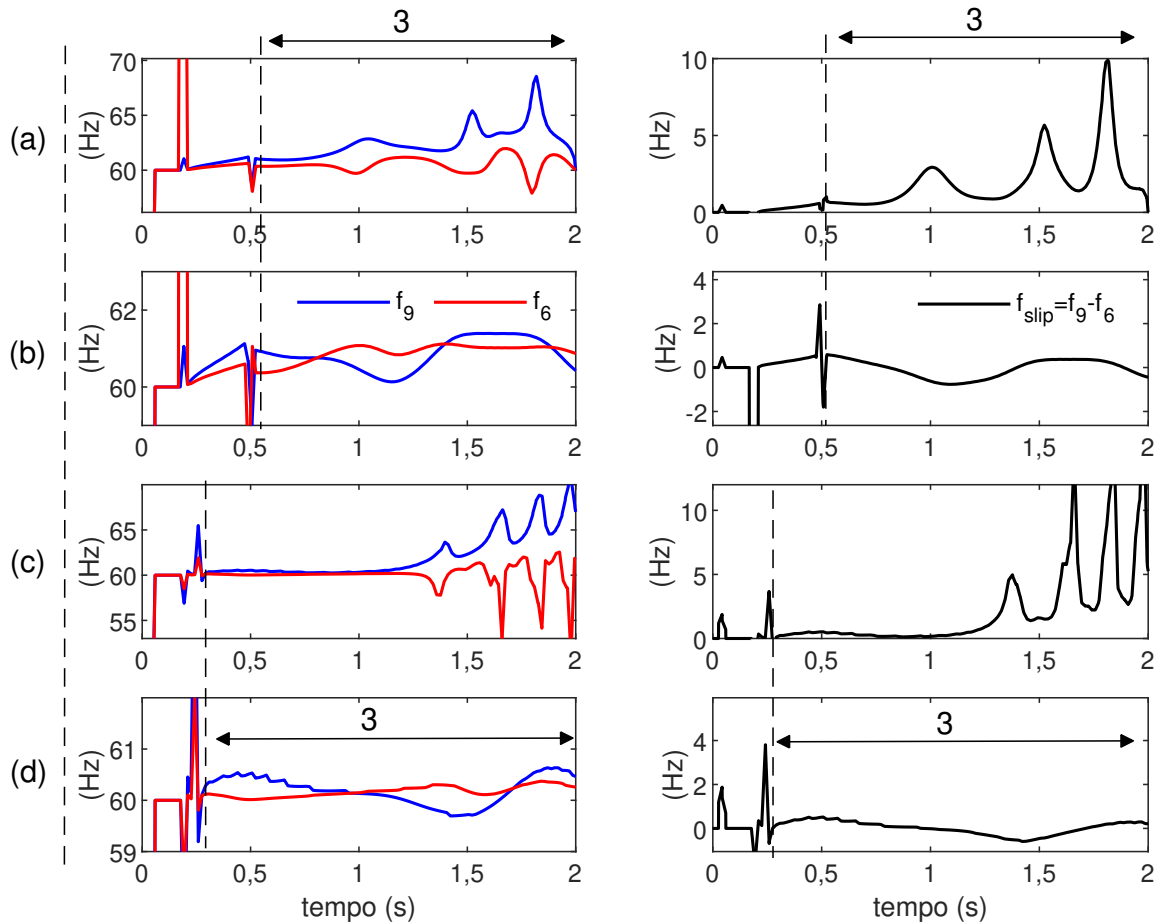


Figura 32 – Coluna da esquerda: frequências f_9 e f_6 . Coluna da direita: $f_{slip} = f_9 - f_6$. Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável. Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável

⁸ A fase *C* foi escolhida por estar presente durante as condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas geradas neste estudo. Vale lembrar que os casos de oscilações de potência assimétricas acontecem após abertura monopolar dos disjuntores (fase *A*).

durante todos os tipos de oscilações de potência, as frequências, f_9 e f_6 , variam com valor próximo a 60 Hz e não são iguais entre si. Em outras palavras, conforme esperado para condições de oscilações de potência, existe uma frequência de escorregamento (f_{slip}) que é diferente de zero e variável ao longo do tempo. Vale destacar que durante oscilações de potência estáveis (Fig. 32 (b) e (d)), f_{slip} possui menor amplitude de variação, enquanto durante oscilações de potência instáveis (Fig. 32 (a) e (c)) a amplitude de f_{slip} supera 7 Hz, valor limite citado por Mahamedi et al. (2016), e Hasani e Haghjoo (2017).

4.4.3 Defasagem Angular

Para cálculo da defasagem angular foram escolhidos⁸ apenas os fasores de tensão estimados na fase C . Sendo \dot{V}_C^{R9} os fasores de tensão calculados pelo relé R_9 , e \dot{V}_C^{R6} os fasores de tensão calculados pelo relé R_6 , tem-se

$$\dot{V}_C^{R9} = V_C^{R9} \angle \delta_{L9} \quad (4.7)$$

$$\dot{V}_C^{R6} = V_C^{R6} \angle \delta_{L6} \quad (4.8)$$

Então, a defasagem angular (δ_L), entre os fasores de tensão (\dot{V}_C^{R9} e \dot{V}_C^{R6}), é dada por

$$\delta_L = \delta_{L9} - \delta_{L6} \quad (4.9)$$

Na Fig. 33 (a) e (c) é mostrado que δ_L aumenta continuamente. Esse é um comportamento verificado apenas durante oscilações de potência instáveis, simétricas ou assimétricas. Nesses casos, o sistema não retorna a um ponto de estabilidade. Observa-se também que δ_L assume múltiplos de 180° , onde $\delta_L = m 180^\circ$. Sendo m um número ímpar, significa que a impedância está sobre a linha de transmissão LT_{96} (centro elétrico), conforme já mostrado no plano RX (Fig. 20 (a) e Fig.26 (a)).

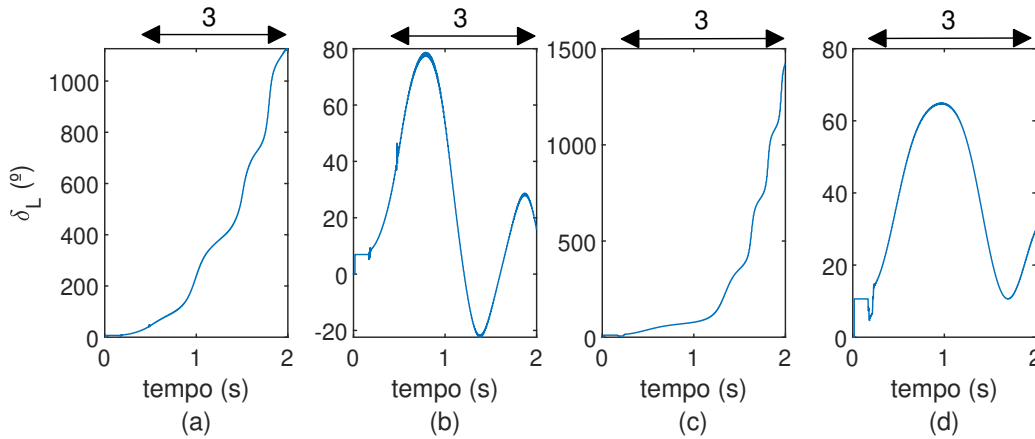


Figura 33 – Defasagem Angular (δ_L).

Oscilação de potência simétrica: (a) instável e (b) estável.

Oscilação de potência assimétrica: (c) instável e (d) estável

Já a Fig. 33 (b) e (d), mostra que δ_L oscila na forma senoidal durante oscilações de potência estáveis, não alcançando grandes valores ($\delta_L < 80^\circ$). Esse resultado está de acordo com Alves et al. (2018), onde diz que, se o valor máximo δ_L não superar 120° durante uma oscilação de potência, é esperado que o sistema elétrico retorne a estabilidade, como acontece nestes casos. Ainda analisando a Fig. 33 (b) e (d), embora os resultados estejam truncados no instante de tempo igual a 2 s, essa oscilação é amortecida e δ_L vai assumir um valor fixo caso o tempo de simulação prossiga, indicando que o sistema reencontra um novo ponto de operação aceitável, conforme esperado para oscilações de potência estáveis, não importando se simétricas ou assimétricas.

4.5 Considerações Finais

Nesse capítulo foi realizado um estudo que buscou caracterizar oscilações de potência simétricas, estáveis e instáveis, e oscilações de potência assimétricas, estáveis e instáveis. Pode ser destacado que foi investigada a formação de centro elétrico no plano RX e diversas outras grandezas elétricas, como: dinâmica dos sinais trifásicos de tensão e corrente, potências trifásicas ativa e reativa, variação de frequência e defasagem angular. As análises foram realizadas a partir de resultados obtidos de um sistema elétrico IEEE-9 barras, que foi modelado no software *Matlab/Simulink*.

Entre os resultados obtidos, destaca-se a ocorrência de sinais trifásicos perfeitamente equilibrados durante oscilações de potência simétricas. Enfatiza-se que essa é uma particularidade obtida a partir de simulações. No Capítulo 6 será mostrado, a partir da análise de casos reais de oscilações de potência simétricas, que os sinais trifásicos podem não ser perfeitamente equilibrados entre si. Outro importante resultado obtido neste capítulo se refere ao comportamento da frequência durante oscilações de potência. Os cálculos realizados nos barramentos 6 e 9 mostraram que as frequências não são iguais e, além disso, são variáveis ao longo do tempo. Essas características foram observadas diante de todos os tipos de oscilações de potência estudadas.

Por fim, vale destacar que os casos de oscilações de potência discutidos neste capítulo são utilizados nos capítulos 5 e 6 a seguir, como cenários de testes para análise de desempenho dos algoritmos propostos por este estudo.

Capítulo 5

Proteção de Linhas de Transmissão Durante Oscilações de Potência Simétricas

O estudo desenvolvido até aqui buscou caracterizar, principalmente quanto ao comportamento da impedância no plano RX , oscilações de potência simétricas e assimétricas. Assim, é importante mencionar o contexto deste capítulo, que se limita a estudar condições de oscilações de potência simétricas. Cenários que consideram oscilações de potência assimétricas serão contemplados no próximo capítulo.

Então, esse capítulo inicia-se apresentado uma formulação matemática, amplamente encontrada na literatura técnica atual, útil para modelar condições de oscilações de potência simétricas. Em seguida, é apresentada uma solução analítica originalmente desenvolvida nesse estudo, demonstrando que durante oscilações de potência simétricas, o filtro de Fourier, em conjunto com o teorema de Fortescue, estima fasores de sequência negativa girantes. Baseando-se nesse resultado (característica girante), são propostos novos algoritmos para melhorar o desempenho da proteção de distância durante oscilações de potência simétricas. Vale mencionar que esses algoritmos são capazes de realizar duas funções: bloqueio por oscilação de potência (ANSI 68) e desbloqueio por detecção de falta durante oscilações de potência. Por fim, são apresentados os resultados obtidos.

5.1 Fundamentos Teóricos

Esta seção inicia-se apresentando uma formulação matemática, disponível na literatura, para modelar oscilações de potência simétricas por meio de sinais trifásicos de tensão e corrente. Em seguida, é demonstrado, através de solução analítica originalmente proposta por este estudo, que o filtro de Fourier, em conjunto com o teorema de Fortescue, estima fasores de sequência negativa girantes durante oscilações de potência simétricas.

5.1.1 Sinais Trifásicos de Tensão e Corrente Durante Oscilações de Potência Simétricas

A Fig. 34 reapresenta o sistema elétrico já mostrado na Fig. 2. Ele é composto de duas máquinas modeladas por fontes de tensão (\dot{E}_S e \dot{E}_R), atrás de suas respectivas impedâncias (Z_S e Z_R), e uma linha de transmissão (Z_{LT}).

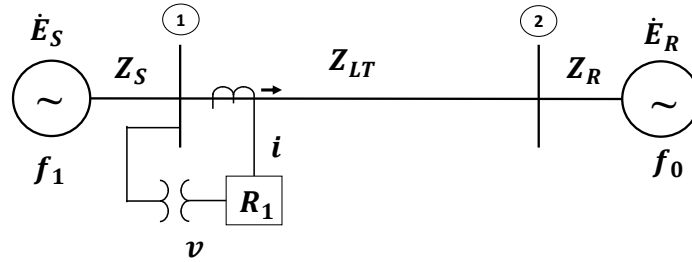


Figura 34 – Sistema elétrico trifásico de duas máquinas

A fonte de tensão \dot{E}_S opera na frequência f_1 (f_1 pode representar sobrefrequência ou subfrequência) e a fonte de tensão de tensão \dot{E}_R opera na frequência f_0 (f_0 representa a frequência fundamental). Durante oscilações de potência simétricas, os sinais trifásicos de tensão e corrente, registrados pelo relé R_1 que está conectado no barramento 1, podem ser escritos de acordo com o princípio da superposição, como

$$y_x(t) = Y_1 \text{sen}(2\pi f_1 t + \alpha_{y1} + \theta_x) + Y_0 \text{sen}(2\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \quad (5.1)$$

sendo y definido como v para tensão e i para corrente. As fases A , B ou C são representadas pela variável x . Y_0 e Y_1 são os valores de pico para as duas componentes, sendo que Y assumirá V para tensão e I para corrente. As frequências angulares são $2\pi f_0$ e $2\pi f_1$. Os ângulos de fase são α_{v0} e α_{v1} para tensão, e α_{i0} e α_{i1} para corrente. O deslocamento angular entre as três fases é dado por θ_x , sendo $\theta_A = 0$ rad, $\theta_B = -2\pi/3$ rad e $\theta_C = -4\pi/3$ rad.

Analisando a equação (5.1): nota-se que são adotados valores de pico (Y_0 e Y_1) iguais para as três fases, obtendo sinais trifásicos de tensão e corrente perfeitamente equilibrados entre si e, por isso, sua aplicação se restringe a retratar condições de oscilações de potência simétricas. Vale destacar que essa equação (5.1) é amplamente utilizada na literatura técnica atual para representar essas condições (Mahamedi e Zhu, 2012; Rao e Pradhan, 2015; Patel, 2019; Patel et al., 2019; Mahamedi e Fletcher, 2020).

5.1.2 Filtro de Fourier e o teorema de Fortescue: Análise no domínio do tempo contínuo

Conforme já apresentado na seção 4.2, nesse estudo é utilizado o filtro de Fourier de um ciclo não recursivo. Esse filtro foi escolhido por ser amplamente utilizado em relés

de proteção e ser eficiente no processo de estimação fasorial. A seguir são reescritas as equações que representam o filtro de Fourier¹ no domínio do tempo discreto.

$$E_{xy}(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y_x(n) \text{sen} [2\pi f_0 t(n)] \quad (5.2)$$

$$F_{xy}(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y_x(n) \text{cos} [2\pi f_0 t(n)] \quad (5.3)$$

$$\dot{Y}_x(k) = E_{xy}(k) + jF_{xy}(k) \quad (5.4)$$

A partir das equações (5.2), (5.3) e (5.4), uma representação equivalente para o filtro de Fourier pode ser escrita no domínio do tempo contínuo como

$$E_{xy}(t_f) = \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} y_x(t) \text{sen} (2\pi f_0 t) dt \quad (5.5)$$

$$F_{xy}(t_f) = \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} y_x(t) \text{cos} (2\pi f_0 t) dt \quad (5.6)$$

$$\dot{Y}_x(t_f) = E_{xy}(t_f) + jF_{xy}(t_f) \quad (5.7)$$

Nas equações (5.5) e (5.6), $y_x(t)$ é o sinal de entrada registrado durante a oscilação de potência, dado pela equação (5.1), e a janela de dados possui tempo de início t_i e tempo final t_f . Objetivando determinar o fasor $\dot{Y}_x(t_f)$, dado na equação (5.7), inicia-se substituindo (5.1) em (5.5), obtendo

$$\begin{aligned} E_{xy}(t_f) &= \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_0 \text{sen} (2\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \text{sen} (2\pi f_0 t) dt \\ &+ \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_1 \text{sen} (2\pi f_1 t + \alpha_{y1} + \theta_x) \text{sen} (2\pi f_0 t) dt \end{aligned} \quad (5.8)$$

Nota-se que a equação (5.8) é formada por duas integrais, respectivamente $I_{N1}(t_f)$ e $I_{N2}(t_f)$, ou seja

$$E_{xy}(t_f) = I_{N1}(t_f) + I_{N2}(t_f) \quad (5.9)$$

¹ Deve ser enfatizado que, o filtro de Fourier não recursivo considera em sua formulação matemática a frequência fundamental (f_0) do sistema elétrico. Dessa maneira, é objetivo desse filtro estimar fasores de frequência fundamental (f_0). Outro destaque, é que o filtro de Fourier não recursivo, mesmo diante de um sinal de entrada $y_x(n)$ de frequência fundamental f_0 , não estima fasores estacionários nessas condições. No entanto, correções angulares podem ser realizadas, e assim obter fasores estacionários. As equações (5.2), (5.3) e (5.4) incorporam estas correções angulares aplicadas ao filtro de Fourier não recursivo. Maiores detalhes do processo de correção angular podem ser consultadas no apêndice D.

Reescrevendo a primeira integral, $I_{N1}(t_f)$, apresentada na equação (5.8)

$$I_{N1}(t_f) = \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_0 \operatorname{sen}(2\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \operatorname{sen}(2\pi f_0 t) dt \quad (5.10)$$

Utilizando a propriedade trigonométrica apresentada em (5.11) na equação (5.10),

$$\operatorname{sen} a \operatorname{sen} b = \frac{1}{2} \left[\cos(a - b) - \cos(a + b) \right] \quad (5.11)$$

Obtém-se

$$I_{N1}(t_f) = \frac{Y_0}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} [\cos(\alpha_{y0} + \theta_x) - \cos(4\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x)] dt \quad (5.12)$$

Resolvendo (5.12)

$$I_{N1}(t_f) = \frac{Y_0}{(t_f - t_i)} \left\{ \cos(\alpha_{y0} + \theta_x)t - \frac{1}{4\pi f_0} \operatorname{sen}(4\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \right\} \Big|_{t_i}^{t_f} \quad (5.13)$$

$$I_{N1}(t_f) = \frac{Y_0}{(t_f - t_i)} \left\{ \cos(\alpha_{y0} + \theta_x)(t_f - t_i) - \frac{1}{4\pi f_0} \left[\operatorname{sen}(4\pi f_0 t_f + \alpha_{y0} + \theta_x) - \operatorname{sen}(4\pi f_0 t_i + \alpha_{y0} + \theta_x) \right] \right\} \quad (5.14)$$

Utilizando a propriedade trigonométrica apresentada em (5.15) na equação (5.14),

$$\operatorname{sen} a - \operatorname{sen} b = 2 \cos \left(\frac{a + b}{2} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{a - b}{2} \right) \quad (5.15)$$

Obtém-se

$$I_{N1}(t_f) = Y_0 \cos(\alpha_{y0} + \theta_x) - \frac{Y_0}{4\pi f_0(t_f - t_i)} \left[2 \cos \left(\frac{4\pi f_0(t_f + t_i) + 2\alpha_{y0} + 2\theta_x}{2} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{4\pi f_0(t_f - t_i)}{2} \right) \right] \quad (5.16)$$

Sabendo que a frequência fundamental f_0 é igual ao inverso do tamanho da janela de dados de um ciclo da fundamental, conforme

$$f_0 = \frac{1}{t_f - t_i} \quad (5.17)$$

Substituindo (5.17) em (5.16), nota-se que o termo apresentado em (5.18) é nulo

$$\operatorname{sen} \left(\frac{4\pi f_0(t_f - t_i)}{2} \right) = \operatorname{sen} \left(\frac{4\pi f_0}{2f_0} \right) = \operatorname{sen}(2\pi) = 0 \quad (5.18)$$

Portanto, a equação (5.16) se reduz a

$$I_{N1}(t_f) = Y_0 \cos(\alpha_{y0} + \theta_x) \quad (5.19)$$

Voltando a equação (5.8) e reescrevendo a segunda integral $I_{N2}(t_f)$

$$I_{N2}(t_f) = \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_1 \sin(2\pi f_1 t + \alpha_{y1} + \theta_x) \sin(2\pi f_0 t) dt \quad (5.20)$$

Aplicando em (5.20) a propriedade trigonométrica apresentada em (5.11), obtém-se

$$I_{N2}(t_f) = \frac{Y_1}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} [\cos(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) - \cos(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x)] dt \quad (5.21)$$

Sendo

$$\begin{aligned} \omega^+ &= 2\pi(f_1 - f_0) \\ \omega^- &= 2\pi(f_1 + f_0) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Nesse ponto destaca-se a frequência angular ω^- . Embora ω^- represente a soma das frequências f_0 e f_1 , o resultado final dessa solução mostrará que o fasor de sequência negativa é dependente dessa variável e, por isso, foi escolhida essa notação. Resolvendo (5.21), obtém-se

$$I_{N2}(t_f) = \frac{Y_1}{(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} \sin(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) - \frac{1}{\omega^-} \sin(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x) \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (5.23)$$

Portanto, a solução da equação (5.8), que se refere à parte real $E_{xy}(t_f)$ do fasor, é obtida a partir da soma dos resultados apresentados em (5.19) e (5.23). Assim

$$\begin{aligned} E_{xy}(t_f) &= Y_0 \cos(\alpha_{y0} + \theta_x) \\ &+ \frac{Y_1}{(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} \sin(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) - \frac{1}{\omega^-} \sin(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x) \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Após determinado o coeficiente referente à parte real $E_{xy}(t_f)$, é objetivo obter o coeficiente referente à parte imaginária $F_{xy}(t_f)$ do fasor. Inicia-se substituindo o sinal de entrada dado pela equação (5.1) na equação (5.6), obtendo

$$\begin{aligned} F_{xy}(t_f) &= \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_0 \sin(2\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \cos(2\pi f_0 t) dt \\ &+ \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_1 \sin(2\pi f_1 t + \alpha_{y1} + \theta_x) \cos(2\pi f_0 t) dt \end{aligned} \quad (5.25)$$

Aplicando na equação (5.25) a mesma metodologia de cálculos já apresentada, obtém-se

$$\begin{aligned} F_{xy}(t_f) &= Y_0 \sin(\alpha_{y0} + \theta_x) \\ &- \frac{Y_1}{(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} \cos(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) + \frac{1}{\omega^-} \cos(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x) \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \end{aligned} \quad (5.26)$$

Substituindo (5.24) e (5.26) em (5.7), o fasor $\dot{Y}_x(t_f)$ é obtido

$$\begin{aligned} \dot{Y}_x(t_f) = & Y_0 \cos(\alpha_{y0} + \theta_x) + jY_0 \sin(\alpha_{y0} + \theta_x) \\ & + \frac{Y_1}{(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} \sin(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) - \frac{j}{\omega^+} \cos(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \\ & - \frac{Y_1}{(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^-} \sin(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x) + \frac{j}{\omega^-} \cos(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x) \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Reescrevendo (5.27) na notação exponencial

$$\dot{Y}_x(t_f) = Y_0 e^{j(\alpha_{y0} + \theta_x)} + \frac{Y_1}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x)} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x)} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (5.28)$$

Expandindo a equação (5.28) para as fases A , B e C

$$\dot{Y}_A(t_f) = Y_0 e^{j(\alpha_{y0} + 0)} + \frac{Y_1}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} + 0)} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + 0)} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (5.29)$$

$$\dot{Y}_B(t_f) = Y_0 e^{j(\alpha_{y0} - \frac{2\pi}{3})} + \frac{Y_1}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} - \frac{2\pi}{3})} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} - \frac{2\pi}{3})} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (5.30)$$

$$\dot{Y}_C(t_f) = Y_0 e^{j(\alpha_{y0} - \frac{4\pi}{3})} + \frac{Y_1}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} - \frac{4\pi}{3})} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} - \frac{4\pi}{3})} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (5.31)$$

Nesse ponto cabe uma análise das equações (5.29), (5.30) e (5.31). Observa-se que o primeiro termo no lado direito, nas três equações, corresponde a fasores de mesmo valor de pico Y_0 , porém deslocados de 120° . Além disso, observa-se que são fasores estacionários, que independem da variável tempo (t). Esses fasores foram estimados devido à contribuição dada pela fonte representada à direita na Fig. 34, que opera na frequência fundamental f_0 . Já o segundo termo, novamente nas três equações, representa fasores não estacionários. Eles dependem da variável tempo (t) e da frequência angular ω^- e ω^+ .

Voltando ao objetivo final, que é calcular o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, recomeça-se aplicando o teorema de Fortescue aos fasores obtidos em (5.29), (5.30) e (5.31). Assim, $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ pode ser calculado como

$$\dot{Y}_{a2}(t_f) = \frac{1}{3} \left[\dot{Y}_A(t_f) + a^2 \dot{Y}_B(t_f) + a \dot{Y}_C(t_f) \right] \quad (5.32)$$

onde o operador a é definido como $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$. Substituindo (5.29), (5.30) e (5.31) em (5.32),

tem-se

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{a2}(t_f) = & \frac{1}{3} \left\{ Y_0 \left[e^{j\alpha_{y0}} + e^{j\frac{4\pi}{3}} e^{j(\alpha_{y0} - \frac{2\pi}{3})} + e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{j(\alpha_{y0} - \frac{4\pi}{3})} \right] \right. \\ & + \frac{Y_1}{j(t_f - t_i)\omega^+} \left[e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} + 0)} + e^{j\frac{4\pi}{3}} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} - \frac{2\pi}{3})} + e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} - \frac{4\pi}{3})} \right] \Big|_{t_i}^{t_f} \\ & \left. + \frac{Y_1}{j(t_f - t_i)\omega^-} \left[e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + 0)} + e^{j\frac{4\pi}{3}} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} - \frac{2\pi}{3})} + e^{j\frac{2\pi}{3}} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} - \frac{4\pi}{3})} \right] \Big|_{t_i}^{t_f} \right\} \quad (5.33) \end{aligned}$$

Reorganizando os termos apresentados na equação (5.33), obtém-se

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{a2}(t_f) = & \frac{1}{3} \left\{ Y_0 e^{j\alpha_{y0}} \left[1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] \right. \\ & + \frac{Y_1 e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1})}}{j(t_f - t_i)\omega^+} \left[1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] \Big|_{t_i}^{t_f} \\ & \left. + \frac{Y_1 e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1})}}{j(t_f - t_i)\omega^-} \left[1 + e^{j2\pi} + e^{j2\pi} \right] \Big|_{t_i}^{t_f} \right\} \quad (5.34) \end{aligned}$$

Observando a equação (5.34), nota-se a soma de três termos. Os dois primeiros são nulos, pois entre colchetes tem-se a soma de três fasores com valores de pico iguais a 1, porém deslocados de 120° . Portanto, o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, durante oscilações de potência simétricas, é dado por

$$\dot{Y}_{a2}(t_f) = \frac{Y_1}{(t_f - t_i)\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + \frac{\pi}{2})} \Big|_{t_i}^{t_f} = \frac{f_0 Y_1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + \frac{\pi}{2})} \Big|_{t_i}^{t_f} \quad (5.35)$$

Nesse momento podem ser feitas duas importantes observações:

- a equação (5.35) é independente dos parâmetros de impedância do sistema elétrico, o que possibilitará propor um esquema de proteção de simples configuração, dispensando a necessidade de estudos sistêmicos complexos para definir ajustes de parametrização;
- a equação (5.35) representa a soma de dois fasores de mesma frequência angular ω^- , sendo um fasor dependente do instante inicial t_i da janela de dados e o outro fasor dependente do instante final t_f . Conseqüentemente o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ é dependente da frequência angular ω^- . Isso significa que, durante oscilações de potência, o filtro de Fourier e o teorema de Fortescue calculam fasores de sequência negativa girantes $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, de frequência angular ω^- . Logo, essa análise indica que a frequência angular $\omega^- = 2\pi(f_1 + f_0)$ é um potencial parâmetro para monitorar condições de oscilações de potência simétricas.

5.1.3 Análise Gráfica do Fasor Girante de Sequência de Negativa

Embora a equação (5.35) não possa ser reduzida, uma análise gráfica pode favorecer seu entendimento. Reescrevendo a equação (5.35) usando notação polar

$$\dot{Y}_{a2}(t_f) = \frac{f_0 Y_1}{\omega^-} \angle -(\omega^- t_f + \alpha_{y1} + \pi/2) - \frac{f_0 Y_1}{\omega^-} \angle -(\omega^- t_i + \alpha_{y1} + \pi/2) \quad (5.36)$$

Escrevendo (5.36) como

$$\dot{Y}_{a2}(t_f) = \dot{F}_1^-(t_f) - \dot{F}_2^-(t_i) = Y_{a2} \angle \Phi_{ya2}(t_f) \quad (5.37)$$

Sendo

$$\dot{F}_1^-(t_f) = \frac{f_0 Y_1}{\omega^-} \angle -(\omega^- t_f + \alpha_{y1} + \pi/2) \quad (5.38)$$

$$\dot{F}_2^-(t_i) = \frac{f_0 Y_1}{\omega^-} \angle -(\omega^- t_i + \alpha_{y1} + \pi/2) \quad (5.39)$$

onde \dot{F}_1^- e \dot{F}_2^- são os fasores calculados respectivamente nos instantes t_f e t_i , e Y_{a2} e $\Phi_{ya2}(t_f)$ correspondem ao valor de pico e ângulo. Conforme já definido, Y e y correspondem a sinais de tensão e corrente. Assim, a equação (5.37) representa os fasores de sequência negativa de tensão e corrente como

$$\dot{V}_{a2}(t_f) = V_{a2} \angle \Phi_{va2}(t_f) \quad (5.40)$$

$$\dot{I}_{a2}(t_f) = I_{a2} \angle \Phi_{ia2}(t_f) \quad (5.41)$$

Para ilustrar a característica girante do fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, considere que o sistema elétrico apresentado na Fig. 34 enfrenta uma oscilação de potência simétrica, admitindo as seguintes condições:

- a fonte à direita está na frequência fundamental f_0 ;
- a fonte à esquerda está na frequência $f_1 = 1,1f_0$ (sobrefrequência);
- ângulo de fase nulo para α_{y1} .

Na Tabela 3 estão apresentados fasores $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$, estimados de acordo com as equações (5.38) e (5.39), para duas janelas de dados. Para a segunda janela de dados, os ângulos de fase são incrementados por $\omega^- \Delta t$.

Considerando o número de amostras por ciclo da fundamental $N_a = 32$, esse incremento ($\omega^- \Delta t$) corresponde à $0,13125\pi$ rad ou $23,625^\circ$.

$$\omega^- \Delta t = 2\pi(f_0 + 1,1f_0) \frac{1}{N_a f_0} = 0,13125\pi \text{ rad} \quad (5.42)$$

ou

$$\omega^- \Delta t = 0,13125\pi \frac{180^\circ}{\pi} = 23,625^\circ \quad (5.43)$$

Na Fig. 35 estão representados os fasores $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$, calculados na Tabela 3, e o fasor resultante de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$. Observa-se que existe um deslocamento entre $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$, resultando no giro do fasor $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, como esperado para uma condição de oscilação de potência simétrica. Além disso, vale destacar que o giro do fasor acontece no sentido horário.

Tabela 3 – Oscilação de potência simétrica. Fasores estimados para duas janelas de dados.

Janela de dados	Tempo		$\dot{F}_1^-(t_f)$	$\dot{F}_2^-(t_i)$
	t_i	t_f		
1	0	$\frac{1}{f_0}$	$\frac{Y_1}{4,2\pi} \angle -4,7\pi$	$\frac{Y_1}{4,2\pi} \angle -\frac{\pi}{2}$
2	Δt	$\frac{1}{f_0} + \Delta t$	$\frac{Y_1}{4,2\pi} \angle -(4,7\pi + \omega^- \Delta t)$	$\frac{Y_1}{4,2\pi} \angle -\left(\frac{\pi}{2} + \omega^- \Delta t\right)$

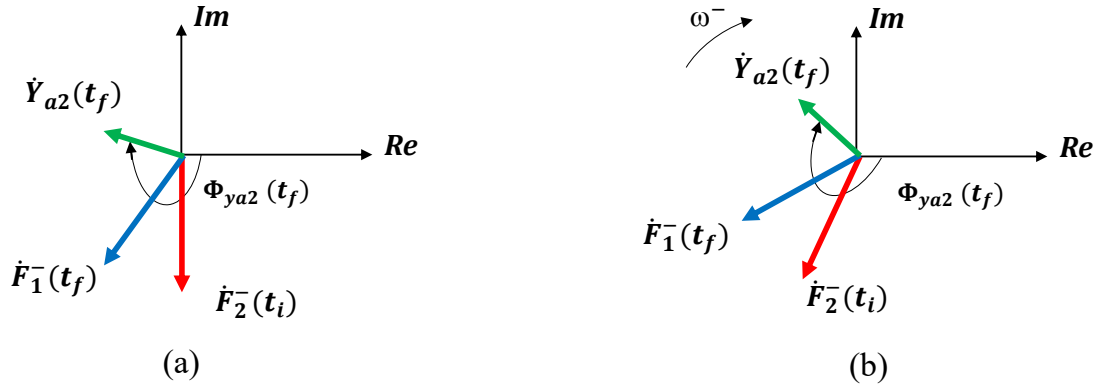


Figura 35 – Oscilação de potência simétrica. Fasores de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ girantes. (a) Janela de dados 1. (b) Janela de dados 2 (incremento de $23,625^\circ$).

Outra análise é realizada a seguir. Porém, agora é considerado que o sistema está em regime permanente senoidal, isto é, as duas fontes de tensão operando na frequência fundamental f_0 . Na Tabela 4 estão apresentados os fasores estimados $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$, considerando novamente duas janelas de dados. Para a segunda janela de dados há o incremento de ângulo de $\omega^- \Delta t$, que nesse caso corresponde a $0,125\pi$ rad ou $22,5^\circ$, conforme a seguir

$$\omega^- \Delta t = 2\pi(f_0 + f_0) \frac{1}{N_a f_0} = 0,125\pi \text{ rad} \quad (5.44)$$

ou

$$\omega^- \Delta t = 0,125\pi \frac{180^\circ}{\pi} = 22,5^\circ \quad (5.45)$$

Na Fig. 36 estão representados os fasores $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$, já calculados na Tabela 4. Nota-se que o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ é nulo (indicado por um círculo na cor verde). De outra maneira, pode-se dizer que o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, calculado analiticamente, possui módulo zero e ângulo indeterminado, pois não há defasagem entre os fasores $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$. Esse resultado era esperado porque o sistema elétrico trabalha em regime permanente senoidal na frequência fundamental (f_0).

Tabela 4 – Regime permanente senoidal. Fasores estimados para duas janelas de dados.

Janela de dados	Tempo		$\dot{F}_1^-(t_f)$	$\dot{F}_2^-(t_i)$
	t_i	t_f		
1	0	$\frac{1}{f_0}$	$\frac{Y_1}{4\pi} \angle -4,5\pi$	$\frac{Y_1}{4\pi} \angle -\frac{\pi}{2}$
2	Δt	$\frac{1}{f_0} + \Delta t$	$\frac{Y_1}{4\pi} \angle -(4,5\pi + \omega^- \Delta t)$	$\frac{Y_1}{4\pi} \angle -\left(\frac{\pi}{2} + \omega^- \Delta t\right)$

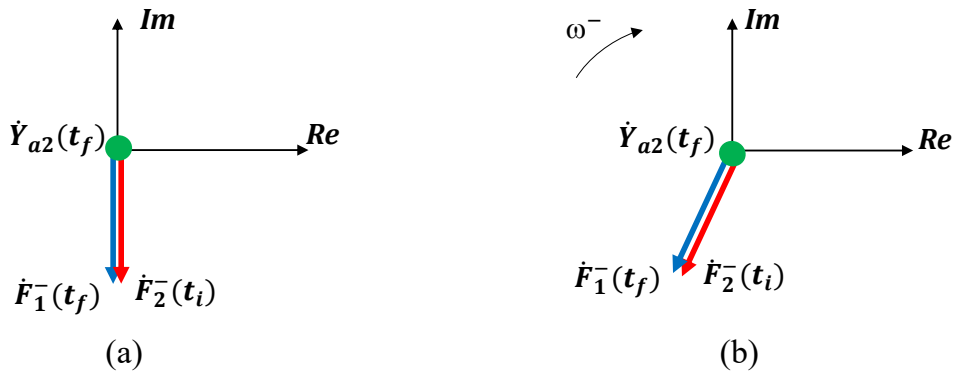


Figura 36 – Regime permanente senoidal. Fasores de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ nulos. (a) Janela de dados 1. (b) Janela de dados 2.

De maneira geral, os resultados apresentados na Fig. 35 e na Fig. 36 comprovam a característica generalista da equação (5.35), que apresenta resposta coerente para condições de oscilações de potência simétricas ($\dot{Y}_{a2}(t_f)$ girantes), e regime permanente senoidal na frequência fundamental ($\dot{Y}_{a2}(t_f)$ nulos).

5.1.4 Considerações a Respeito dos Fasores de Sequência Negativa Estimados Durante Oscilações de Potência Simétricas

Essa seção visa validar a equação (5.35) por meio de resultados simulados, onde será mostrada a característica girante do fasor de sequência negativa durante oscilações de potência simétricas. Para isso é considerado o sistema elétrico IEEE-9 barras, já apresentado

na Fig. 12, e a oscilação de potência simétrica e instável, também já caracterizada na seção 4.3.1. Para simplificar, a análise a seguir é realizada considerando apenas os sinais trifásicos de tensão, mas é também aplicável aos sinais de corrente. Na Fig. 37 estão rerepresentados os sinais trifásicos de tensão registrados pelo relé R_9 . Esses sinais são repetidos aqui, mas são os mesmos apresentados na Fig. 18 (a).

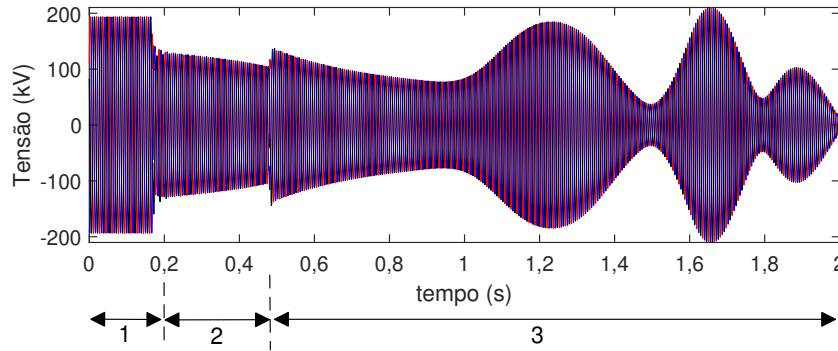


Figura 37 – Oscilação de potência simétrica e instável (intervalo de tempo 3). Sinais trifásicos de tensão registrados pelo relé R_9 .

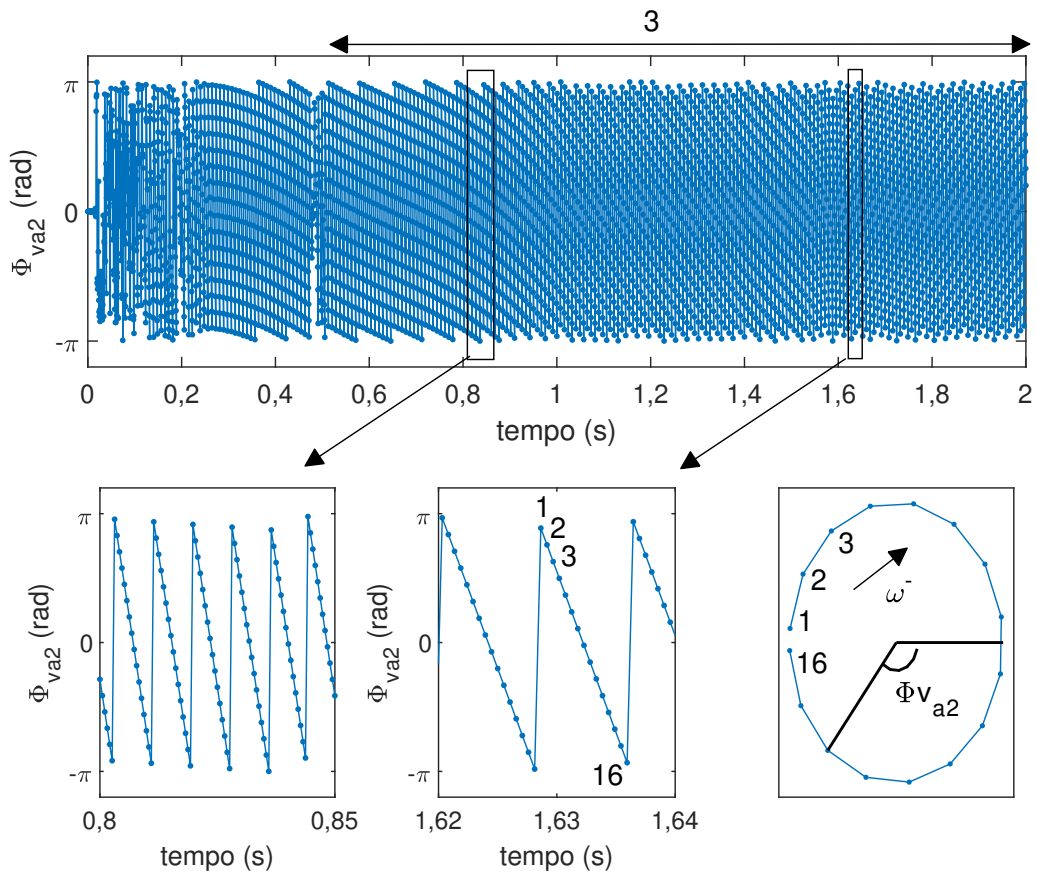


Figura 38 – Ângulo do fasor tensão de sequência negativa Φ_{va2} . Destaque em dois instantes diferentes que mostram a característica girante do fasor (onda dente de serra decrescente).

Inicialmente, a partir do filtro de Fourier e do teorema de Fortescue, são calculados os fasores de sequência negativa. Na Fig. 38 está apresentado o ângulo do fasor de tensão de sequência negativa Φ_{va2} , obtido a partir dos sinais trifásicos de tensão apresentados na Fig. 37. Na Fig. 38 são escolhidos dois intervalos de tempo distintos, destacando a onda dente de serra decrescente, o que confirma a característica girante do fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ durante oscilações de potência simétricas².

Nesse ponto vale destacar a robustez da equação (5.35). Isto é, embora a equação (5.35), que representa o fasor de sequência negativa girante, tenha sido demonstrada considerando f_0 e f_1 como valores fixos de frequências, os resultados obtidos na Fig. 38 mostram que essa equação também é válida diante de frequências variáveis. Isso é confirmado voltando na Fig. 32 (a), onde é possível lembrar que as frequências f_6 e f_9 calculadas, respectivamente, nos barramentos 6 e 9 estão mudando a todo instante durante essa oscilação de potência simétrica.

Analisando agora numericamente: como $f_0 = 60$ Hz e f_1 pode assumir quaisquer valores entre 53 e 67 Hz, uma vez que a frequência de escorregamento está tipicamente entre 0,3 e 7 Hz (Mahamedi et al., 2016; Hasani e Haghjoo, 2017), logo, durante oscilações de potência, o fasor tensão de sequência negativa está girando com frequência angular $\omega^- = 2\pi(f_1 + f_0)$ superior a 709,99 rad/s e inferior a 797,96 rad/s. Assim, a frequência angular ω^- é aproximadamente o dobro da frequência angular em regime permanente na frequência fundamental (376,99 rad/s). Então, a contagem de amostras registradas em um período da onda dente de serra será aproximadamente a metade de amostras presente em um período da frequência fundamental. Detalhadamente, as equações (5.46) e (5.47) mostram essa relação inversa considerando a frequência de amostragem de 1920 Hz, que corresponde a 32 amostras por ciclo da frequência fundamental.

$$\frac{376,99}{709,99} = \frac{32}{\text{N}^\circ \text{ de amostras}} \Rightarrow \text{N}^\circ \text{ de amostras} = 16,99 \quad (5.46)$$

$$\frac{376,99}{797,96} = \frac{32}{\text{N}^\circ \text{ de amostras}} \Rightarrow \text{N}^\circ \text{ de amostras} = 15,11 \quad (5.47)$$

Esses resultados mostram que, para um fasor de sequência negativa, durante oscilações de potência, são necessários no mínimo de 15,11 e no máximo de 16,99 amostras para completar um período da onda dente de serra. Como a contagem de amostras é um número inteiro, são necessárias 16 amostras. Veja na Fig. 38 a indicação de contagem de amostras por período da onda dente de serra.

Dessa forma, foi apresentado o princípio fundamental dos algoritmos propostos que serão apresentados nas seções seguintes. Ou seja, a partir do monitoramento dos ângulos

² Nesse momento é dado destaque a característica girante do fasor de sequência negativa durante oscilações de potência simétricas. O comportamento do ângulo durante regime permanente senoidal será discutido na seção 5.3.1.

dos fasores de sequência negativa de tensão e corrente, são propostos novos algoritmos capazes de realizar:

- o bloqueio da proteção de distância por detecção de oscilação de potência simétrica (ANSI 68);
- desbloqueio da proteção de distância por detecção de falta na linha protegida durante oscilações de potência simétricas.

5.2 Algoritmo Proposto

Antes de iniciar a apresentação dos algoritmos é importante observar a Fig. 39, que novamente ilustra condições de oscilações de potência simétricas, estáveis e instáveis, no plano RX . Além de mostrar duas zonas de operação da proteção de distância (Z_1 e Z_2), está representada também uma zona de partida (Z_p), externa e concêntrica a Z_2 . Todas essas informações são necessárias para compreensão dos algoritmos propostos que são apresentados a seguir.

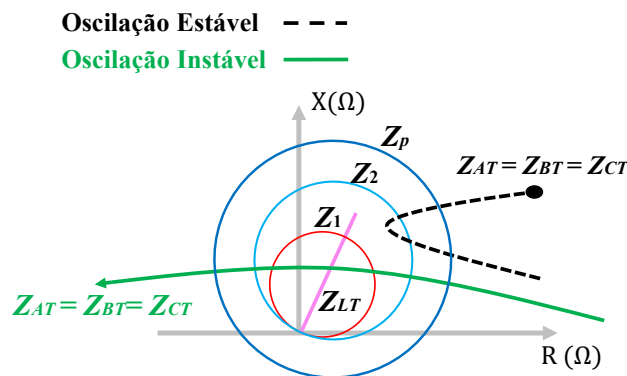


Figura 39 – Plano RX . Excursão da impedância durante oscilações de potência simétricas, estável e instável. Característica Mho.

5.2.1 Algoritmo Proposto para Detectar o Padrão de Onda Dente de Serra (ODS)

A equação (5.35) e a Fig. 38 confirmam que os fasores de sequência negativa giram, na frequência angular ω^- , durante oscilações de potência simétricas. Dessa maneira, é proposto um algoritmo para identificar essa característica, ou seja, detectar o padrão de onda dente de serra nos ângulos dos fasores de sequência negativa de tensão e corrente, respectivamente Φ_{va2} e Φ_{ia2} . A Fig. 40 apresenta o fluxograma desse algoritmo. A fim de facilitar o entendimento, os principais blocos são numerados (1, 2 e 3). Observa-se que esses blocos possuem estratégias, baseadas em limites, que são definidas para detectar o

padrão de onda dente de serra. No entanto, não são necessários estudos de simulação para definir esses limites e, portanto, estes podem ser configurados em fábrica, uma vez que a equação (5.35) é independente dos parâmetros do sistema elétrico. O algoritmo proposto é descrito a seguir.

O algoritmo é aplicado de maneira independente e simultânea aos sinais de tensão (y assume v) e de corrente (y assume i). Assim, o algoritmo tem início realizando a estimação fasorial. Para isso é utilizado o filtro de Fourier de um ciclo não recursivo. Em seguida é aplicado o teorema de Fortescue para calcular os fasores de sequência negativa e então são selecionados os ângulos dos fasores de sequência negativa de tensão e corrente. As etapas descritas até aqui são normalmente realizadas por relés de proteção. Então, a partir do bloco 1 iniciam-se as contribuições deste algoritmo. Nesse bloco 1, é calculada a diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{ya2}$) de acordo com

$$\Delta\Phi_{ya2}(k) = \Phi_{ya2}(k) - \Phi_{ya2}(k - 1) \tag{5.48}$$

onde y pode corresponder a sinais de tensão ou corrente como antes.

A inequação dada no bloco 1 ($\Delta\Phi_{ya2}(k) > 1,5\pi$) é explicada com auxílio da Fig. 41, que corresponde ao primeiro intervalo em destaque na Fig. 38. Observa-se na Fig. 41

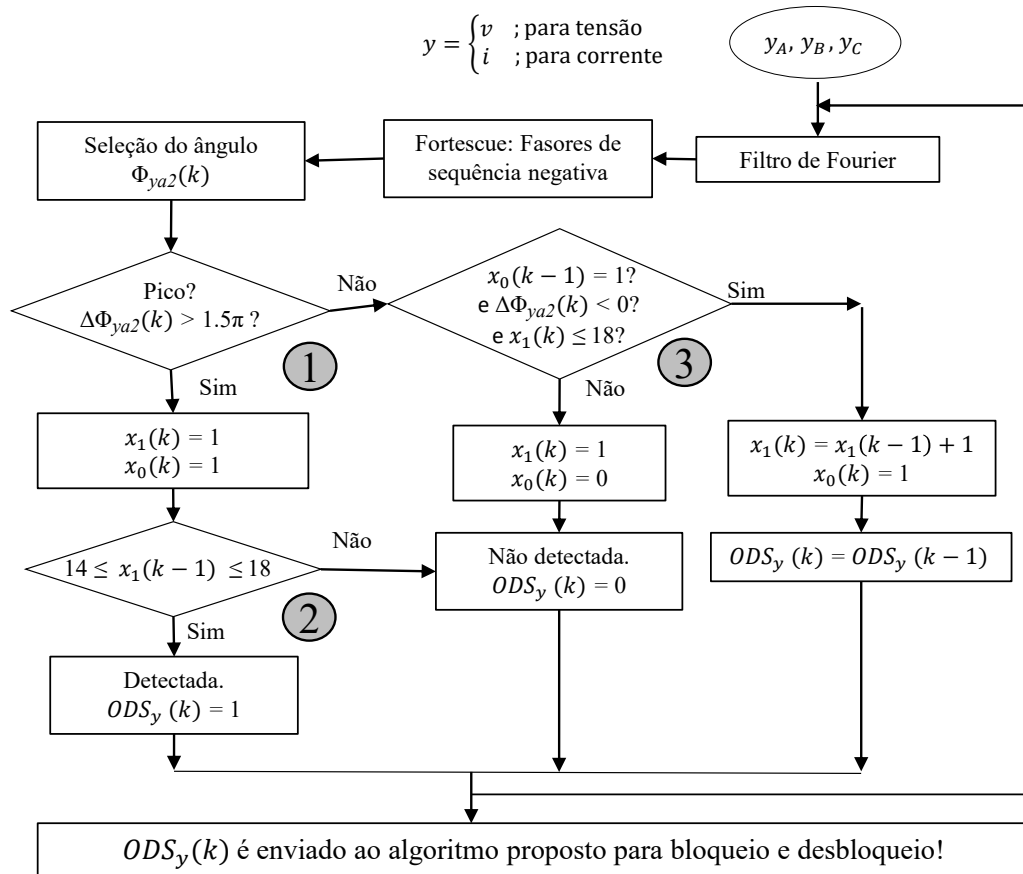


Figura 40 – Fluxograma do algoritmo proposto para detectar o padrão de onda dente de serra.

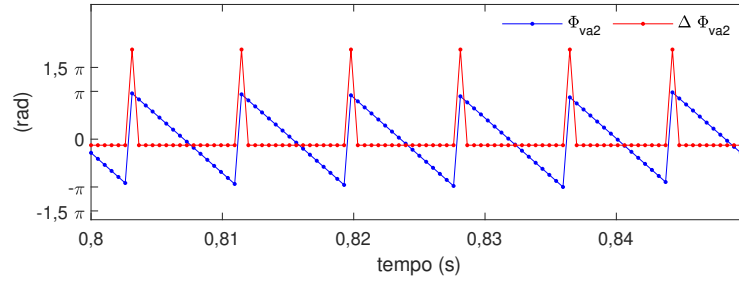


Figura 41 – $\phi_{va2}(k)$ e $\Delta\phi_{va2}(k)$ para o primeiro intervalo já mostrado na Fig. 38 (entre 0,8 s e 0,85 s).

que o padrão de onda dente de serra (Φ_{va2}) assume valor próximo a $-\pi$ radianos e de repente salta para um valor próximo a $+\pi$ radianos, nessa sequência. Quando $\Phi_{va2}(k)$ está próximo a $+\pi$ radianos, $\Delta\Phi_{va2}(k)$ é quase 2π radianos. Portanto, se $\Delta\Phi_{va2}(k)$ é maior que $1,5\pi$ radianos, é seguro indicar o início de um novo período ($x_0(k) = 1$) e a contagem de amostras é iniciada ($x_1(k) = 1$).

Em seguida o algoritmo verifica a contagem de amostras obtida até o instante anterior, $x_1(k-1)$, momento que encerrou um período. Se a contagem de amostras encontrada $x_1(k-1)$ for maior ou igual a 14 e menor ou igual a 18 é detectado o padrão de onda dente de serra ($ODS_y(k) = 1$), como mostrado no bloco 2. Caso contrário não é encontrado o padrão de onda dente de serra ($ODS_y(k) = 0$). Observa-se que foi adotada uma margem de segurança, em relação aos limites originais de 15,11 e 16,99 definidos na seção 5.1.4. Isso proporcionará o desempenho correto do algoritmo caso a frequência de escorregamento (f_{slip}) ultrapasse um pouco o valor de 7 Hz. Uma vez identificado um novo período, nos instantes subsequentes há o monitoramento se a onda é decrescente ($\Delta\Phi_{va2}(k) < 0$) e se a contagem de amostras $x_1(k)$ continua menor ou igual a 18 (bloco 3). Não obedecer a esse último critério significa que $x_1(k)$ superou 18 e ainda não completou um período da onda dente de serra ($ODS_y(k) = 0$). Por fim, a saída $ODS_y(k)$ é enviada para o algoritmo proposto ALG-A, onde serão realizadas as funções de bloqueio e desbloqueio da proteção de distância. As variáveis x_0 , x_1 e $\Delta\Phi_{va2}$ são inicializadas com valor zero. A seguir é apresentado o algoritmo proposto ALG-A.

5.2.2 Algoritmo Proposto para Bloqueio e Desbloqueio da Proteção de Distância (ALG-A).

Na seção anterior foi mostrado que, se o padrão de onda dente de serra é detectado, ODS_v e ODS_i saltam de 0 para 1. Se ODS_v e ODS_i são iguais a 1 e a impedância tem se deslocado em direção à zona de partida, tem-se a ocorrência de uma oscilação de potência e, então, é desejado que o bloqueio das zonas de proteção aconteça. Esse é o princípio básico do algoritmo proposto ALG-A, que será detalhado a seguir e está apresentado na Fig. 42.

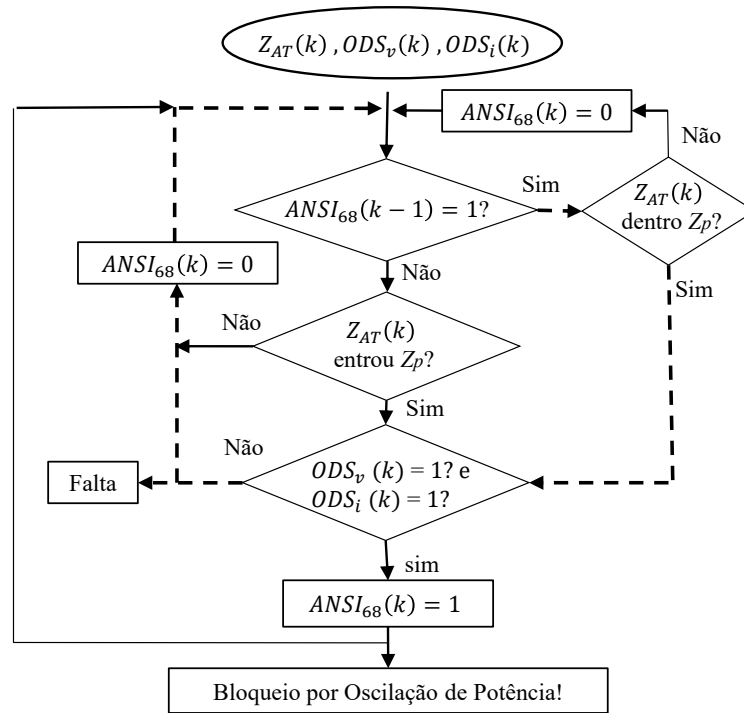


Figura 42 – Algoritmo proposto ALG-A: Bloqueio e desbloqueio da proteção de distância.

Esse algoritmo se aplica aos seis loops da proteção de distância. Para simplificar é considerada somente a impedância Z_{AT} , vista no loop AT. A variável $ANSI_{68}$ (bloqueio por oscilação potência) é inicializada com valor zero. Em seguida é monitorada a entrada da impedância Z_{AT} na zona de partida Z_p . Se a impedância Z_{AT} entra na zona de partida Z_p , e se ODS_v e ODS_i são iguais a 1, a proteção de distância é bloqueada ($ANSI_{68}(k) = 1$) por ocorrência de oscilação de potência. Resumidamente pode-se dizer que o bloqueio está condicionado à existência do padrão de onda dente de serra, no momento exato que a impedância entra na zona de partida. Uma vez realizado o bloqueio, o algoritmo começa a monitorar o desbloqueio ($ANSI_{68}$ retornar a zero), que pode ocorrer caso a impedância Z_{AT} saia de dentro zona de partida Z_p , como acontece durante uma oscilação de potência estável, ou caso ocorra uma falta durante a oscilação de potência (ODS_v e ODS_i mudam de nível lógico 1 para 0). Essa segunda opção corresponde ao caminho tracejado na Fig. 42 e significa a perda do padrão de onda dente de serra, causado por incidência de uma falta quando a impedância Z_{AT} está dentro da zona de partida Z_p .

5.3 Resultados: Cenários de Testes Obtidos via Software de Simulação

Uma vez apresentados os algoritmos desenvolvidos neste estudo, eles são avaliados nesta seção. Para isso, os sinais trifásicos de tensão e corrente são obtidos a partir do sistema elétrico IEEE-9 barras, já apresentado na Fig. 12. Conforme mencionado, esse

sistema é modelado no software *Matlab/Simulink*. Será avaliado o relé R_9 , que está próximo ao barramento 9, e o relé R_6 , que está próximo ao barramento 6. Ambos protegem a linha de transmissão LT_{96} .

Já o sistema de proteção está configurado de acordo com a Fig. 39, onde se pode notar que são adotados parâmetros normalmente utilizados em proteção de distância de linhas de transmissão. Os relés R_9 e R_6 utilizam característica Mho. As zonas de proteção são ajustadas em função do comprimento da linha de transmissão LT_{96} (Z_{LT-96}), sendo o alcance de zona 1 (Z_1) igual a 80% e de zona 2 (Z_2) igual a 120% do comprimento da linha. A zona de partida (Z_p) é externa e concêntrica a maior zona de proteção (Z_2 neste trabalho) e de raio³ $R_p = (1,8 |Z_{LT-96}|/2)$. Além disso, vale destacar que será considerada a impedância Z_{AT} vista no loop AT. Os resultados são apresentados a seguir.

5.3.1 Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-A Considerando a Incidência de Falhas Durante Regime Permanente Senoidal Equilibrado

Para teste do algoritmo proposto ALG-A é criada uma falta trifásica sólida, na linha de transmissão LT_{96} , durante regime permanente senoidal equilibrado, que opera na frequência fundamental (60 Hz). A falta incide no instante 0,3479 s, distante 70 % a partir do barramento 9 e, portanto, deve ser vista em zona 1 (Z_1) pelo relé R_9 . Na Fig. 43 e na Fig. 44 estão apresentados os resultados para este cenário de teste.

Analisando a Fig. 43 (a) e (b), nota-se que a impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 , entra em Z_p , Z_2 e em Z_1 , nessa sequência, até estacionar no local da falta. Observa-se também que Z_{AT} se desloca rapidamente durante a falta, uma vez que Z_p , Z_2 e Z_1 mudam de nível lógico 0 para 1 praticamente no mesmo instante. Por fim, vale destacar que as zonas de proteção estão livres para atuar ($ANSI_{68} = 0$), como desejado para uma condição de falta.

Antes de discutir os resultados apresentados na Fig. 44, menciona-se que os instantes iniciais não serão considerados, pois a inicialização dos blocos, utilizados para modelar os equipamentos elétricos no software *Simulink*, combinada com a inicialização dos filtros de Fourier e Butterworth (filtro recursivo), gera instabilidade nos resultados iniciais. Portanto, é considerado que a simulação se torna estável, e o sistema elétrico de fato entra em regime permanente senoidal, no instante de tempo próximo a 0,2 s. Analisando a Fig. 44 (a) e (b), nota-se dois intervalos em destaque. O primeiro intervalo corresponde ao período de regime permanente senoidal, e o segundo é indicado após a incidência da falta. Ainda não foi discutido neste estudo, mas observa-se que é formado o padrão de onda dente

³ A zona de partida Z_p deve ser externa e concêntrica a maior zona de proteção do relé de distância. Por exemplo, caso seja habilitada a terceira zona de proteção (Z_3), o raio R_p da zona de partida Z_p deve ser reajustado para manter-se externo e concêntrico a Z_3 .

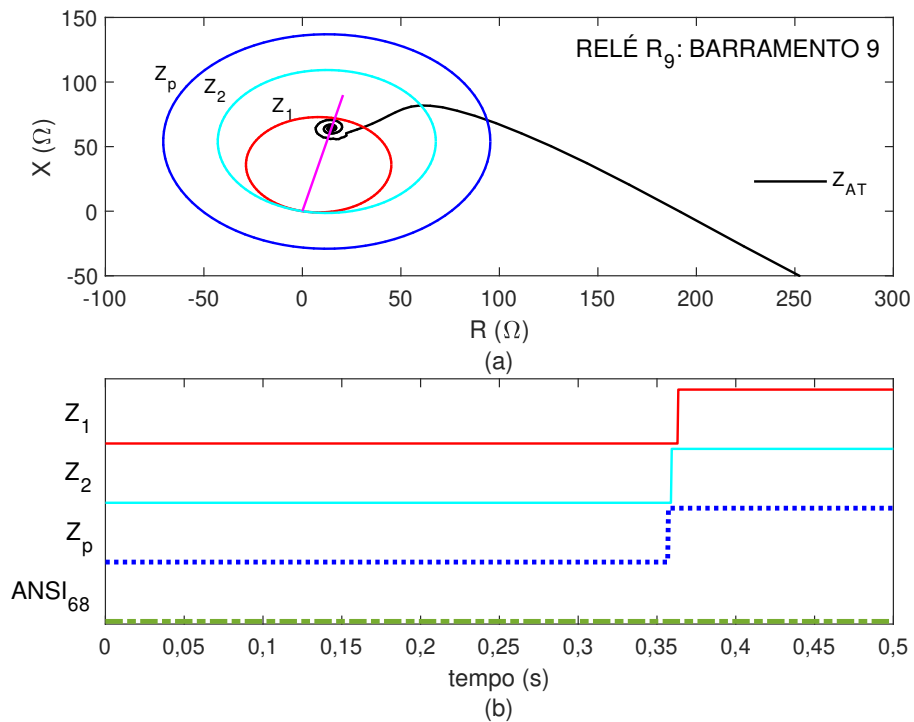


Figura 43 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos

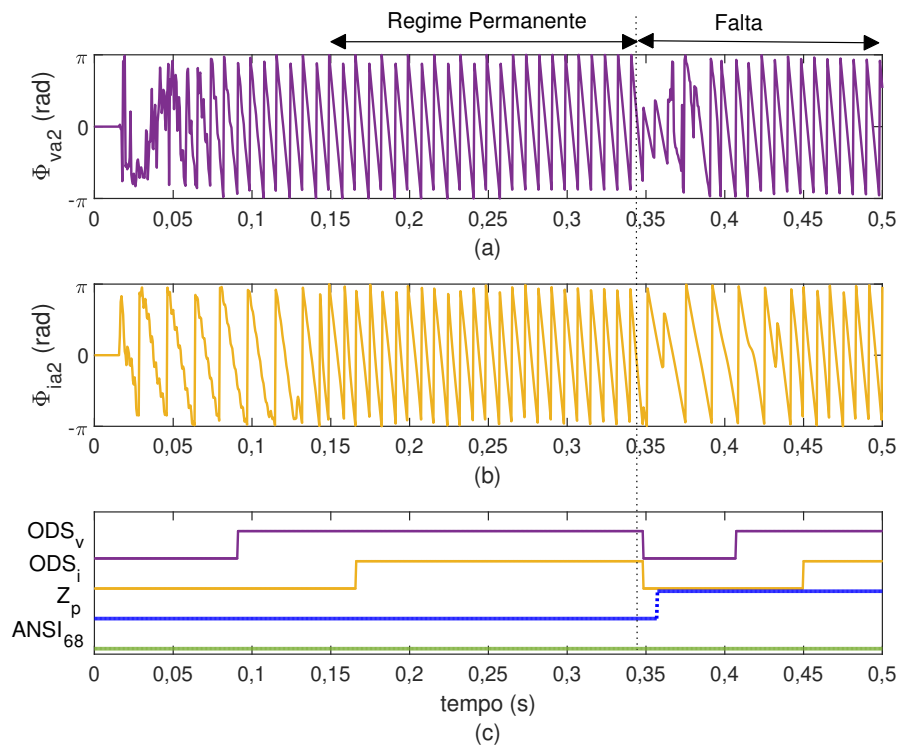


Figura 44 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos.

de serra para Φ_{va2} e Φ_{ia2} durante o período de regime permanente senoidal equilibrado. Esse resultado é esperado para condições de oscilações de potência, mas a sua ocorrência, durante regime permanente senoidal equilibrado, pode ser explicada analiticamente de acordo com a equação (5.37):

- considerando que $f_1 = f_0$, e f_0 é um número inteiro igual à 60 Hz, não há deslocamento entre F_1^- e F_2^- e, portanto, o fasor \dot{Y}_{a2} é nulo, sendo o módulo igual a zero e o ângulo indeterminado, conforme mostrado na Fig. 45 (a), que é uma cópia da Fig. 36 (b);
- porém, se f_1 é um número racional e $f_1 \approx f_0$, haverá uma defasagem mínima entre F_1^- e F_2^- , que resultará em um fasor de sequência negativa \dot{Y}_{a2} , de módulo infinitesimal e que gira na frequência ω^- , conforme ilustrado na Fig. 45 (b).

Uma vez que os sinais trifásicos, obtidos a partir do software *simulink*, oscilam com frequência aproximadamente igual a 60 Hz⁴ durante regime permanente senoidal, e isso está ilustrado na Fig. 46 para este caso, serão obtidos fasores de sequência negativa

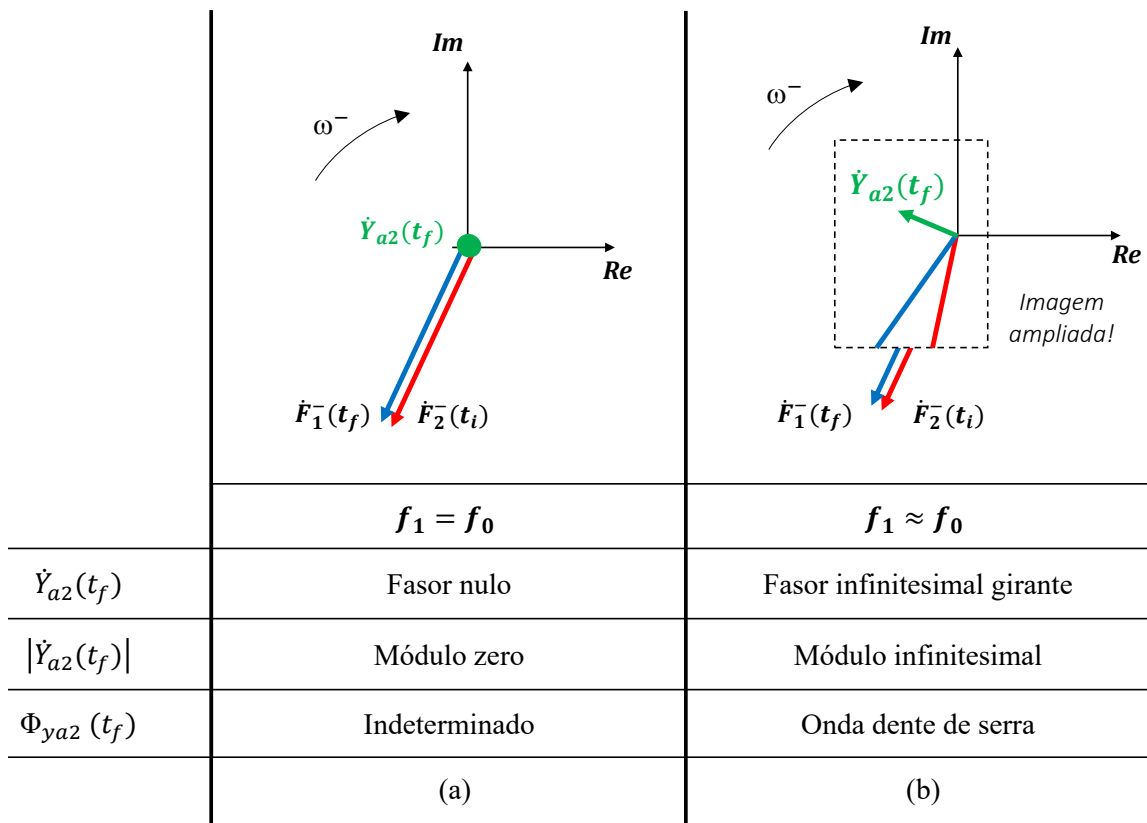


Figura 45 – Regime permanente senoidal na frequência fundamental ($f_0 = 60$ Hz). Cálculo analítico: (a) $f_1 = f_0$ e (b) $f_1 \approx f_0$.

⁴ Vale dizer que a frequência do sistema elétrico, durante regime permanente senoidal, não é um valor fixo (número inteiro igual a 60 Hz). Nos casos simulados, isso se deve a precisão do cálculo numérico realizado pelo software de simulação. Já em sistemas elétricos reais, isso ocorre devido a busca pelo equilíbrio de carga-geração, impedindo que o gerador síncrono mantenha a velocidade síncrona continuamente.

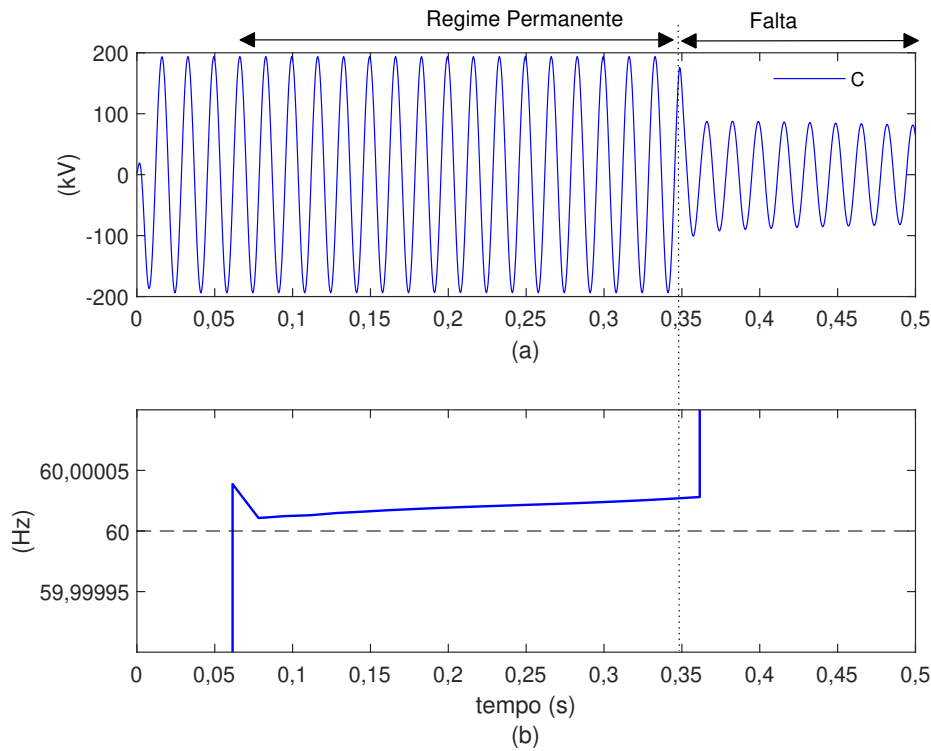


Figura 46 – (a) Sinal de tensão registrado na fase C . (b) Frequência f_9 calculada a partir do método de cruzamento por zero (Sorrentino e Carvalho, 2010).

\dot{Y}_{a2} de módulos infinitesimais e girantes na frequência ω^- , como mostrado na Fig. 45 (b). Logo, isso explica porque é calculado o padrão de onda dente de serra para Φ_{va2} e Φ_{ia2} , conforme já mostrado na Fig. 44 (a) e (b).

No entanto, deve-se ressaltar que o cálculo do padrão de onda dente de serra, durante regime permanente senoidal, não afeta o desempenho do algoritmo proposto ALG-A, porque:

- conforme Fig. 42, o bloqueio das zonas de proteção está condicionado à existência do padrão de onda dente de serra no momento exato em que a impedância entra na zona de partida. Uma vez que a impedância está parada e afastada da zona de partida durante regime permanente senoidal equilibrado, o cálculo do padrão de onda dente de serra não é suficiente para indicar uma condição de oscilação de potência e bloquear as zonas de proteção. Conforme pode ser verificado na Fig. 43 (b) e Fig. 44 (c) o desbloqueio é corretamente mantido ($ANSI_{68} = 0$) durante o regime permanente senoidal equilibrado.
- no momento em que a impedância entra na zona de partida, devido à falta, o padrão de onda dente de serra já não existe e, portanto, as zonas de proteção continuam livres para atuar. Isso é ilustrado na Fig. 44 (c), onde ODS_v e ODS_i tornam-se zero, indicando a perda do padrão de onda dente de serra devido a falta. Como desejado, as zonas de proteção continuam livres para atuar ($ANSI_{68} = 0$);

- além disso, vale destacar que a impedância durante regime permanente senoidal equilibrado (que normalmente está distante das zonas de proteção) é muito diferente da impedância pós falta (dentro das zonas de proteção). Conseqüentemente, essa grande variação de impedância gera transitórios, que significa a perda do padrão de onda dente de serra por incidência de falta. Por esse motivo, a ocorrência de falta durante regime permanente equilibrado pode ser considerada de fácil detecção pelo algoritmo proposto ALG-A⁵.

Por fim, vale mencionar que o cenário de teste descrito anteriormente foi alterado, considerando incrementos de 45° no ângulo de incidência de falta, totalizando oito casos. Todos os resultados obtidos, a partir dos relés R_9 e R_6 , foram semelhantes aos resultados apresentados na Fig. 43 e na Fig. 44. Resumidamente: notou-se que o padrão de onda dente de serra para Φ_{va2} e Φ_{ia2} é obtido durante regime permanente senoidal, mas é perdido após a incidência da falta. Dessa maneira, as zonas de proteção se mantiveram livres atuar, como desejado.

5.3.2 Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-A Diante de Oscilações de Potência Simétricas

A seguir será investigado o desempenho do algoritmo proposto ALG-A diante de condições de oscilações de potência simétricas, instáveis e estáveis, nessa sequência.

5.3.2.1 Oscilação de Potência Simétrica e Instável

A oscilação de potência simétrica e instável analisada a seguir é a mesma já apresentada na seção 4.3.1. Para possibilitar melhor visualização dos resultados, o tempo de simulação foi truncado no instante de 1,2 s. A Fig. 47 (a) mostra a trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 , no plano RX . Vale destacar que a impedância está em tendência de giro, como esperado para uma oscilação de potência instável. A Fig. 47 (b) mostra que há o bloqueio por oscilação de potência das zonas de proteção Z_1 e Z_2 ($ANSI_{68} = 1$), durante todo o período em que a impedância atravessa a região delimitada pela zona de partida Z_p (entre 0,5599 s e 1,066 s). A Fig. 47 (b) e a Fig. 48 (c) mostram que o bloqueio por oscilação de potência ocorre no instante que a impedância Z_{AT} entra na zona de partida Z_p (0,5599 s). Neste instante é possível observar na Fig. 48 (c) que ODS_v e ODS_i são iguais a 1, indicando a existência do padrão de onda dente de serra, conforme mostrado na Fig. 48 (a) e (b).

⁵ Ficará evidente logo a frente que os cenários de difícil detecção, incluem faltas que incidem no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico, durante oscilações de potência. Nesses casos são observadas poucas variações nos sinais trifásicos, mesmo após a incidência da falta. Logo, poderá não ocorrer a perda do padrão de onda dente de serra após a falta.

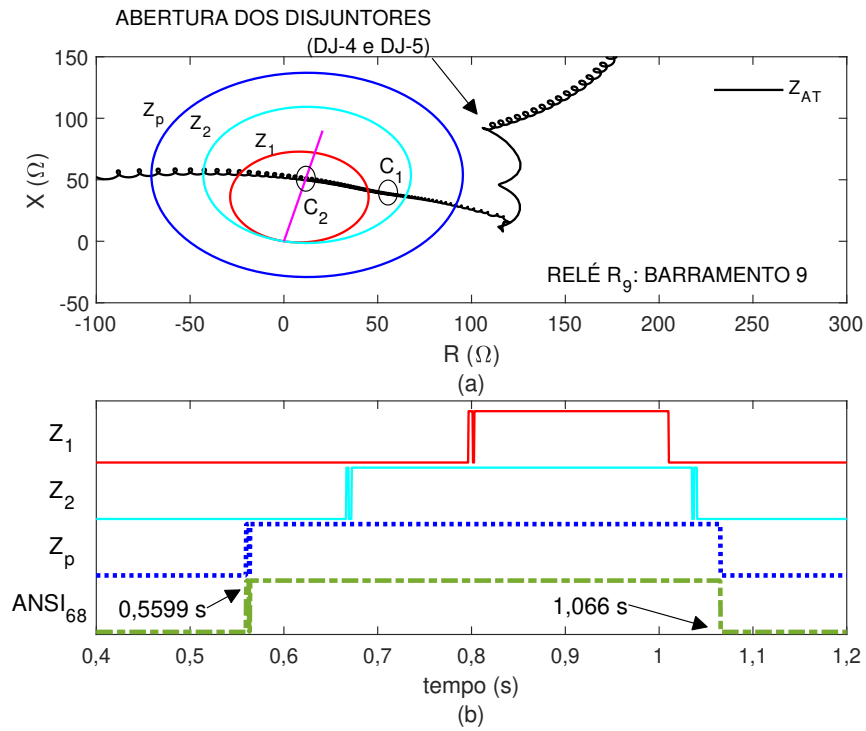


Figura 47 – Oscilação de Potência Simétrica e Instável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . As variáveis C_1 e C_2 indicam a posição da impedância Z_{AT} em diferentes momentos que serão aplicadas faltas (próxima seção). (b) Análise de eventos. Bloqueio em 0,5599 s e desbloqueio em 1,066 s.

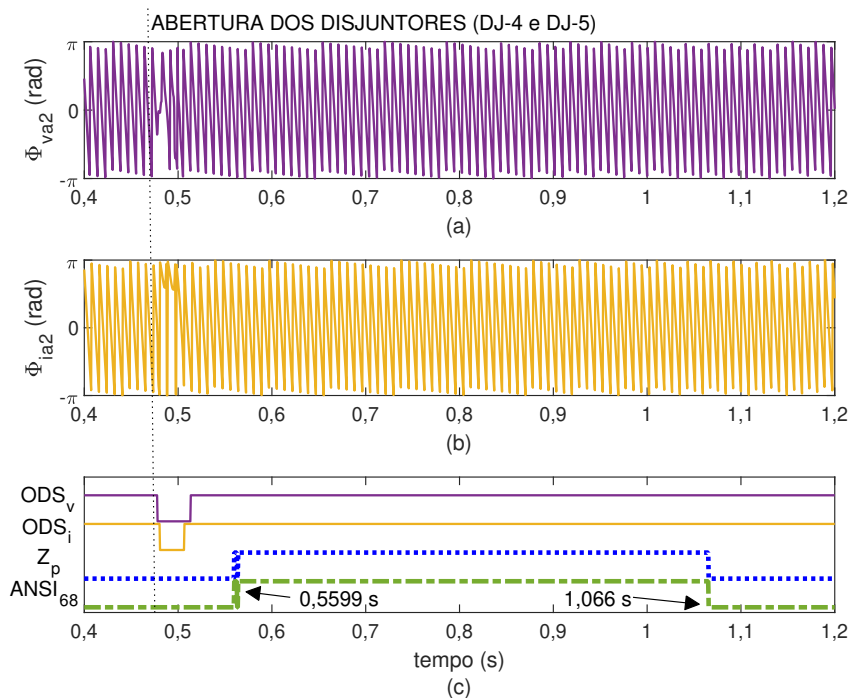


Figura 48 – Oscilação de Potência Simétrica e Instável. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Bloqueio em 0,5599 s e desbloqueio em 1,066 s.

5.3.2.2 Oscilação de Potência Simétrica e Estável

A oscilação de potência simétrica e estável analisada a seguir é a mesma já apresentada na seção 4.3.2. Novamente, o tempo de simulação foi truncado no instante de 1,2 s. A Fig. 49 (a) mostra a trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 , no plano RX . A impedância Z_{AT} entra na zona de partida Z_p , continua a trajetória aproximando da zona 2 (Z_2), e depois retorna saindo da zona de partida Z_p , alcançando um novo ponto de operação externo as zonas de proteção, caracterizando uma oscilação de potência estável. Analisando a Fig. 50 (c), observa-se que o bloqueio por oscilação de potência ocorre no instante 0,5755 s ($ANSI_{68} = 1$), que corresponde ao momento que a impedância Z_{AT} entra na zona de partida Z_p . Observa-se ainda na Fig. 50 (c), que ODS_v e ODS_i são iguais a 1 neste instante, indicando a existência do padrão de onda dente de serra, conforme pode ser notado na Fig. 50 (a) e (b). Por fim, nota-se na Fig. 49 (b) e na Fig. 50 (c), a saída em definitivo da impedância Z_{AT} de dentro da zona de partida em 0,975 s, havendo o desbloqueio permanente da proteção de distância ($ANSI_{68} = 0$).

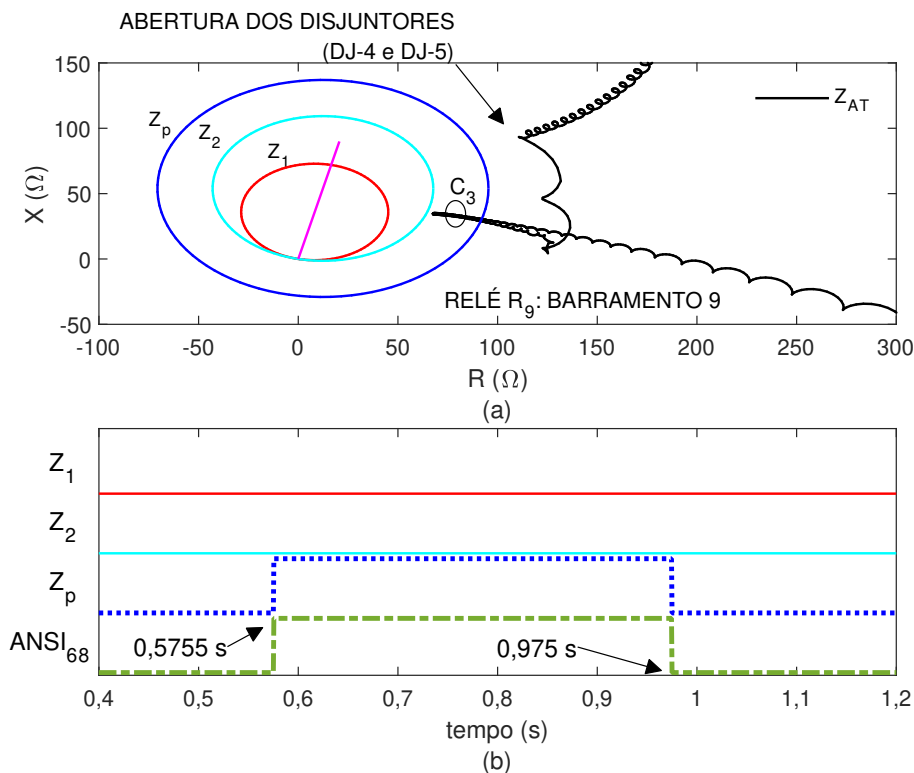


Figura 49 – Oscilação de Potência Simétrica e Estável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . A variável C_3 indica a posição da impedância Z_{AT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção). (b) Análise de eventos. Bloqueio em 0,5755 s e desbloqueio em 0,975 s.

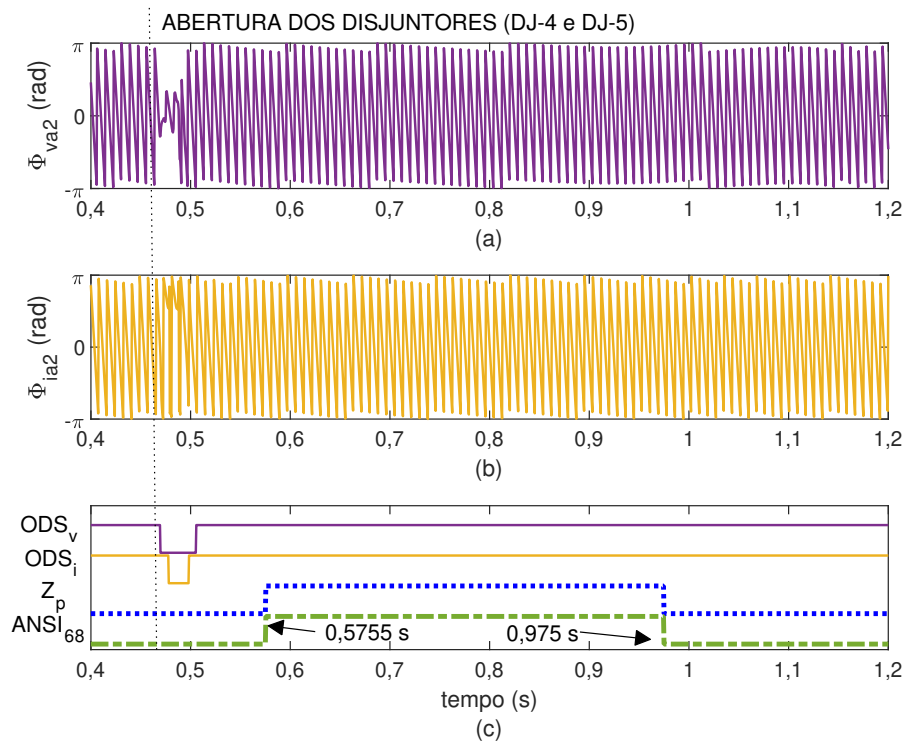


Figura 50 – Oscilação de Potência Simétrica e Estável. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Bloqueio em 0,5755 s e desbloqueio em 0,975 s.

5.3.3 Desempenho dos Algoritmos Diante de Faltas Ocorridas Durante Oscilações de Potência Simétricas

Na seção 5.3.2, anteriormente apresentada, mostrou-se a capacidade do algoritmo proposto ALG-A em bloquear a proteção de distância durante oscilações de potência simétricas, instáveis e estáveis. No entanto, durante oscilações de potência, mesmo após o bloqueio, podem acontecer faltas. Assim, o objetivo dessa etapa é avaliar a capacidade do algoritmo proposto ALG-A em desbloquear a proteção de distância, diante da incidência de faltas ocorridas durante oscilações de potência simétricas. O desempenho do algoritmo proposto ALG-A é comparado com outros dois algoritmos disponíveis na literatura (Patel et al., 2019; Lazaro et al., 2017). Nessa etapa os algoritmos serão analisados quando implementados nos relés R_9 e R_6 .

5.3.3.1 Análise de Desempenho dos Algoritmos Quando Implementados no Relé R_9

Inicialmente são apresentados os cenários de testes. Eles são gerados a partir dos mesmos casos de oscilações de potência simétricas, instáveis e estáveis, já mostrados, respectivamente, na Fig. 47 (a) e na Fig. 49 (a). Nessas figuras estão presentes pequenos círculos, nomeados como C_1 , C_2 e C_3 , que indicam a posição da impedância Z_{AT} no

instante que são aplicadas faltas. A Tabela 5 apresenta o instante da falta de acordo com a posição da impedância (C_1 , C_2 , C_3), assim como a defasagem angular (δ_L) neste momento.

Tabela 5 – Local da Impedância no instante da Falta durante oscilações de potência simétricas.

Figura	Oscilação de Potência	Círculo	Instante da falta (s)	$\delta_L(^{\circ})$
Fig. 47(a)	Instável	C_1	0,75	98
Fig. 47(a)	Instável	C_2	0,937	177
Fig. 49(a)	Estável	C_3	0,93	67

Já a Tabela 6 mostra os cenários de testes, que consideram: faltas simétricas (ABC) e assimétricas (AT, ABT e AB), ocorridas durante oscilações de potência simétricas, instáveis e estáveis, em diferentes locais da linha LT_{96} (10%, 55% e 90% do comprimento da linha medidos a partir do relé R_9), com resistências de falta iguais a 0 e 50 Ω . O local da impedância no plano RX , no instante de incidência da falta, é dada pela defasagem angular δ_L (67°, 98° ou 177°). Além dos cenários de testes⁶, a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos através do algoritmo proposto ALG-A e por outros dois algoritmos disponíveis na literatura. Onde,

- ALG-A corresponde ao algoritmos proposto, apresentado na Fig. 42;
- ALG-1 corresponde ao algoritmo desenvolvido por Patel et al. (2019);
- ALG-2 corresponde ao algoritmo desenvolvido por Lazaro et al. (2017).

Tabela 6 – Avaliação do relé R_9 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.

Cenário de Teste	Oscilação de Potência Simétrica	$\delta_L(^{\circ})$	Local de Falta (%)	Tipo de Falta	Resistência de Falta (Ω)	Função de Desbloqueio / Tempo de Detecção de Falta (ms)		
						ALG-A	ALG-1	ALG-2
1	Estável	67	10	AT	0	2,30	0,25	8,02
2	Estável	67	90	AT	50*	1,77	0,92	x
3	Estável	67	10	ABT	50*	0,21	2,25	5,94
4	Estável	67	90	AB	0	0,73	1,17	x
5	Estável	67	10	ABC	0	4,90	0,92	4,90
6	Instável	98	10	AT	0	0,52	4,33	6,77
7	Instável	177	55	AT	0	24,46	x	x
8	Instável	177	55	AT	50*	23,94	x	x
9	Instável	177	55	ABT	0	15,60	x	x
10	Instável	98	90	ABT	0	1,04	1,00	x
11	Instável	98	10	AB	0	0,52	1,00	7,29
12	Instável	177	55	AB	0	14,56	x	x
13	Instável	177	55	ABC	0	x	x	x
14	Instável	98	90	ABC	0	1,04	1,00	x

x significa falta não detectada. Fases (ABC). Terra (T)

* Aplicável somente para faltas ABT e AT.

⁶ Os cenários foram selecionados qualitativamente, não sendo apresentadas todas as combinações de testes possíveis. Mas, destaca-se que são contemplados cenários difíceis, que incluem faltas que acontecem no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico (177°) e alta resistência de falta (50 Ω).

Os algoritmos ALG-1 e ALG-2 foram implementados conforme propostos originalmente na literatura. As principais motivações que levaram a escolha desses algoritmos são:

- foram propostos originalmente para detectar faltas simétricas e assimétricas durante oscilações de potência simétricas;
- métodos rápidos, com tempo médio de atuação próximo a um ciclo, o que é compatível com os tempos de atuação da proteção de distância de zona 1;
- são apresentados em artigos de pesquisa publicados nos últimos cinco anos, o que demonstra ser um tema compatível com a literatura técnica atual.

O ALG-1 calcula a derivada dos sinais instantâneos de tensão, identifica os picos e então quantifica o número de amostras entre dois picos sucessivos (SIPD). Durante oscilações de potência, a derivada da tensão apresenta comportamento senoidal, de forma que a quantidade de amostras entre dois picos sucessivos é aproximadamente igual a 200 (esse algoritmo é implementado com frequência de amostragem de 12 kHz). No entanto, na ocorrência de uma falta, as distorções nos sinais de tensão fazem com que a derivada da tensão apresente dois picos sucessivos rapidamente, o que reduz drasticamente o número de amostras nesse intervalo. Portanto, o índice de detecção de falta (ID) é definido como,

$$ID = \begin{cases} \text{SIPD} & ; \text{for SIPD} \leq 50 \\ 0 & ; \text{for SIPD} > 50 \end{cases} \quad (5.49)$$

Se $ID > 0$, em qualquer das três fases, uma falta é detectada. Maiores informações sobre o ALG-1 e cálculo de SIPD podem ser encontradas no artigo do próprio autor ([Patel et al., 2019](#)).

Já o ALG-2 monitora o surgimento de assimetria nos sinais instantâneos de corrente para detectar uma falta durante oscilações de potência. Para isso, é utilizado o Coeficiente de Assimetria de Fisher (CAF). Durante oscilações de potência CAF é insignificante. No entanto, se CAF é maior que um predeterminado limite ($CAF > 0,6$), em qualquer das três fases, uma falta é detectada. Detalhes do ALG-2 podem ser consultados no artigo do próprio autor ([Lazaro et al., 2017](#)).

Para melhor compreensão dos três algoritmos é escolhido inicialmente o cenário de teste 1. Observa-se na Tabela 6 que todos os algoritmos atuaram corretamente para esse teste. A Fig. 51 e a Fig. 52 mostram o desempenho do algoritmo proposto ALG-A. Na Fig. 51 (b) observa-se que a falta, que iniciou-se no instante 0,93 s, é detectada no instante 0,9323 s (quando $ANSI_{68}$ se torna zero). Isso significa que o desbloqueio das zonas de proteção (Z_1 e Z_2) aconteceu 2,3 ms após a incidência da falta. Já a Fig. 52

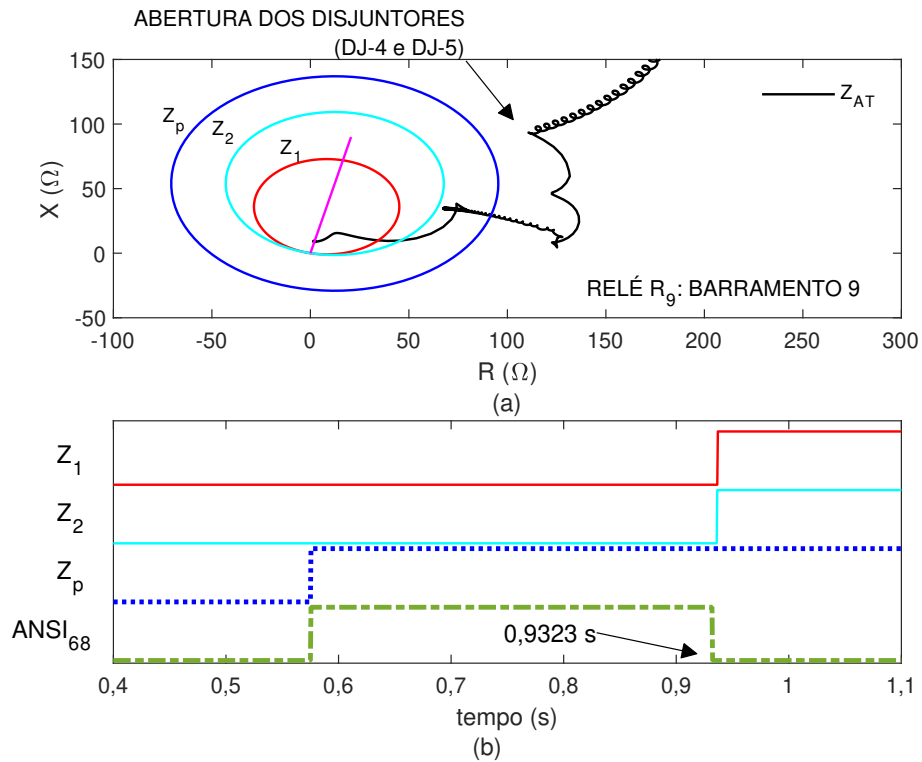


Figura 51 – Cenário de teste 1. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9323 s.

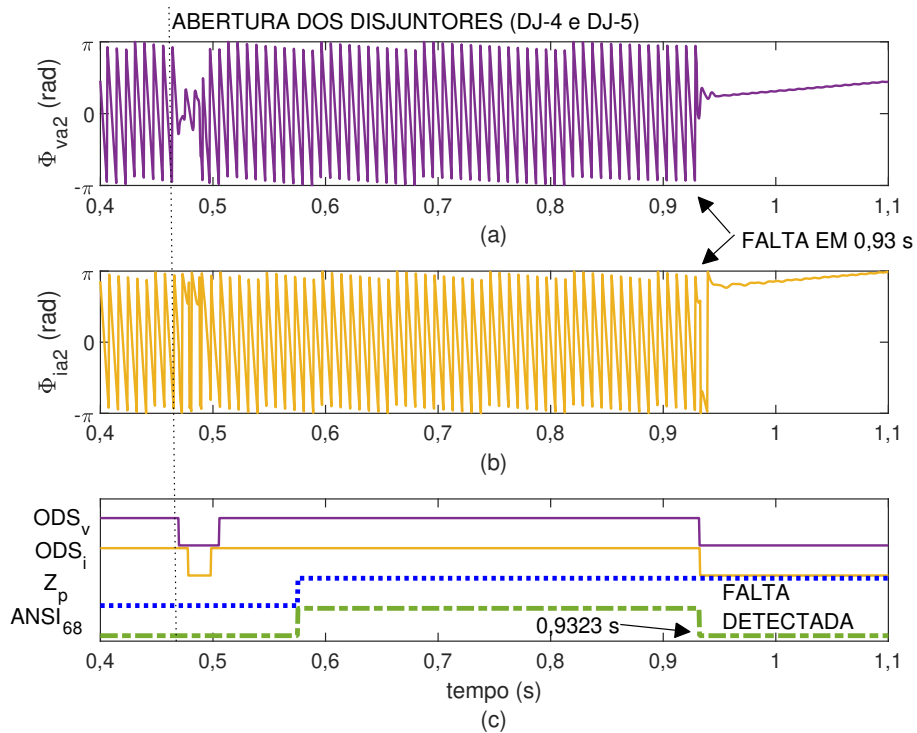


Figura 52 – Cenário de teste 1. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9323 s.

(a) e (b) mostra que Φ_{va2} e Φ_{ia2} perdem a característica de onda dente de serra após o início da falta, o que justifica a mudança para zero da variável $ANSI_{68}$ e o desbloqueio das zonas de proteção Z_1 e Z_2 . Na Fig. 52 (c) é também mostrado que a falta é detectada no instante 0,9323 s.

Já o desempenho do algoritmo ALG-1 é mostrado na Fig. 53. Observa-se na Fig. 53 (c) que a derivada dos sinais trifásicos de tensão evidenciam as distorções que surgem durante o transitório de falta, e dois picos sucessivos são rapidamente identificados. Nesse caso a falta é detectada no instante 0,93025 s, conforme indicado na Fig. 53 (b).

A Fig. 54 mostra o desempenho do algoritmo ALG-2. Observa-se na Fig. 54 (a) que após a incidência da falta há assimetria no sinal de corrente registrado na fase A. A Fig. 54 (b) mostra que a falta é detectada no instante 0,93802 s, uma vez que o Coeficiente de Assimetria de Fisher (CAF), calculado na fase A, supera o limite estabelecido de 0,6.

Analisando agora o cenário de teste 7 apresentado na Tabela 6. Esse é um caso interessante porque incide uma falta assimétrica (AT) no momento que a impedância passa próxima ao centro elétrico ($\delta_L = 177^\circ$). A Fig. 55 mostra o desempenho obtido pelo algoritmo proposto ALG-A. Analisando Φ_{va2} e Φ_{ia2} na Fig. 55 (a) e (b), nota-se a perda da característica de onda dente de serra após a incidência da falta, ocorrida em 0,937 s. Na Fig. 55 (c) é mostrado que a falta é detectada no instante 0,96146 s, ou seja, 24,46 ms após sua incidência.

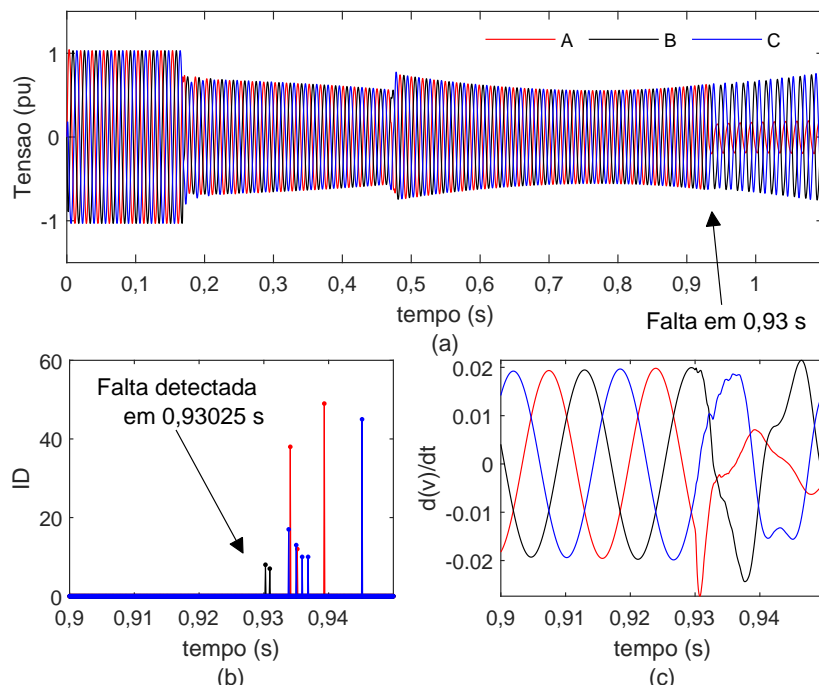


Figura 53 – Cenário de teste 1. Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Índice de detecção de falta. (c) Derivada dos sinais trifásicos de tensão. Falta detectada no instante 0,93025 s.

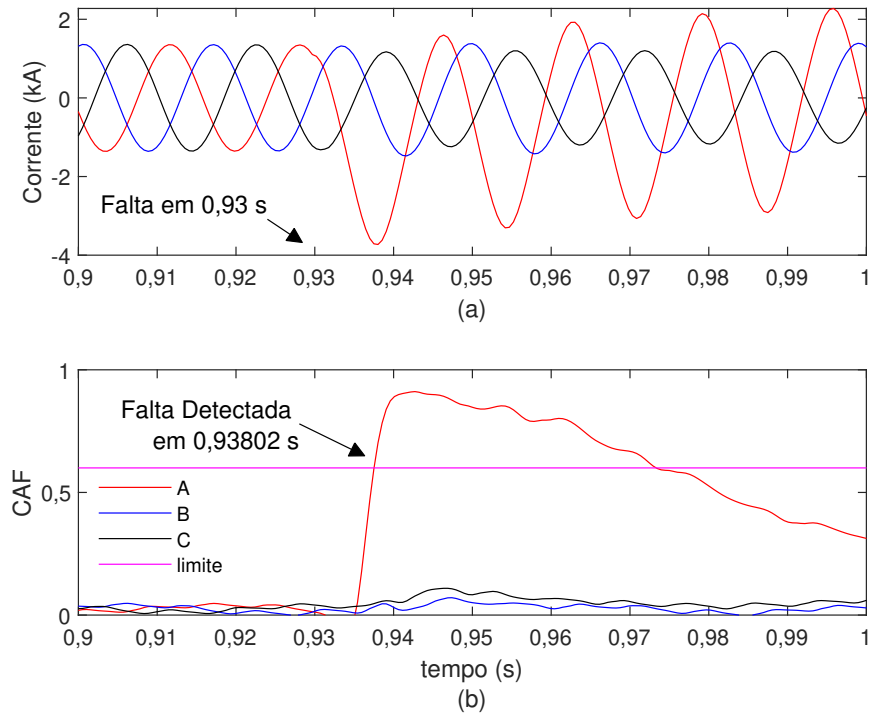


Figura 54 – Cenário de teste 1. Algoritmo baseado na assimetria dos sinais de corrente (ALG-2). (a) Sinais trifásicos de corrente. (b) Coeficiente de Assimetria de Fischer (CAF). Falta detectada no instante 0,93802 s.

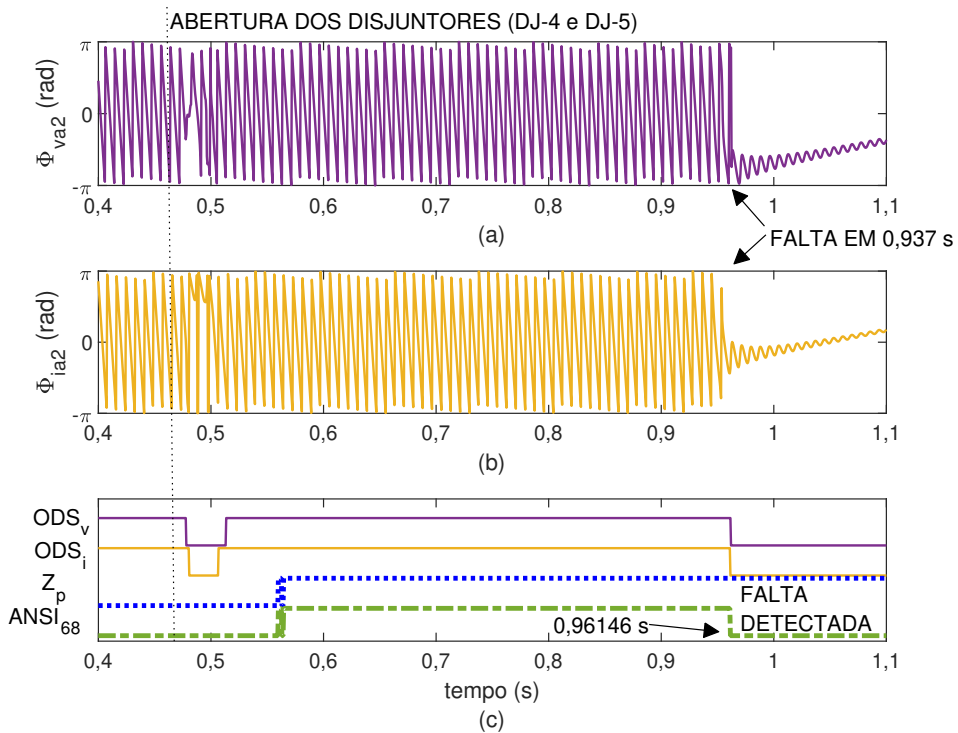


Figura 55 – Cenário de teste 7. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,96146 s.

Já a Fig. 56 (a) e (b) mostra o desempenho do algoritmo ALG-1. Como não há distorção nos sinais de tensão após a incidência da falta, os picos continuam acontecendo em intervalos iguais aos observados antes da incidência da falta e, por isso, esse algoritmo é incapaz de detectar a falta nesse caso. Por fim, analisando a Fig. 56 (c) e (d) observa-se que o algoritmo ALG-2 também falhou, pois não há assimetria nos sinais de corrente após a falta.

O cenário de teste 13 é também um caso interessante a ser avaliado, pois é difícil detectar faltas simétricas, especialmente quando ocorrem próximas ao centro elétrico, como nesse caso ($\delta_L = 177^\circ$). Uma análise da Fig. 57 e da Fig. 58 revelam que o algoritmo proposto ALG-A não foi capaz de detectar a falta. Observa-se que as zonas de proteção Z_1 e Z_2 continuam bloqueadas ($ANSI_{68} = 1$), mesmo após a incidência da falta que acontece no instante 0,937 s. Na Fig. 58 (a) e (b) nota-se que a característica de onda dente de serra para Φ_{va2} e Φ_{ia2} se mantém após a falta, o que justifica a falha de atuação. Esse resultado pode ser explicado da seguinte maneira: as mudanças nos sinais de tensão e corrente são pequenas quando faltas simétricas acontecem próximas ao centro elétrico, pois nessas situações as impedâncias pré e pós-falta, incluindo o período transitório, são praticamente iguais. Assim, a incidência dessa falta foi insuficiente para promover qualquer mudança nas características de onda dente de serra. Os algoritmos ALG-1 e ALG-2 também falharam para este teste e a justificativa é idêntica à apresentada diante do cenário de teste 7

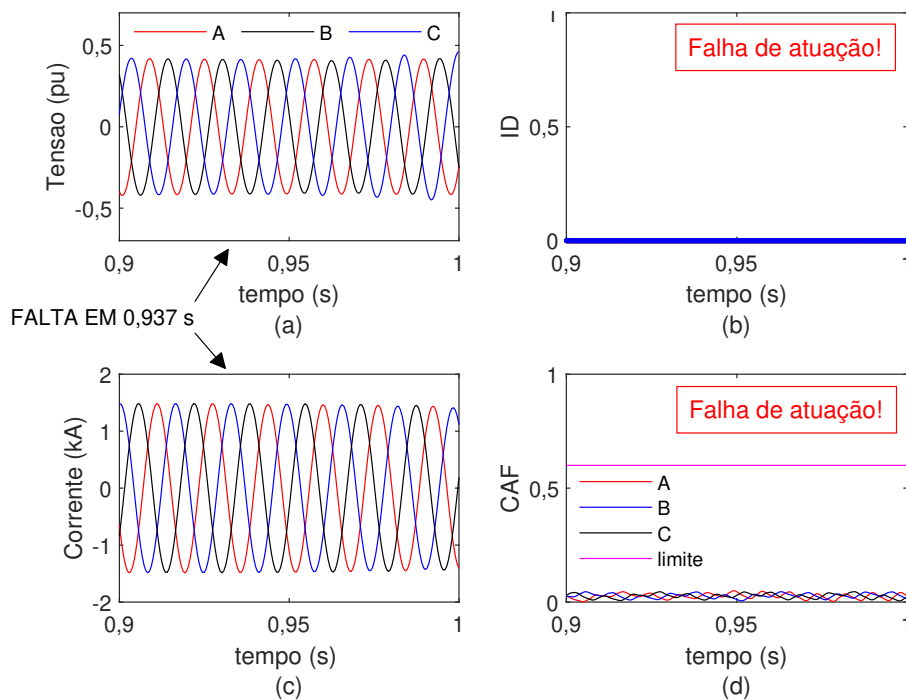


Figura 56 – Cenário de teste 7. (a) Sinais de trifásicos de tensão. (b) Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (c) Sinais trifásicos de corrente (d) algoritmo baseado na assimetria dos sinais de corrente (ALG-2). Falha de atuação dos dois algoritmos.

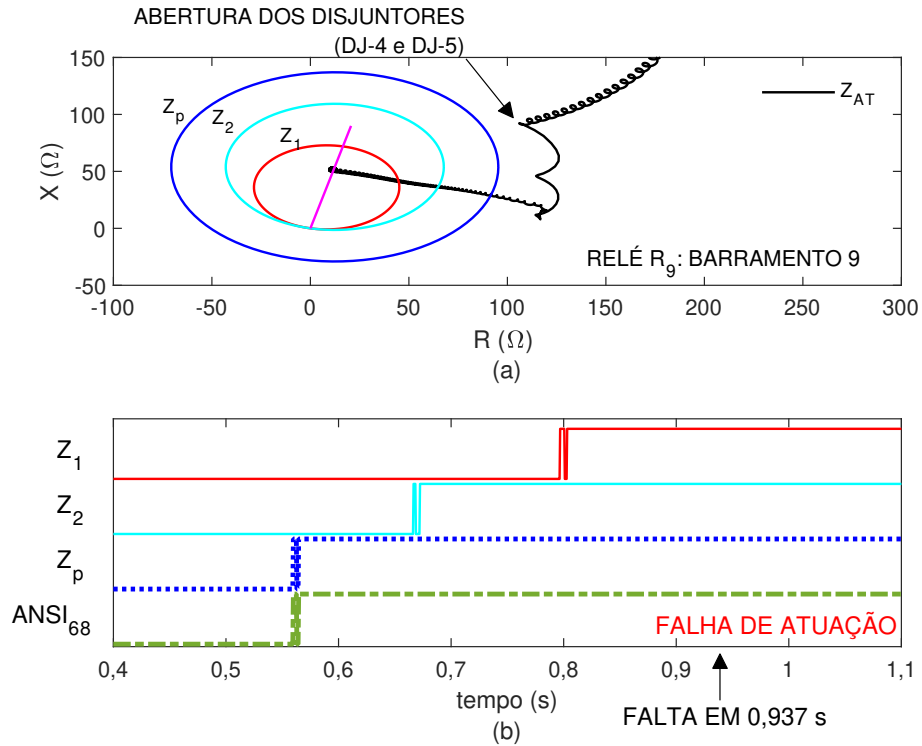


Figura 57 – Cenário de teste 13. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Falta durante oscilação de potência de potência não detectada (Falha de atuação).

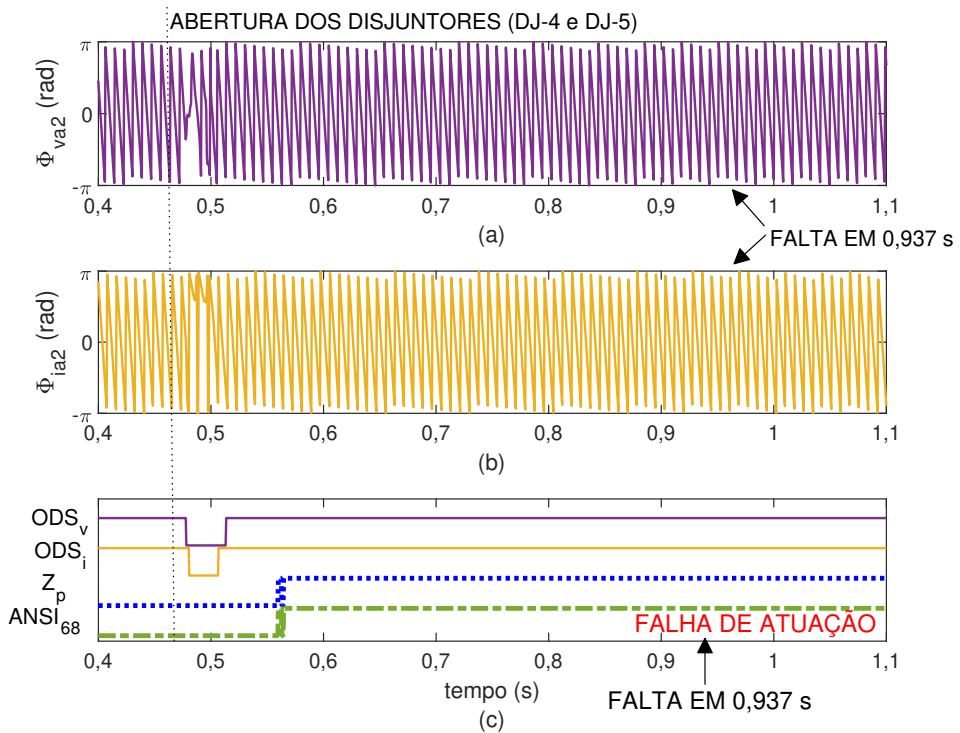


Figura 58 – Cenário de teste 13. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Falta durante oscilação de potência de potência não detectada (Falha de atuação).

(ausência de distorções e assimetrias após a incidência da falta).

Embora o algoritmo proposto ALG-A tenha falhado diante do cenário de teste 13, ele foi efetivo para os demais testes, incluindo casos que consideram faltas simétricas. Por exemplo, a Fig. 59 (a) mostra a trajetória da impedância Z_{AT} para uma falta simétrica que ocorre durante uma oscilação de potência simétrica e estável (cenário de teste 5). A incidência da falta ocorre no instante 0,93 s e o desbloqueio acontece em 0,9349 s, conforme poder verificado 59 (b). Logo após o desbloqueio a impedância entra, respectivamente, nas zonas de proteção Z_2 e Z_1 , que estão livres para atuar ($ANSI_{68} = 0$). Isso acontece porque o padrão de onda dente de serra é perdido após a incidência da falta (0,93 s), conforme pode ser notado na Fig. 60 (a) e (b). Durante o transitório de falta, a estimação fasorial é realizada incorretamente pelo filtro de Fourier devido a presença de dados pré e pós falta. Isso reflete nos ângulos dos fasores de sequência negativa, que perdem a característica onda dente de serra, indicando o início da falta. Nesse caso, a componente contínua e as distorções associadas com a parte transitória, que ocorrem mesmo após faltas equilibradas como essas, possibilitam o confiável desbloqueio realizado pelo algoritmo proposto ALG-A. Essas características (componente contínua e distorções) podem ser observadas na Fig. 61 (a) e (b). Por fim, outro aspecto que pode ser observado consultando à Fig. 60 (a) e (b) é a ocorrência do retorno do padrão onda dente de serra próximo ao instante de tempo próximo a 1 s. Nesse caso, como a falta é simétrica e não é eliminada do sistema, os geradores

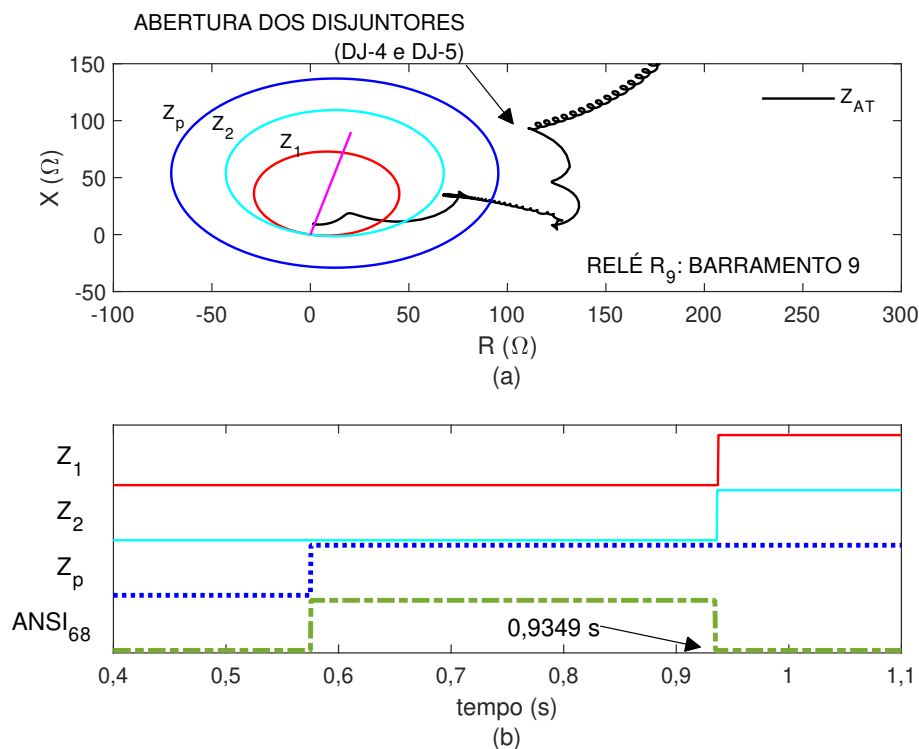


Figura 59 – Cenário de teste 5. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9349 s.

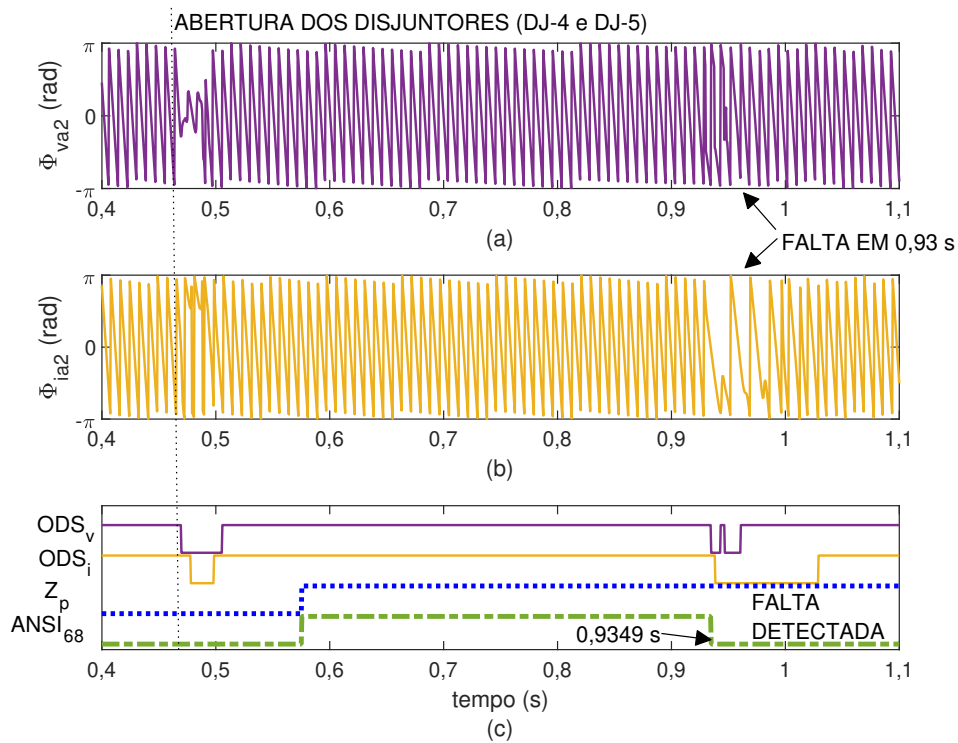


Figura 60 – Cenário de teste 5. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9349 s.

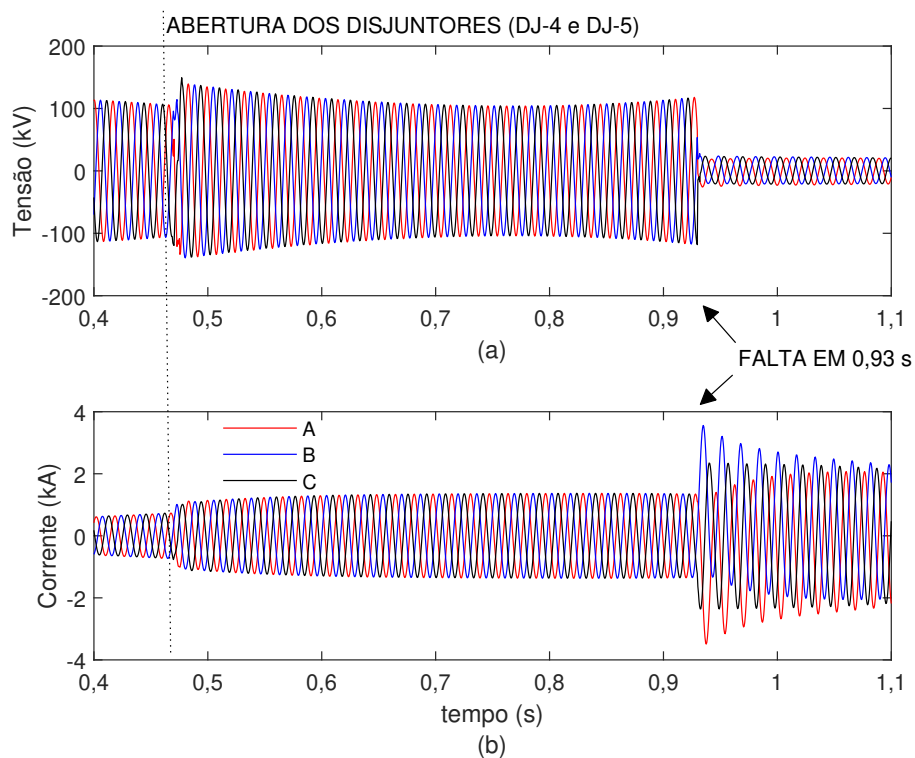


Figura 61 – Cenário de teste 5. Componente Contínua e distorções após incidência de falta simétrica. (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Sinais trifásicos de corrente.

trabalham equilibradamente e mudam de velocidade durante o regime permanente senoidal de falta, o que justifica o retorno do padrão de onda dente de serra.

Após discutidos alguns interessantes cenários de testes, uma análise completa dos resultados apresentados na Tabela 6 revela: o algoritmo proposto ALG-A detectou faltas em 13 cenários dos 14 possíveis, enquanto os algoritmos ALG-1 e ALG-2 atuam corretamente apenas 9 e 5 vezes, respectivamente. O bom desempenho do algoritmo proposto ALG-A é notado até mesmo diante de situações difíceis, detectando faltas que acontecem próximas ao centro elétrico, como nos cenários de testes 7, 8, 9 e 12. Por fim, vale destacar a rapidez de atuação do algoritmo proposto ALG-A, desbloqueando a proteção de distância com tempo inferior a 25 ms (1,5 ciclos). Esses resultados comprovam a superioridade do algoritmo proposto ALG-A diante de dois algoritmos (ALG-1 e ALG-2) disponíveis na literatura técnica dessa área de pesquisa.

5.3.3.2 Análise de Desempenho dos Algoritmos Quando Implementados no Relé R_6

Após avaliado o desempenho dos algoritmos no relé R_9 , nessa seção são avaliados os mesmos algoritmos (ALG-A, ALG-1 e ALG-2), porém implementados no relé R_6 . A Tabela 7 considera os mesmos cenários de testes, já citados na Tabela 6 (confira a nota de rodapé 6). Vale destacar que os locais de falta para o relé R_6 são medidos a partir do barramento 6.

De imediato, já é possível notar na Tabela 7 que o algoritmo proposto ALG-A atuou corretamente em todos os testes, enquanto os algoritmos ALG-1 e ALG-2 obtiveram apenas 9 e 3 atuações corretas, respectivamente. Procurando evidenciar o desempenho do

Tabela 7 – Avaliação do relé R_6 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.

Cenário de Teste	Oscilação de Potência Simétrica	Local de Falta $\delta_L(^{\circ})$	Local de Falta (%)	Tipo de Falta	Resistência de Falta (Ω)	Função de Desbloqueio / Tempo de Detecção de Falta (ms)		
						ALG-A	ALG-1	ALG-2
1	Estável	67	90	AT	0	1,80	1,25	x
2	Estável	67	10	AT	50*	0,20	0,75	x
3	Estável	67	90	ABT	50*	0,70	1,25	10,10
4	Estável	67	10	AB	0	0,20	1,00	x
5	Estável	67	90	ABC	0	0,70	1,50	15,31
6	Instável	98	90	AT	0	1,00	2,00	x
7	Instável	177	45	AT	0	1,00	x	x
8	Instável	177	45	AT	50*	7,30	x	x
9	Instável	177	45	ABT	0	1,00	x	x
10	Instável	98	10	ABT	0	4,20	0,75	x
11	Instável	98	90	AB	0	1,00	1,50	x
12	Instável	177	45	AB	0	8,00	x	x
13	Instável	177	45	ABC	0	7,50	x	x
14	Instável	98	10	ABC	0	3,10	1,00	14,06

x significa falta não detectada. Fases (ABC). Terra (T)

* Aplicável somente para faltas ABT e AT.

algoritmo proposto ALG-A, nesse ponto vale retornar ao cenário de teste 13, lembrando que este foi o único cenário que o algoritmo proposto ALG-A falhou quando implementado no relé R_9 . Na Fig. 62 (a) está apresentada a trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_6 , para este cenário de teste. Observa-se novamente que a impedância Z_{AT} está próxima ao centro elétrico no instante que a falta incide (0,937 s). A Fig. 62 (b) mostra que as zonas de proteção estavam bloqueadas a partir do momento que a impedância entra na zona de partida Z_p , mas após a falta é realizado o desbloqueio ($ANSI_{68}$ se torna zero em 0,9445 s) e as zonas de proteção Z_1 e Z_2 ficam livres para atuar.

A Fig. 63 (a) mostra que o padrão de onda dente de serra de Φ_{va2} é levemente alterado após a falta. Já a Fig. 63 (b) mostra que o padrão de onda dente de serra de Φ_{ia2} não é afetado pela falta. No entanto, vale citar que a desconfiguração de apenas Φ_{va2} é suficiente para o algoritmo proposto ALG-A realizar o desbloqueio. Esse resultado evidencia novamente como é difícil detectar faltas simétricas que incidem quando a impedância está próxima ao centro elétrico.

O cenário de teste 8 é outro interessante cenário de falta, pois é uma falta assimétrica (AT), de alta resistência de falta ($50\ \Omega$) e acontece próxima ao centro elétrico. É possível notar na Tabela 7 que os algoritmos ALG-1 e ALG-2 falharam, e o algoritmo proposto ALG-A detectou a falta corretamente. A Fig. 64 (a) mostra a trajetória da

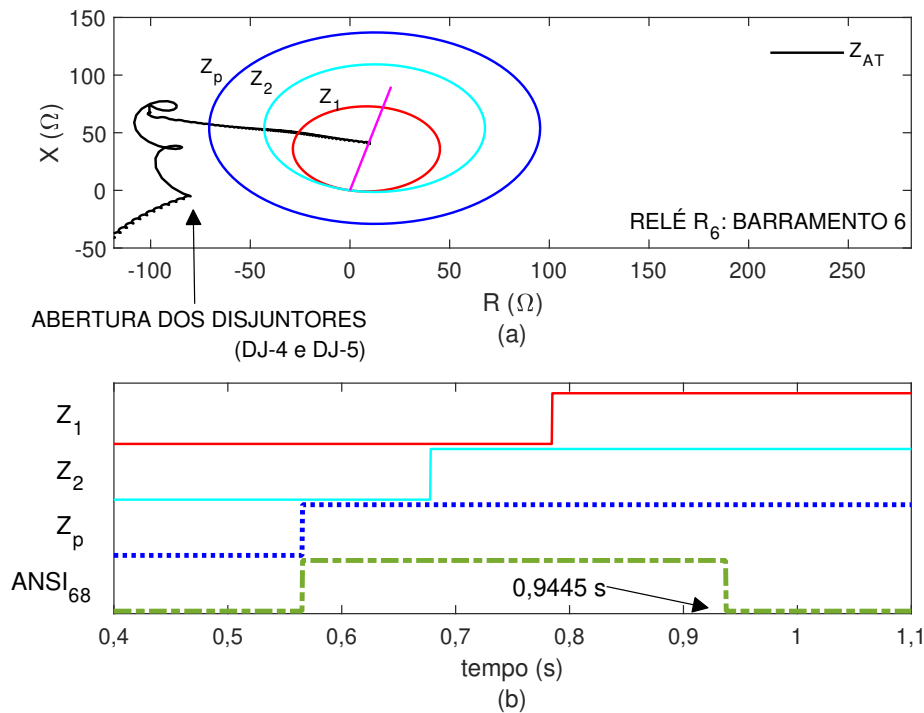


Figura 62 – Cenário de teste 13. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9445 s.

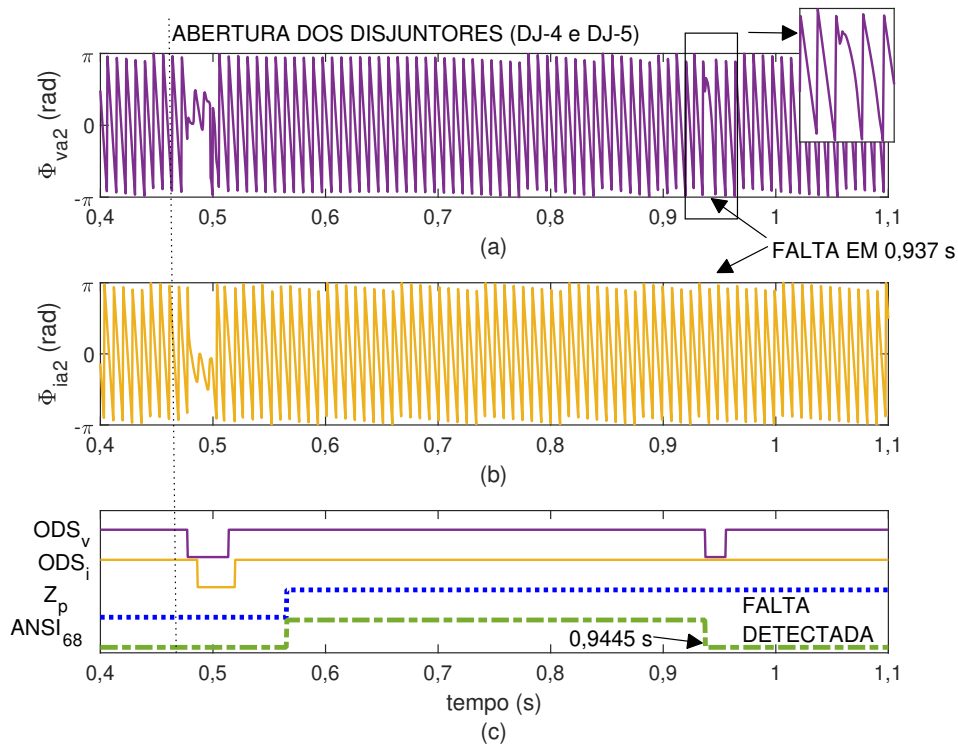


Figura 63 – Cenário de teste 13. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9445 s.

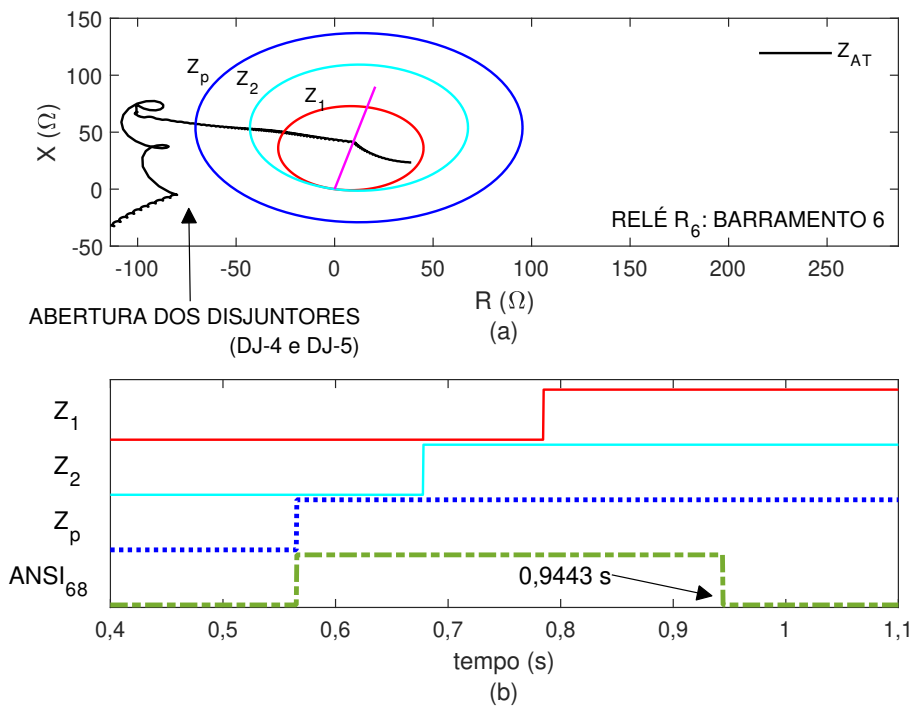


Figura 64 – Cenário de teste 8. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no Plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9443 s.

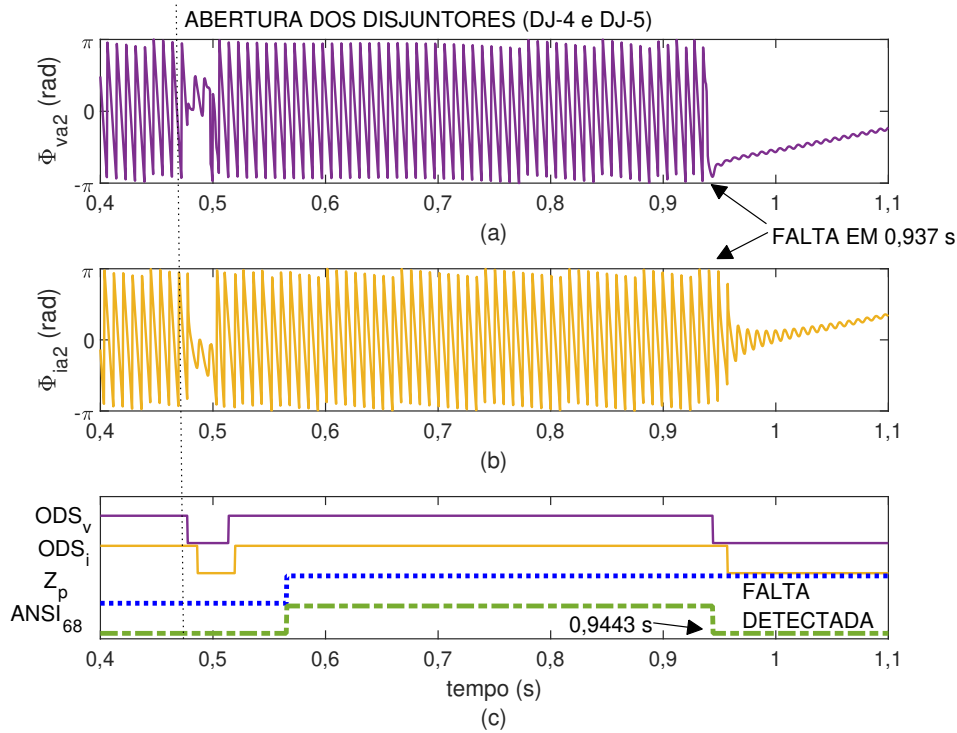


Figura 65 – Cenário de teste 8. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . (c) Análise de eventos: Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,9443 s.

impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_6 , para este caso. A Fig. 64 (b) mostra que a falta é detectada pelo algoritmo proposto ALG-A no instante igual 0,9443 s. A Fig. 65 (a) e a Fig. 65 (b) mostram que essa falta é facilmente detectada, pois é notável a perda do padrão de onda dente de serra para Φ_{va2} e Φ_{ia2} após a incidência da falta.

Após analisados alguns interessantes cenários de testes, os resultados apresentados nessa seção mostram novamente a eficiência do algoritmo proposto ALG-A. De outra forma, o algoritmo proposto ALG-A demonstrou-se capaz de detectar faltas e desbloquear a proteção de distância também quando avaliado no relé R_6 , apresentando desempenho superior a dois algoritmos (ALG-1 e ALG-2) disponíveis na literatura técnica atual.

5.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foi demonstrado, por meio de solução analítica originalmente desenvolvida neste estudo, que o filtro de Fourier e teorema de Fortescue, durante oscilações de potência simétricas, estimam fasores de sequência de negativa girantes. A partir do monitoramento dessa característica girante, identificada pelo padrão de onda dente de serra, foi desenvolvido o algoritmo proposto ALG-A. Este método destaca-se por dispensar estudos complexos para definir seus ajustes de parametrização e ser capaz de realizar bloqueios por ocorrência de oscilações de potência simétricas e desbloqueio por detecção

de faltas durante oscilações de potência simétricas.

Em seguida foram apresentados os resultados obtidos, onde verificou-se que o algoritmo proposto ALG-A realiza o bloqueio por oscilação de potência de maneira confiável, atuando corretamente diante de oscilações de potência simétricas, instáveis e estáveis. Da mesma forma, o algoritmo proposto ALG-A se demonstrou eficiente para detectar faltas durante oscilações de potência simétricas. Além de apresentar rápida atuação (tempo inferior a 25 ms), apresentou bom desempenho até mesmo diante de situações difíceis, como os cenários de testes que consideraram faltas que incidem quando a impedância passa pelo centro elétrico. Além disso, o algoritmo proposto ALG-A obteve desempenho superior a dois algoritmos disponíveis na literatura. Por fim, vale destacar que o algoritmo proposto ALG-A foi validado somente diante de cenários de testes obtidos via software de simulação. A análise diante de casos reais será realizada no capítulo a seguir.

Capítulo 6

Proteção de Linhas de Transmissão Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas

No Capítulo 5 foi dado enfoque as oscilações de potência simétricas. É nesse cenário que a maioria dos algoritmos disponíveis na literatura técnica se demonstram capazes de realizar as funções de bloqueio e desbloqueio da proteção de distância. Isso pode ser confirmado novamente consultando a Tabela 1, já apresentada no Capítulo 2. Portanto, nesse ponto cabe uma ressalva em relação aos casos de oscilações de potência simétricas já apresentados neste trabalho: os sinais trifásicos, obtidos a partir do software *Simulink*, mostraram ser perfeitamente equilibrados entre si ao retratarem essas condições. Entretanto, muitas vezes, podem existir pequenos desequilíbrios em oscilações de potência que deveriam ser totalmente simétricas. A observação de algumas oscilografias de casos reais de oscilações de potência simétricas, que inclusive serão mostradas neste capítulo, tem confirmado essa informação e mostrará que os sinais trifásicos podem não são perfeitamente equilibrados entre si nessas condições. Já em outros casos, como as oscilações de potência assimétricas, são observados grandes desequilíbrios entre os sinais trifásicos. Esse tema também será abordado neste capítulo.

Logicamente, já se pode inferir que esses pequenos desequilíbrios, identificados nos casos reais de oscilações de potência simétricas, assim como os grandes desequilíbrios observados durante oscilações de potência assimétricas, podem afetar negativamente o desempenho de alguns algoritmos que atuam de forma adequada somente diante de oscilações de potência simétricas, perfeitamente equilibradas, como o algoritmo proposto anteriormente no Capítulo 5 (ALG-A).

A fim de superar essa limitação, é proposto um novo algoritmo neste capítulo (ALG-B). Esse algoritmo (ALG-B) é desenvolvido a partir de nova formulação matemática, originalmente apresentada neste estudo, capaz de modelar condições de oscilações de

potência simétricas e assimétricas. Então, o cálculo matemático apresentado no capítulo anterior é aplicado a essa nova formulação, mostrando que durante oscilações de potência existem fasores de sequência negativa. Nesse caso, o fasor de sequência negativa não é bem definido, mas uma técnica de filtragem simples, do tipo Butterworth, tem sido suficiente para selecionar os fasores de sequência negativa de interesse, que giram na frequência de 120 Hz. A partir dessa informação é desenvolvido o algoritmo proposto ALG-B, um método de proteção multifunção, capaz de realizar o bloqueio da proteção de distância por detecção de oscilação de potência, não importando se é do tipo simétrica ou assimétrica. O algoritmo é também capaz de realizar desbloqueios por ocorrência de faltas, simétricas ou assimétricas, durante as condições de oscilações de potência anteriormente mencionadas. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo proposto ALG-B obteve desempenho superior a dois algoritmos disponíveis na literatura, quando investigados cenários de testes obtidos via software de simulação. Diante dos casos reais, vale destacar que o algoritmo proposto ALG-B obteve desempenho correto, sendo superior ao algoritmo proposto anteriormente no Capítulo 5 (ALG-A), que falhou diante desses testes devido aos pequenos desequilíbrios observados nos sinais trifásicos de tensão e corrente. Esses resultados revelam a confiabilidade e segurança do algoritmo proposto ALG-B diante de todos os testes realizados.

6.1 Fundamentos Teóricos

Nessa seção é proposta nova formulação matemática capaz de modelar oscilações de potência simétricas e assimétricas. Em seguida, a solução analítica demonstrada na seção 5.1.2, fundamentada no filtro de Fourier e no teorema de Fortescue, é repetida nessa seção, e novamente busca-se evidenciar a ocorrência de fasores de sequência negativa durante oscilações de potência. Por fim, é realizada análise gráfica, mostrando que a seleção do fasor de sequência negativa, que gira com frequência aproximadamente igual a 120 Hz, é apropriada para caracterizar a ocorrência de oscilações de potência simétricas e assimétricas.

6.1.1 Sinais Trifásicos de Tensão e Corrente Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas

A Fig. 66 rerepresenta o sistema elétrico, já mostrado na Fig. 2, composto de duas máquinas modeladas por fontes de tensão (\dot{E}_S e \dot{E}_S), atrás de suas respectivas impedâncias (Z_S e Z_R), e uma linha de transmissão (Z_{LT}).

Foi mostrado na seção 5.1.1 que condições de oscilações de potência simétricas, registradas pelo relé R_1 , podem ser escritas a partir do princípio da superposição como

$$y_x(t) = Y_1 \text{sen}(2\pi f_1 t + \alpha_{y1} + \theta_x) + Y_0 \text{sen}(2\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \quad (6.1)$$

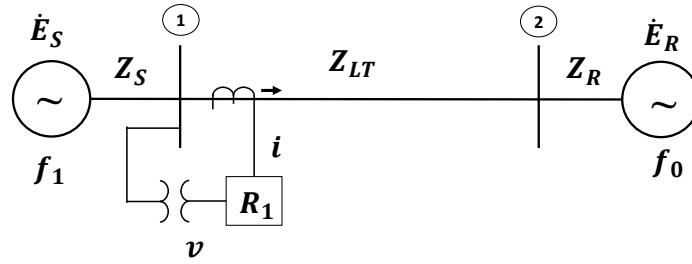


Figura 66 – Sistema elétrico trifásico de duas máquinas

Onde y é definido como v para tensão e i para corrente. As fases A , B ou C são representadas pela variável x . Y_0 e Y_1 são os valores de pico para as duas componentes, sendo que Y assumirá V para tensão e I para corrente. As frequências angulares são $2\pi f_0$ e $2\pi f_1$, onde f_0 representa a frequência fundamental e f_1 pode representar sobrefrequência ou subfrequência. Os ângulos de fase são α_{v0} e α_{v1} para tensão, e α_{i0} e α_{i1} para corrente. O deslocamento angular entre as três fases é dado por θ_x , sendo $\theta_A = 0$ rad, $\theta_B = -2\pi/3$ rad e $\theta_C = -4\pi/3$ rad.

Embora (6.1) seja uma equação amplamente encontrada na literatura (Mahamedi e Zhu, 2012; Rao e Pradhan, 2015; Patel, 2019; Patel et al., 2019; Mahamedi e Fletcher, 2020), ela se restringe apenas a condições de oscilações de potência simétricas. Então, para superar essa limitação, e para que condições de oscilações de potência assimétricas possam também ser representadas, é originalmente proposto neste estudo, que as variáveis Y_0 e Y_1 , presentes em (6.1), sejam substituídas por novas variáveis, que possam assumir valores diferentes por fase, denominadas Y_{x0} e Y_{x1} . Assim, uma nova formulação é proposta como

$$y_x(t) = Y_{x1} \sin(2\pi f_1 t + \alpha_{y1} + \theta_x) + Y_{x0} \sin(2\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \quad (6.2)$$

Dessa maneira, quando os valores de pico são iguais nas três fases ($Y_{A0} = Y_{B0} = Y_{C0}$ e $Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1}$), tem-se na equação (6.2) sinais trifásicos equilibrados e, portanto, uma condição de oscilação de potência simétrica. Se os valores de pico são diferentes nas três fases ($Y_{A0} \neq Y_{B0} \neq Y_{C0}$ e $Y_{A1} \neq Y_{B1} \neq Y_{C1}$), a equação (6.2) retrata sinais trifásicos desequilibrados e, conseqüentemente, uma condição de oscilação de potência assimétrica.

Contextualizando agora essas formulações, equações (6.1) e (6.2), com os sinais trifásicos registrados durante oscilações de potência, é rerepresentado na Fig. 67 os sinais trifásicos já apresentados na Fig. 18 e na Fig. 24. Novamente, a equação (6.1) se limita a modelar condições de oscilações de potência simétricas, perfeitamente equilibradas, como os sinais trifásicos apresentados na Fig. 67 (a). Enquanto a equação (6.2) pode retratar as duas condições: oscilações de potência simétricas e assimétricas, como exemplificado, respectivamente, na Fig. 67 (a) e (b). Ainda referindo a equação (6.2), nesse ponto cabe introduzir um breve comentário sobre os casos reais de oscilações de potência simétricas. A análise de alguns casos, que inclusive será mostrada neste capítulo, tem revelado que os sinais trifásicos não são perfeitamente equilibrados nessas condições. Embora sejam tratados

como simétricos, existem pequenos desequilíbrios ($Y_{A0} \approx Y_{B0} \approx Y_{C0}$ e $Y_{A1} \approx Y_{B1} \approx Y_{C1}$). Então, a escolha pela equação (6.2), em relação a equação (6.1), é também adequada para modelar oscilações de potência simétricas que não são perfeitamente equilibradas.

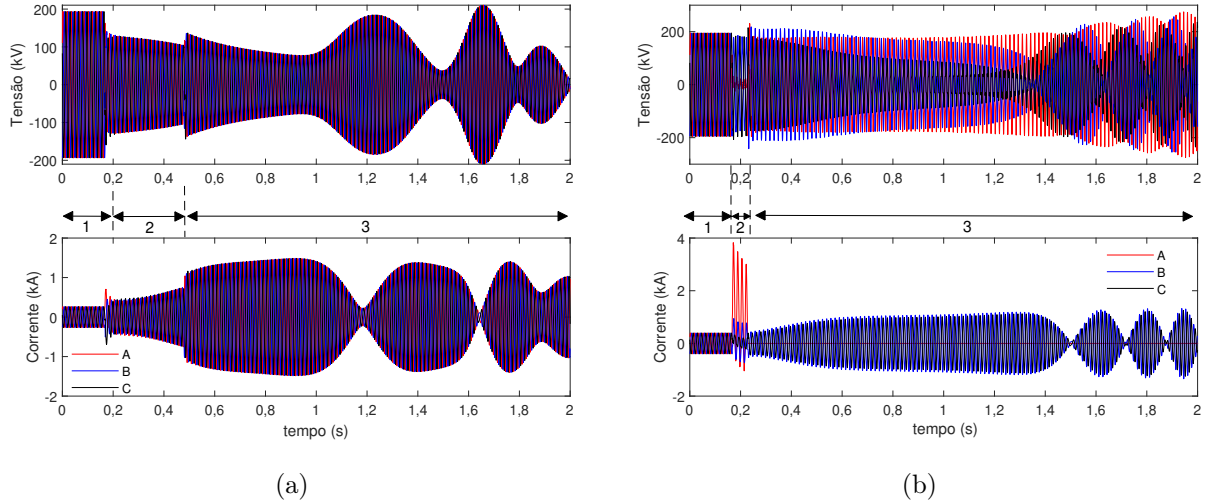


Figura 67 – Sinais trifásicos registrados pelo relé R_9 . (a) Oscilação de potência Simétrica. (b) Oscilação de potência Assimétrica.

6.1.2 Filtro de Fourier e o Teorema de Fortescue: Análise no Domínio do Tempo Contínuo

Essa seção verifica o desempenho do filtro de Fourier e do teorema de Fortescue durante condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Para isso, a demonstração analítica, proposta na seção 5.1.2, é reproduzida novamente. Porém, aqui é considerada a equação (6.2), em relação a equação (6.1), como sinal de entrada do filtro de Fourier. Novamente é considerado o filtro de Fourier de um ciclo não recursivo¹. As equações deste filtro, já apresentadas em (5.2), (5.3) e (5.4), são reescritas a seguir

$$E_{xy}(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y_x(n) \sin [2\pi f_0 t(n)] \quad (6.3)$$

$$F_{xy}(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y_x(n) \cos [2\pi f_0 t(n)] \quad (6.4)$$

$$\dot{Y}_x(k) = E_{xy}(k) + jF_{xy}(k) \quad (6.5)$$

¹ Deve ser enfatizado que, o filtro de Fourier não recursivo considera em sua formulação matemática a frequência fundamental (f_0) do sistema elétrico. Dessa maneira, é objetivo desse filtro estimar fasores de frequência fundamental (f_0). Outro destaque, é que o filtro de Fourier não recursivo, mesmo diante de um sinal de entrada $y_x(n)$ de frequência fundamental f_0 , não estima fasores estacionários nessas condições. No entanto, correções angulares podem ser realizadas, e assim obter fasores estacionários. As equações (6.3), (6.4) e (6.5) incorporam estas correções angulares aplicadas ao filtro de Fourier não recursivo. Maiores detalhes do processo de correção angular podem ser consultadas no apêndice D.

Sabendo que uma representação equivalente, no domínio do tempo contínuo, pode ser escrita como

$$E_{xy}(t_f) = \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} y_x(t) \operatorname{sen}(2\pi f_0 t) dt \quad (6.6)$$

$$F_{xy}(t_f) = \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} y_x(t) \operatorname{cos}(2\pi f_0 t) dt \quad (6.7)$$

$$\dot{Y}_x(t_f) = E_{xy}(t_f) + jF_{xy}(t_f) \quad (6.8)$$

O fasor $\dot{Y}_x(t_f)$, dado em (6.8), pode ser calculado substituindo inicialmente o sinal de entrada $y_x(t)$, definido em (6.2), na equação (6.6). Portanto

$$\begin{aligned} E_{xy}(t_f) &= \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_{x0} \operatorname{sen}(2\pi f_0 t + \alpha_{y0} + \theta_x) \operatorname{sen}(2\pi f_0 t) dt \\ &+ \frac{2}{(t_f - t_i)} \int_{t_i}^{t_f} Y_{x1} \operatorname{sen}(2\pi f_1 t + \alpha_{y1} + \theta_x) \operatorname{sen}(2\pi f_0 t) dt \end{aligned} \quad (6.9)$$

Solucionando (6.9), encontra-se o coeficiente associado a parte real $E_{xy}(t_f)$ como

$$\begin{aligned} E_{xy}(t_f) &= Y_{x0} \operatorname{cos}(\alpha_{y0} + \theta_x) \\ &+ \frac{Y_{x1}}{(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} \operatorname{sen}(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) - \frac{1}{\omega^-} \operatorname{sen}(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x) \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \end{aligned} \quad (6.10)$$

onde

$$\begin{aligned} \omega^+ &= 2\pi(f_1 - f_0) \\ \omega^- &= 2\pi(f_1 + f_0) \\ f_0 &= \frac{1}{(t_f - t_i)} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Da mesma forma, substituindo em (6.7) o sinal de entrada $y_x(t)$, dado por (6.2), obtém-se o coeficiente associado a parte imaginária $F_{xy}(t_f)$ como

$$\begin{aligned} F_{xy}(t_f) &= Y_{x0} \operatorname{sen}(\alpha_{y0} + \theta_x) \\ &- \frac{Y_{x1}}{(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} \operatorname{cos}(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x) + \frac{1}{\omega^-} \operatorname{cos}(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x) \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \end{aligned} \quad (6.12)$$

Substituindo (6.10) e (6.12) em (6.8), obtém-se o fasor $\dot{Y}_x(t_f)$ no instante t_f , que pode ser escrito utilizando a notação exponencial, como

$$\dot{Y}_x(t_f) = Y_{x0} e^{j(\alpha_{y0} + \theta_x)} + \frac{Y_{A1}}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} + \theta_x)} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + \theta_x)} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (6.13)$$

Expandindo a equação (6.13) para as fases A , B e C , obtém-se os fasores por fase

$$\dot{Y}_A(t_f) = Y_{A0} e^{j(\alpha_{y0}+0)} + \frac{Y_{A1}}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} + 0)} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + 0)} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (6.14)$$

$$\dot{Y}_B(t_f) = Y_{B0} e^{j(\alpha_{y0} - \frac{2\pi}{3})} + \frac{Y_{B1}}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} - \frac{2\pi}{3})} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} - \frac{2\pi}{3})} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (6.15)$$

$$\dot{Y}_C(t_f) = Y_{C0} e^{j(\alpha_{y0} - \frac{4\pi}{3})} + \frac{Y_{C1}}{j(t_f - t_i)} \left[\frac{1}{\omega^+} e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1} - \frac{4\pi}{3})} + \frac{1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} - \frac{4\pi}{3})} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \quad (6.16)$$

Uma vez estimados os fasores por fase, o fasor de sequência negativa para fase A , $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, pode ser calculado de acordo com o teorema de Fortescue como

$$\dot{Y}_{a2}(t_f) = \frac{1}{3} \left[\dot{Y}_A(t_f) + a^2 \dot{Y}_B(t_f) + a \dot{Y}_C(t_f) \right] \quad (6.17)$$

onde $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$. Substituindo (6.14), (6.15) e (6.16) em (6.17), obtém-se o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, durante uma condição de oscilação de potência, como

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{a2}(t_f) = \frac{1}{3} \left\{ e^{j\alpha_{y0}} \left[Y_{A0} + Y_{B0} e^{j\frac{2\pi}{3}} + Y_{C0} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] \right. \\ \left. + \frac{e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1})}}{j(t_f - t_i)\omega^+} \left[Y_{A1} + Y_{B1} e^{j\frac{2\pi}{3}} + Y_{C1} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \right. \\ \left. + \frac{e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1})}}{j(t_f - t_i)\omega^-} \left[Y_{A1} + Y_{B1} e^{j2\pi} + Y_{C1} e^{j2\pi} \right] \Bigg|_{t_i}^{t_f} \right\} \quad (6.18) \end{aligned}$$

6.1.3 Seleção de Características do Fasor de Sequência Negativa

Uma análise da equação (6.18) permite concluir que o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ é resultante da soma de três fasores: um fasor estacionário (1º termo no lado direito de (6.18)), um fasor que gira na frequência ω^+ (2º termo) e um fasor que gira na frequência ω^- (3º termo). Dessa maneira, não encontra-se em (6.18) um comportamento bem definido (girante ou estacionário) para o fasor $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, o que dificultaria nesse momento caracterizar uma condição de oscilação de potência a partir desse resultado.

No entanto, a equação (6.18) traz importantes informações, que serão investigadas inicialmente no contexto de oscilações de potência simétricas. Então, considerando sinais trifásicos perfeitamente equilibrados entre si, conforme a seguir

$$Y_{A0} = Y_{B0} = Y_{C0} = Y_0 \quad (6.19)$$

$$Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1} = Y_1 \quad (6.20)$$

E substituindo (6.19) e (6.20) em (6.18), obtém-se

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{a2}(t_f) = & \frac{1}{3} \left\{ Y_0 e^{j\alpha_{y0}} \left[1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] \right. \\ & + \frac{Y_1 e^{j(\omega^+ t + \alpha_{y1})}}{j(t_f - t_i)\omega^+} \left[1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] \Big|_{t_i}^{t_f} \\ & \left. + \frac{Y_1 e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1})}}{j(t_f - t_i)\omega^-} \left[1 + e^{j2\pi} + e^{j2\pi} \right] \Big|_{t_i}^{t_f} \right\} \end{aligned} \quad (6.21)$$

Observa-se em (6.21) que o 1º e 2º termo entre colchetes são nulos. Portanto

$$\dot{Y}_{a2}(t_f) = \frac{Y_1}{(t_f - t_i)\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + \frac{\pi}{2})} \Big|_{t_i}^{t_f} = \frac{f_0 Y_1}{\omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + \frac{\pi}{2})} \Big|_{t_i}^{t_f} \quad (6.22)$$

A equação (6.22) corresponde a um fasor que gira na frequência angular ω^- . Como esperado, esse resultado é idêntico ao apresentado na equação (5.35), e retrata condições de oscilações de potência simétricas.

Embora a equação (6.18) se reduza a um fasor que gira na frequência angular ω^- durante oscilações de potência simétricas (equação (6.22)), durante oscilações de potência assimétricas a equação (6.18) não admite solução analítica, pois $Y_{A0} \neq Y_{B0} \neq Y_{C0}$ e $Y_{A1} \neq Y_{B1} \neq Y_{C1}$ nessas condições.

Então, para solucionar esse problema, e obter um fasor de frequência angular ω^- durante oscilações de potência, simétricas e assimétricas, esse trabalho propõe que a característica de interesse de (6.18) seja selecionada utilizando um processo de filtragem. Dessa maneira, é proposto um filtro passa alta, sintonizado de maneira que esteja na banda passante o fasor que gira na frequência ω^- , enquanto o fasor estacionário e o fasor que gira na frequência ω^+ estejam na banda de rejeição. Assim, após a filtragem passa alta, a equação (6.18) se reduz ao 3º termo do lado direito, conforme a seguir

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{a2}(t_f) = & \frac{e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1})}}{j 3 (t_f - t_i) \omega^-} (Y_{A1} + Y_{B1} e^{j2\pi} + Y_{C1} e^{j2\pi}) \Big|_{t_i}^{t_f} \\ \text{ou} \\ \dot{Y}_{a2}(t_f) = & \frac{f_0 (Y_{A1} + Y_{B1} e^{j2\pi} + Y_{C1} e^{j2\pi})}{3 \omega^-} e^{-j(\omega^- t + \alpha_{y1} + \pi/2)} \Big|_{t_i}^{t_f} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Nota-se que o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$, obtido em (6.23), possui:

- frequência $\omega^- = 2\pi(f_0 + f_1)$ e, portanto, gira com frequência aproximadamente igual a 120 Hz, uma vez que $f_0 = 60$ Hz e f_1 pode variar entre 53 e 67 Hz (admitindo que a frequência de escorregamento é um valor entre 0,3 e 7 Hz (Mahamedi et al., 2016; Hasani e Haghjoo, 2017));

- independe dos parâmetros de impedância do sistema elétrico, o que possibilitará propor um esquema de proteção de simples configuração, dispensando a necessidade de estudos sistêmicos complexos para definir ajustes de parametrização;
- retrata condições de oscilações de potência simétricas, perfeitamente equilibradas ($Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1}$) e não perfeitamente equilibradas ($Y_{A1} \approx Y_{B1} \approx Y_{C1}$), assim como oscilações de potência assimétricas ($Y_{A1} \neq Y_{B1} \neq Y_{C1}$). Isso permitirá obter fasores girantes, na frequência ω^- , durante oscilações de potência simétricas e assimétricas.

6.1.4 Análise Gráfica do Fasor Girante de Sequência Negativa

Uma vez selecionado o fasor de sequência negativa, dado em (6.23), uma análise gráfica dessa equação é realizada a seguir. Serão discutidas condições de operação em regime permanente senoidal e oscilações de potência. Para isso, inicialmente (6.23) é reescrito na forma polar como

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{a2}(t_f) &= \frac{f_0 (Y_{A1} + Y_{B1}e^{j2\pi} + Y_{C1}e^{j2\pi})}{3\omega^-} \angle - (\omega^- t_f + \alpha_{y1} + \pi/2) \\ &\quad - \frac{f_0 (Y_{A1} + Y_{B1}e^{j2\pi} + Y_{C1}e^{j2\pi})}{3\omega^-} \angle - (\omega^- t_i + \alpha_{y1} + \pi/2) \end{aligned} \quad (6.24)$$

Escrevendo (6.24) como

$$\dot{Y}_{a2}(t_f) = \dot{F}_1^-(t_f) - \dot{F}_2^-(t_i) = Y_{a2} \angle \Phi_{ya2}(t_f) \quad (6.25)$$

Sendo

$$\dot{F}_1^-(t_f) = \frac{f_0 (Y_{A1} + Y_{B1}e^{j2\pi} + Y_{C1}e^{j2\pi})}{3\omega^-} \angle - (\omega^- t_f + \alpha_{y1} + \pi/2) \quad (6.26)$$

$$\dot{F}_2^-(t_i) = \frac{f_0 (Y_{A1} + Y_{B1}e^{j2\pi} + Y_{C1}e^{j2\pi})}{3\omega^-} \angle - (\omega^- t_i + \alpha_{y1} + \pi/2) \quad (6.27)$$

onde, Y_{a2} e $\Phi_{ya2}(t_f)$ correspondem, respectivamente, ao valor de pico e ao ângulo do fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$. Já \dot{F}_1^- e \dot{F}_2^- são fasores calculados nos instantes t_f e t_i , respectivamente. Nota-se em (6.26) e (6.27) que os ângulos de $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$ estão em função da frequência $\omega^- = 2\pi(f_0 + f_1)$. Portanto, o deslocamento entre $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$ independe dos valores de pico (Y_{A1}, Y_{B1}, Y_{C1}), sendo a análise a seguir é válida para condições equilibradas e desequilibradas.

Atribuindo condições iniciais as equações (6.26) e (6.27), $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$ podem ser calculados. Seguindo essa metodologia, é possível concluir que, durante regime permanente

senoidal ($f_1 = f_0$) e sendo f_0 um número inteiro igual a 60 Hz, não existe deslocamento entre $\dot{F}_1^-(t_f)$ e $\dot{F}_2^-(t_i)$ e, portanto, o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ é nulo, com módulo igual a zero e ângulo indeterminado. A Fig. 68 (a) e (b) mostra qualitativamente essa discussão para condições de regime permanente senoidal, equilibradas ($Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1}$) e desequilibradas ($Y_{A1} > Y_{B1} > Y_{C1}$).

Da mesma forma (atribuindo condições iniciais as equações (6.26) e (6.27)) é possível concluir que, durante oscilações de potência ($f_1 \neq f_0$), existe um deslocamento entre \dot{F}_1^- e \dot{F}_2^- e, portanto, o fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ é girante, com frequência ω^- e no sentido horário. A Fig. 68 (c) e (d) mostra qualitativamente essa discussão para oscilações de potência, simétricas ($Y_{A1} = Y_{B1} = Y_{C1}$) e assimétricas ($Y_{A1} > Y_{B1} > Y_{C1}$).

Assim, pode-se afirmar que o cálculo analítico, dado por (6.23), resulta em:

- fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}^-(t_f)$ nulo durante regime permanente senoidal, equilibrado e desequilibrado;
- fasor de sequência negativa $\dot{Y}_{a2}^-(t_f)$ girante, com frequência ω^- e no sentido horário, durante oscilações de potência, simétricas e assimétricas.

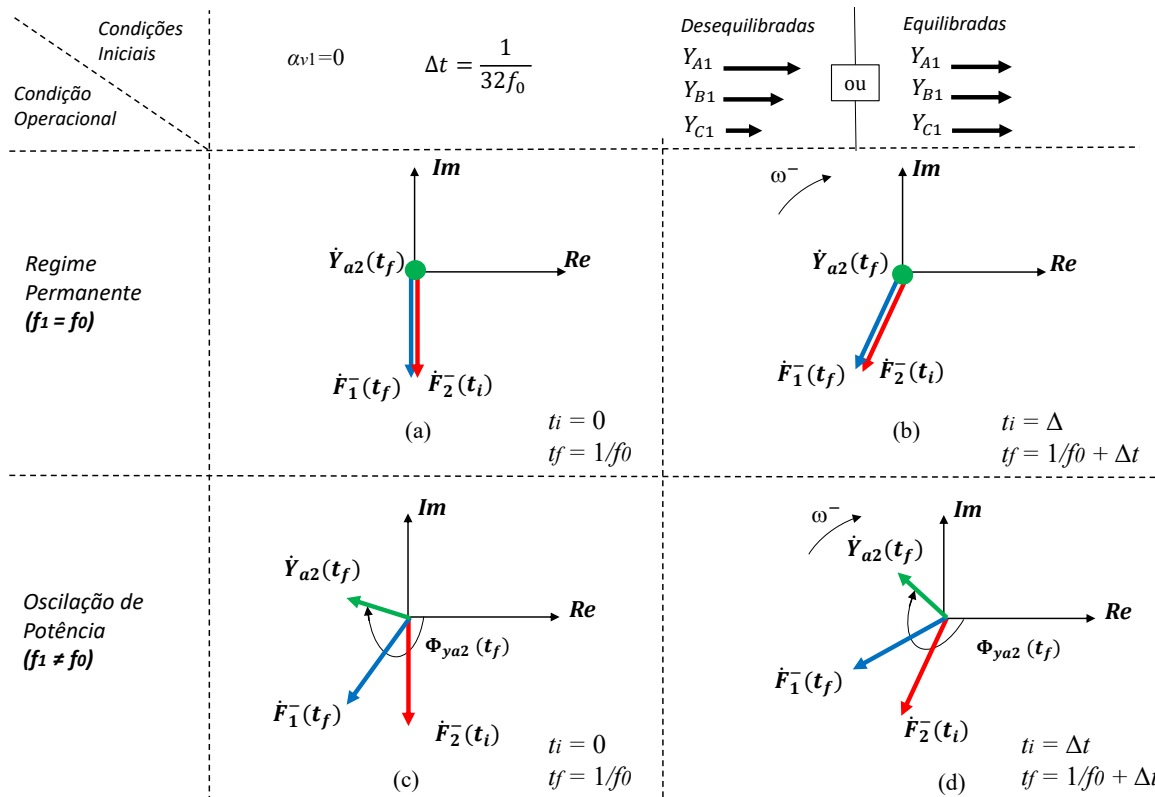


Figura 68 – (a) e (b) Regime permanente senoidal, equilibrado ou desequilibrado. $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ é nulo. (c) e (d) Oscilações de potência, simétricas ou assimétricas. $\dot{Y}_{a2}(t_f)$ gira no sentido horário.

6.1.5 Considerações Finais sobre os Fasores de Sequência Negativa Estimados Durante Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas

Foi mostrado nessa seção 6.1:

- nova formulação matemática, conforme (6.2), originalmente proposta neste trabalho, capaz de modelar condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas;
- o filtro de Fourier em conjunto com o teorema de Fortescue estimam fasores de sequência negativa durante oscilações de potência simétricas e assimétricas, conforme equação (6.18);
- por meio da filtragem passa alta pode ser selecionado, a partir de (6.18), um fasor de sequência negativa, que gira no sentido horário com frequência angular ω^- , conforme equação (6.23).

Nesse ponto cabe introduzir importantes comentários sobre o ângulo do fasor de sequência negativa dado em (6.23). Durante oscilações de potência o fasor está girando no sentido horário no plano cartesiano. Nesse caso, o seu ângulo pode ser representado por uma onda dente de serra decrescente ao longo do tempo, desde que sejam considerados valores dentro do intervalo $[-180^\circ \ 180^\circ]$. A Fig. 69 (a) e (d) ilustra essa discussão. Observa-se na Fig. 69 (a) que existem descontinuidades na onda dente de serra, e que esses saltos também estão presentes quando calculado a diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{ya2}(k) = \Phi_{ya2}(k) - \Phi_{ya2}(k-1)$), conforme mostrado na Fig. 69 (b). Então, diferentemente do método utilizado no Capítulo 5, neste capítulo tem sido eliminada a descontinuidade observada em $\Delta\Phi_{ya2}$, obtendo um valor constante, conforme apresentado na Fig. 69 (c). Para isso, foi implementado um código, nomeado como *Algoritmo elimina descontinuidades de $\Delta\Phi_{ya2}$* , que adiciona $\pm 360^\circ$ sempre que o valor absoluto de $\Delta\Phi_{ya2}$ é maior que o limite de 180° . Esse algoritmo é mostrado na página seguinte.

Assim, durante a oscilação de potência, o giro do fasor de sequência negativa apresentado na Fig. 69 (a) e (d), será representado por um valor constante, conforme Fig. 69 (c). Será mostrado que esse valor constante de $\Delta\Phi_{ya2}$ pode ser calculado analiticamente. Essa característica permitirá propor um novo algoritmo de proteção multifunção e de simples configuração (independente de estudos sistêmicos complexos para definir ajustes de parametrização), capaz de realizar:

1. **Bloqueio da proteção de distância (ANSI 68) por detecção de:**
 - a) oscilação de potência simétrica e instável;
 - b) oscilação de potência simétrica e estável;

- c) oscilação de potência assimétrica e instável;
- d) oscilação de potência assimétrica e estável.

2. Desbloqueio da proteção de distância, durante as condições de oscilações de potência anteriormente mencionadas, por ocorrência de:

- a) faltas simétricas;
- b) faltas assimétricas.

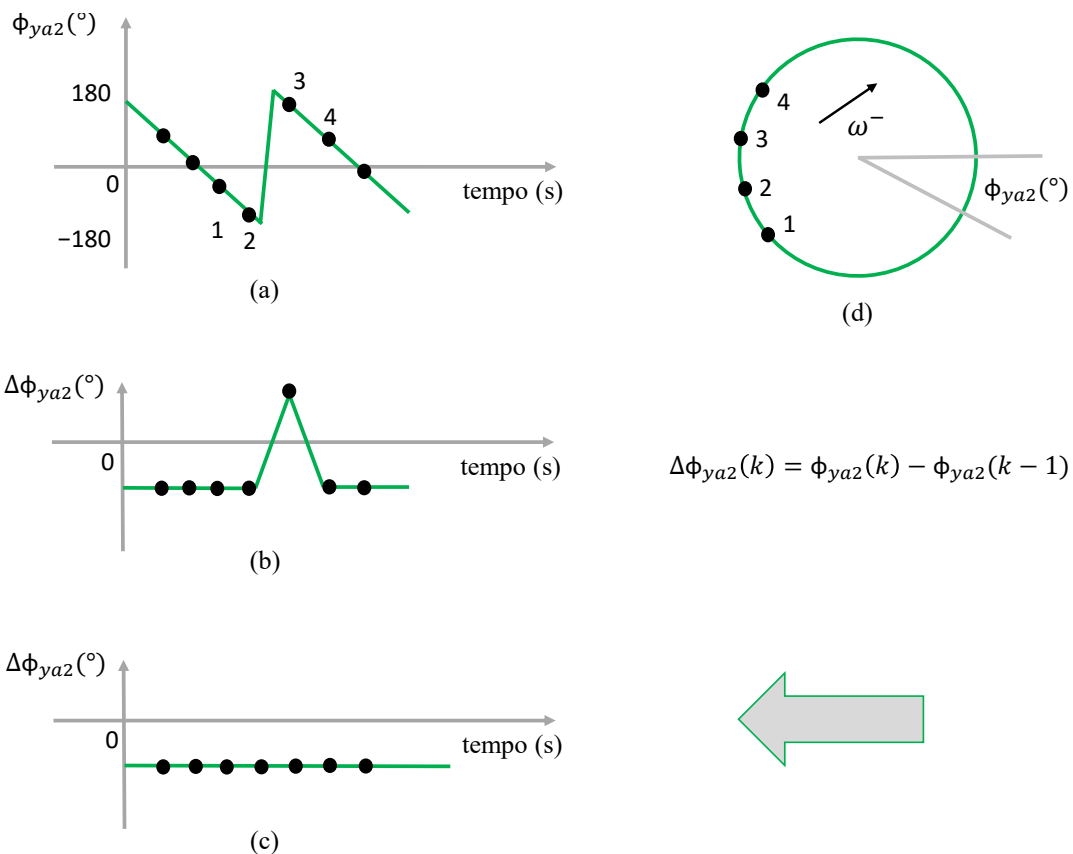


Figura 69 – Comportamento durante oscilações de potência. (a) Onda dente de serra decrescente. (b) Diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{ya2}$). (c) $\Delta\Phi_{ya2}$ após eliminar a descontinuidade. (d) Giro no plano cartesiano.

Algoritmo elimina descontinuidades de $\Delta\Phi_{ya2}$

se ($\Delta\Phi_{ya2}(k) > 180^\circ$)

$$\Delta\Phi_{ya2}(k) \leftarrow \Delta\Phi_{ya2}(k) - 360^\circ$$

senão ($\Delta\Phi_{ya2}(k) < -180^\circ$)

$$\Delta\Phi_{ya2}(k) \leftarrow \Delta\Phi_{ya2}(k) + 360^\circ$$

senão

$$\Delta\Phi_{ya2}(k) \leftarrow \Delta\Phi_{ya2}(k)$$

fim se

6.2 Algoritmo Proposto

Essa seção apresenta o algoritmo proposto ALG-B. Conforme mencionado anteriormente, ele se baseia em um valor constante, dado pela diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{\gamma a2}$). Outra característica desse algoritmo, mencionada agora, é que ele depende de uma zona de partida, que deve ser externa e concêntrica a maior zona de proteção, não importando a característica de operação configurada no relé de distância (Mho, poligonal, ...). A Fig. 70 ilustra essa característica e as demais configurações do sistema de proteção adotadas neste estudo, que possui duas zonas de proteção (Z_1 e Z_2), e uma zona partida (Z_p), externa e concêntrica a Z_2 . Todas essas informações são importantes para compreensão do algoritmo proposto nessa seção.

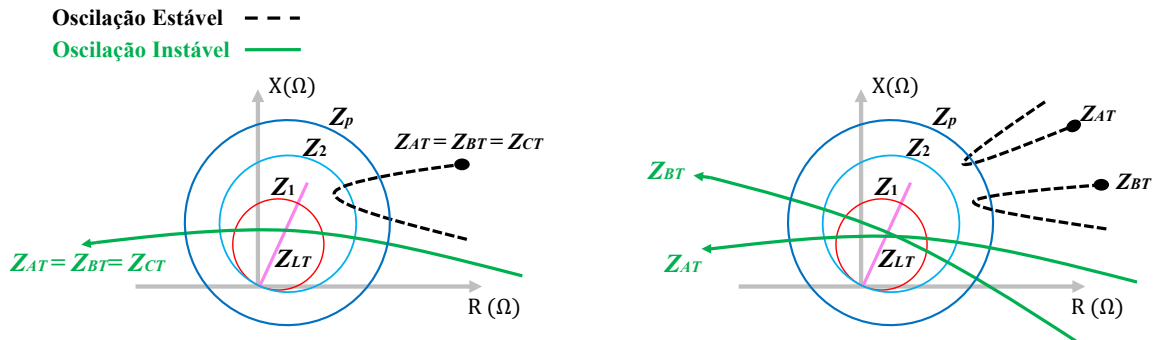


Figura 70 – Plano RX . Excursão da impedância durante: (a) oscilações de potência simétricas. (b) oscilações de potência assimétricas. Característica Mho.

6.2.1 Processamento de Dados

Essa seção apresenta a rotina de processamentos de dados que deve ser realizada anteriormente a execução do algoritmo proposto ALG-B. A Fig. 71 apresenta um fluxograma contendo a rotina implementada. São dados de entrada os sinais trifásicos de tensão e corrente. Em seguida, a partir do método de interpolação linear, os dados são amostrados na frequência de amostragem (f_s) de interesse

$$f_s = N_a f_0 \quad (6.28)$$

onde N_a corresponde ao número de amostras por ciclo da frequência fundamental (f_0). Essa etapa permite avaliar o algoritmo diante de diferentes frequências de amostragem (f_s). Após a interpolação, é utilizado um filtro passa baixa para eliminar contaminações por ruído, do tipo Butterworth de 2^a ordem ($N = 2$) e com frequência de corte (f_c) de 100 Hz (Silveira, 2007). Então, o filtro de Fourier de um ciclo não recursivo é utilizado para estimar os fasores de fase e o teorema de Fortescue para calcular os fasores de sequência negativa de tensão ($\dot{V}_{a2}(k)$) e corrente ($\dot{I}_{a2}(k)$). Vale destacar que as etapas descritas até aqui são comumente realizadas por relés de proteção.

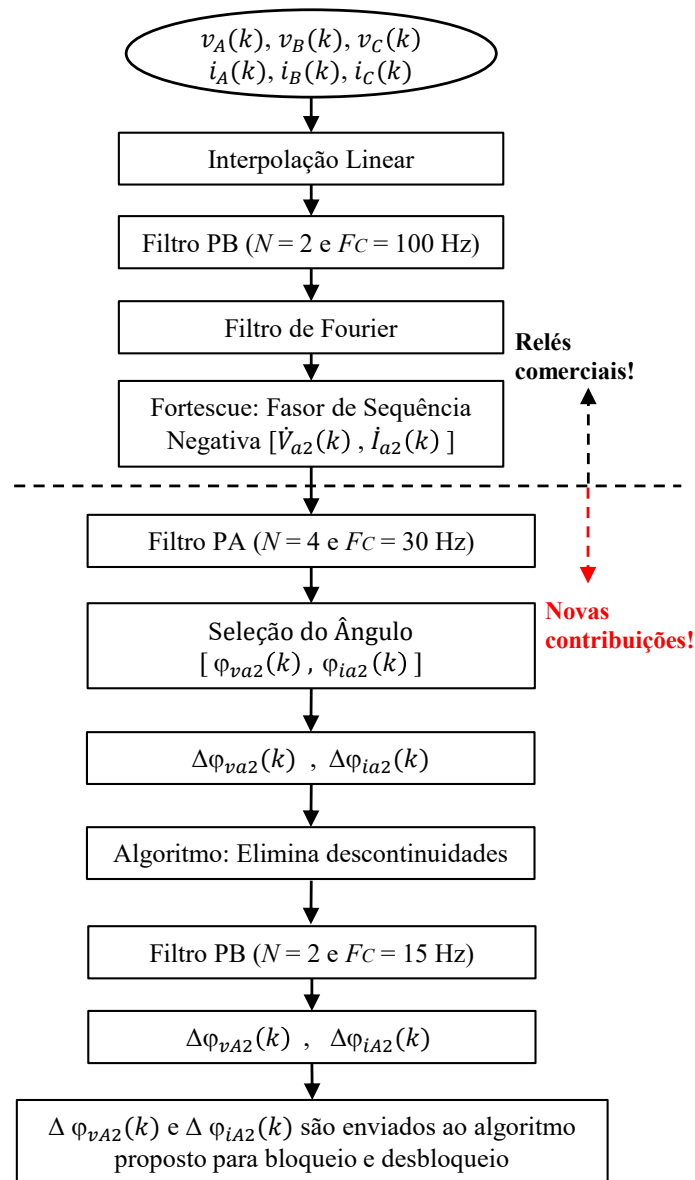


Figura 71 – Fluxograma: rotina de processamento de dados.

Então, iniciam-se as contribuições deste estudo. Inicialmente, é realizada a filtragem passa alta do fasor de sequência negativa. Para isso o fasor é separado em parte real e parte imaginária. Esses dados são enviados para um filtro passa alta do tipo Butterworth², com ordem $N = 4$ e frequência de corte $f_c = 30$ Hz. Na Fig. 72 é mostrada a resposta em frequência desse filtro passa alta para $f_s = 1920$ Hz (32 pontos por ciclo da fundamental de 60 Hz). Nota-se que estão na banda passante os dados de frequência w^- ($w^- \approx 120$ Hz), enquanto os dados com frequência inferior a w^+ são severamente atenuados ($w^+ \leq 7$ Hz). Após a filtragem, os dados são reagrupados na forma retangular obtendo fasores de

² Detalhes deste filtro passa alta de ordem $N = 4$ e frequência de corte $f_c = 30$ Hz podem ser consultados no apêndice E.

sequência negativa de interesse (frequência ω^-)³. Em seguida, os ângulos desses fasores, de tensão ($\Phi_{va2}(k)$) e corrente ($\Phi_{ia2}(k)$), são calculados em graus, e a diferença entre dois ângulos consecutivos, para tensão ($\Delta\Phi_{va2}(k)$) e corrente ($\Delta\Phi_{ia2}(k)$), é obtida de acordo com

$$\Delta\Phi_{va2}(k) = \Phi_{va2}(k) - \Phi_{va2}(k-1) \quad (6.29)$$

$$\Delta\Phi_{ia2}(k) = \Phi_{ia2}(k) - \Phi_{ia2}(k-1) \quad (6.30)$$

Por fim, são eliminadas as descontinuidades de $\Delta\Phi_{va2}(k)$ e $\Delta\Phi_{ia2}(k)$, conforme algoritmo mostrado na subseção 6.1.5 (*Algoritmo elimina descontinuidades de $\Delta\Phi_{ya2}$*), e para obter uma resposta limpa, é utilizado um filtro passa baixa do tipo Butterworth⁴ com ordem $N = 2$ e frequência de corte $f_c = 15$ Hz, obtendo $\Delta\Phi_{vA2}(k)$ e $\Delta\Phi_{iA2}(k)$. Esses dados são enviados ao algoritmo proposto ALG-B, destinado a realizar as funções de bloqueio e desbloqueio da proteção de distância, que será apresentado a seguir.

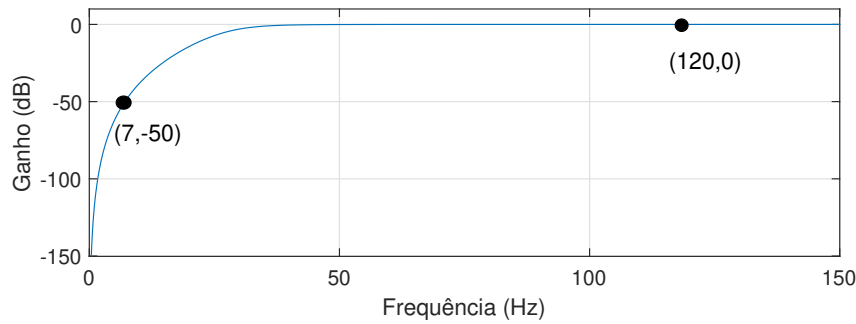


Figura 72 – Resposta em frequência. Filtro passa alta do tipo Butterworth com $N = 4$, $f_c = 30$ Hz e $f_s = 1920$ Hz.

6.2.2 Algoritmo Proposto para Bloqueio e Desbloqueio da Proteção de Distância (ALG-B)

Inicialmente essa seção destaca uma nova variável, denominada $\Delta\Phi_{vi}$, que é utilizada para calcular analiticamente a diferença entre dois ângulos consecutivos. Assim, durante oscilações de potência

$$\Delta\Phi_{vi} = -\omega^-(\Delta t) \frac{180}{\pi} \quad (6.31)$$

onde (Δt) é o intervalo de tempo entre duas amostras. Reescrevendo (6.31) em função de N_a , f_0 e f_1 , obtém-se

$$\Delta\Phi_{vi} = -2\pi(f_0 + f_1) \frac{1}{N_a f_0} \frac{180}{\pi} = -\frac{6(f_0 + f_1)}{N_a} \quad (6.32)$$

³ Durante oscilações de potência simétricas e assimétricas, são obtidos fasores girantes de frequência ω^- , conforme demonstrado em (6.23).

⁴ O efeito deste filtro passa baixa, utilizado para eliminar os transitórios de $\Delta\Phi_{ya2}$ e obter uma resposta mais limpa ($\Delta\Phi_{yA2}$), é discutido no apêndice F.

Observa-se em (6.32) que $\Delta\Phi_{vi}$ é um valor negativo, em graus. Outro destaque é a dependência de N_a , que pode ser igual a 8, 16, 32, 48, 64 ou de acordo com a frequência de amostragem do relé de proteção. De forma a exemplificar numericamente o algoritmo proposto, todos os valores numéricos calculados daqui para frente serão feitos considerando um número de amostras por ciclo igual a 32 ($N_a = 32$). Outras taxas de amostragem adotadas nos relés vão levar a outros valores numéricos. Sabendo que f_1 pode variar entre 53 e 67 Hz (admitindo que a frequência de escorregamento é um valor entre 0,3 e 7 Hz (Mahamedi et al., 2016; Hasani e Haghjoo, 2017)) e $f_0 = 60$ Hz, é esperado que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$, estimados na etapa de processamento de dados conforme Fig. 71, pertençam ao intervalo fechado $[-23, 8125^\circ, -21, 1875^\circ]$, definido analiticamente de acordo com (6.32).

No entanto, se ocorrida uma falta durante oscilações de potência, $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ saem desse intervalo pré-definido $[-23, 8125^\circ, -21, 1875^\circ]$, assumindo um novo valor próximo a zero grau. Esse valor pode ser explicado de acordo com a equação (6.18): durante o transitório de falta ocorrem variações dos valores de pico e o filtro passa alta não elimina completamente o primeiro e o segundo termo do lado direito de (6.18). Como essas parcelas são, respectivamente, fasores estacionários e fasores com frequência de giro lento $\omega^+ (\leq 7 \text{ Hz})$, a diferença entre dois ângulos consecutivos, dado por $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$, tendem a ser zero grau se ocorrer uma falta durante oscilações de potência.

Diante disso, têm-se duas regiões bem definidas para $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$. Uma região, limitada pelo intervalo pré-definido $[-23, 8125^\circ, -21, 1875^\circ]$, que ocorre durante oscilações de potência e outra região, externa ao intervalo pré-definido e que tende a zero grau, que é observada na ocorrência de uma falta durante oscilações de potência. Assim, é estabelecido um valor limite para separar essas duas regiões, dado por

$$\Delta\Phi_{lim} = F_k \Delta\Phi_{vi}^c \quad (6.33)$$

onde $\Delta\Phi_{vi}^c$ é o valor central do intervalo pré-definido e F_k é um fator de segurança menor que 1. Este fator (F_k) é necessário para aumentar a confiabilidade do algoritmo diante de perturbações, como rejeições de carga, ruídos e harmônicas que podem acontecer durante oscilações de potência. Para exemplificar é escolhido $F_k = 0,85$. Sabendo que $\Delta\Phi_{vi}^c = -22,5^\circ$ para o intervalo pré-definido $[-23, 8125^\circ, -21, 1875^\circ]$, tem-se $\Delta\Phi_{lim} = -19,125^\circ$.

Dessa maneira, durante oscilações de potência $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ devem ser menores que $\Delta\Phi_{lim}$, caso contrário há ocorrência de uma falta. A Fig. 73 ilustra essa discussão para os valores anteriormente calculados. Vale destacar que $F_k = 0,85$ tem se mostrado eficiente para separar condições de oscilações de potência e faltas durante oscilações de potência. No entanto, F_k pode ser escolhido conforme desejado pelo engenheiro de proteção.

Uma vez definido $\Delta\Phi_{lim}$, o algoritmo proposto ALG-B é apresentado na Fig. 74. Ele se aplica aos seis loops da proteção de distância. Para simplificar será considerada apenas a impedância Z_{AT} . Inicialmente é verificada a variável $ANSI_{68}$, que é inicializada

como zero. Então, se a impedância Z_{AT} tem entrado na zona de partida Z_p e $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são simultaneamente menores que $\Delta\Phi_{lim}$, a proteção de distância deve ser bloqueada por ocorrência de oscilação de potência e $ANSI_{68}$ muda de nível lógico 0 para 1. Dessa maneira, enfatiza-se que o bloqueio é realizado no momento em que a impedância entra na

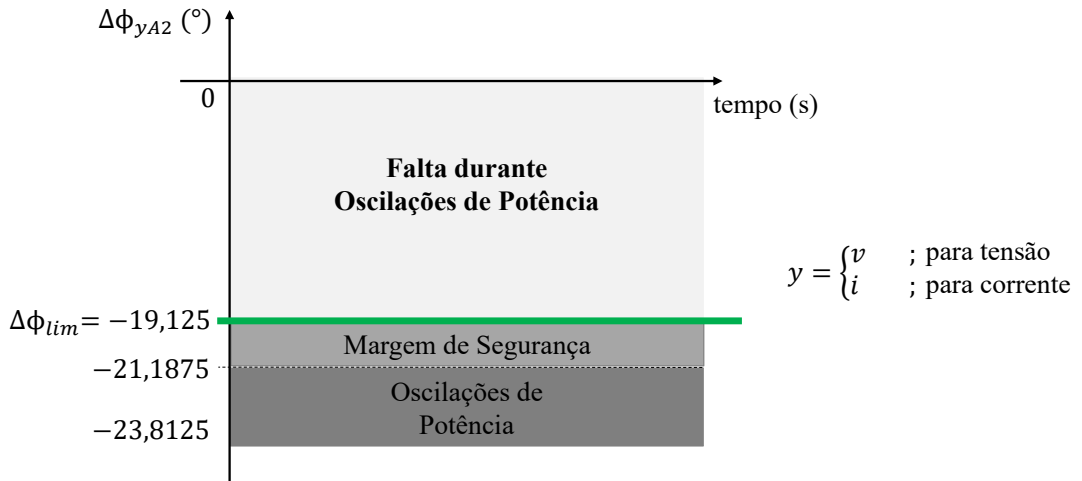


Figura 73 – $\Delta\Phi_{lim} = -19,125^\circ$ para separar regiões de oscilações de potência e faltas durante oscilações de potência.

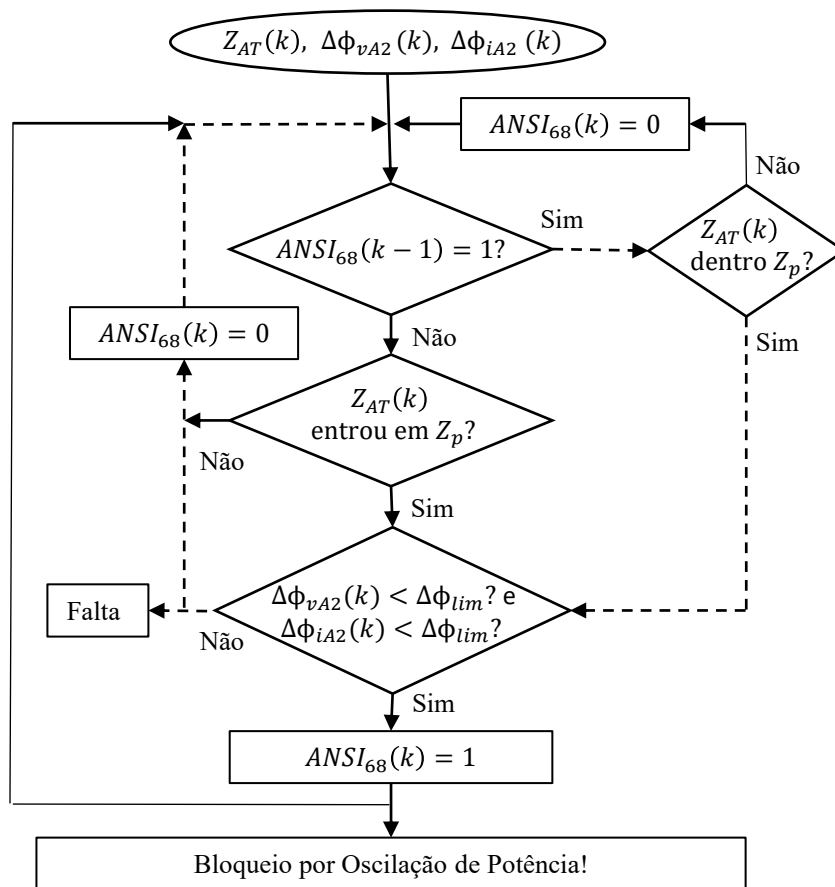


Figura 74 – Algoritmo proposto ALG-B: bloqueio e desbloqueio da proteção de distância.

zona de partida Z_p . Uma vez bloqueado, o algoritmo começa a monitorar o desbloqueio, que pode acontecer se a impedância Z_{AT} deixar a zona de partida Z_p , ou se, acontecer uma falta durante a oscilação de potência. Essa segunda condição corresponde ao caminho tracejado na Fig. 74 e significa que $\Delta\Phi_{vA2}$ e/ou $\Delta\Phi_{iA2}$ superaram $\Delta\Phi_{lim}$, causado por incidência de uma falta quando a impedância Z_{AT} está dentro da zona de partida Z_p .

6.3 Resultados: Cenários de Testes Obtidos via Software de Simulação

Nessa seção o algoritmo proposto ALG-B é validado diante de cenários de testes obtidos a partir do programa *Matlab/Simulink*. O sistema elétrico IEEE-9 barras, já apresentado na Fig. 12, é novamente utilizado. A Fig. 75 representa esse sistema elétrico. Para testes do algoritmo proposto ALG-B, serão utilizados os sinais trifásicos de corrente e tensão, registrados pelos relés R_9 e R_6 que estão protegendo a linha de transmissão LT_{96} .

Com relação ao sistema de proteção, é utilizada característica Mho pela proteção de distância, conforme já mostrado na Fig. 70. As zonas de proteção (Z_1 e Z_2) são respectivamente configuradas com alcance de 80% e 120% de Z_{LT-96} (comprimento linha

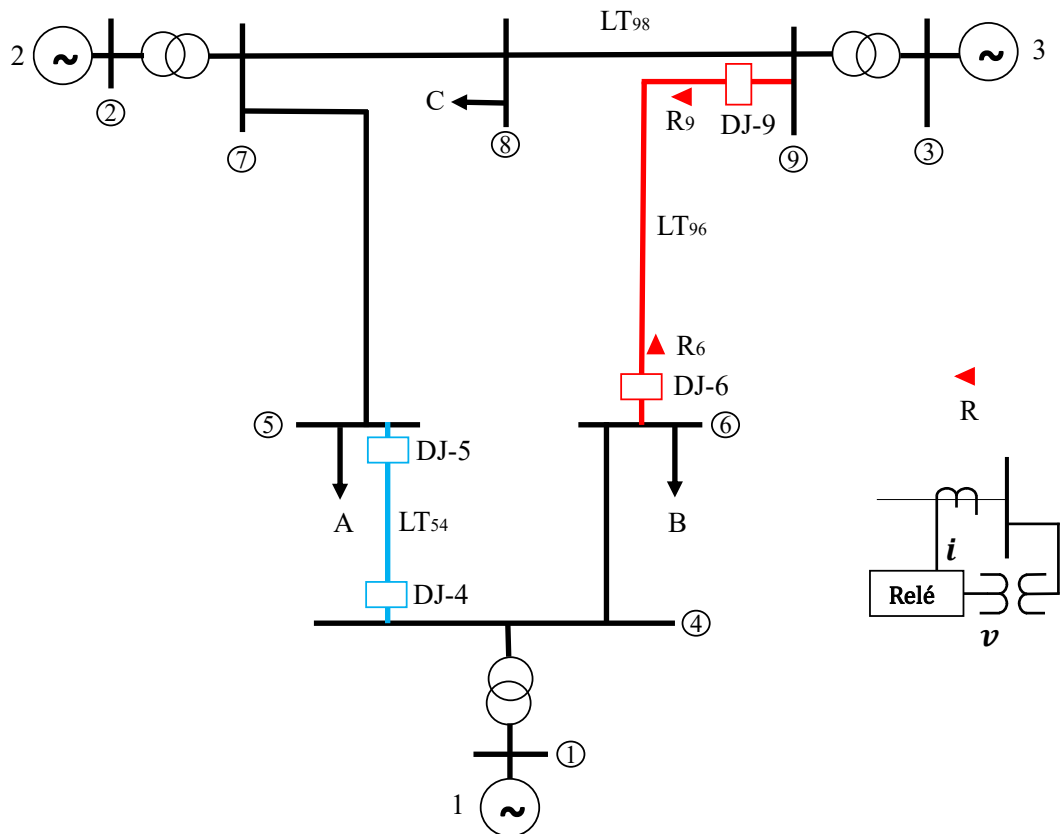


Figura 75 – Topologia do sistema elétrico IEEE-9 barras.

LT_{96}). A zona de partida (Z_p), externa e concêntrica a Z_2 , é configurada com raio⁵ $R_p = (1,8 |Z_{LT-96}|/2)$. Além disso, será admitido que o relé tenha frequência de amostragem de 1920 Hz ($N_a = 32$) e um fator de segurança $f_k = 0,85$. Os resultados são apresentados a seguir.

6.3.1 Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Considerando a Incidência de Faltas Durante Regime Permanente Senoidal Equilibrado

Para testes do algoritmo proposto ALG-B é criada uma falta trifásica sólida, na linha de transmissão LT_{96} , durante regime permanente senoidal equilibrado, que opera na frequência fundamental (60 Hz). A falta incide no instante 0,3479 s, distante 70 % a partir do barramento 9 e, portanto, deve ser vista vista em zona 1 (Z_1) pelo relé R_9 . Esse cenário de teste é o mesmo descrito na seção 5.3.1.

Na Fig. 76 e na Fig. 77 estão apresentados os resultados para este cenário de teste. Analisando a Fig. 76 (a) e (b), nota-se que a impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 , entra em Z_p , Z_2 e em Z_1 , nessa sequência, até estacionar no local da falta. Observa-se também que Z_{AT} se deslocada rapidamente durante a falta, uma vez que Z_p , Z_2 e Z_1 mudam de nível lógico 0 para 1 praticamente no mesmo instante. Por fim, vale destacar que as zonas de proteção estão livres para atuar ($ANSI_{68} = 0$), como desejado para uma condição de falta.

Analisando agora a Fig. 77. Como já discutido na seção 5.3.1, os instantes iniciais da simulação são desprezados. Portanto, será considerado regime permanente senoidal a resposta obtida a partir do instante próximo a 0,2 s. Nota-se nessa figura (Fig. 77 (a) e (b)) que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são inferiores a $\Delta\Phi_{lim}$ durante o período delimitado como regime permanente. Esse resultado é esperado para condições de oscilações de potência, mas a sua ocorrência, durante regime permanente senoidal equilibrado, é explicada da mesma maneira que foi apresentado na seção 5.3.1: durante regime permanente senoidal equilibrado os sinais trifásicos oscilam com frequência aproximadamente igual à 60 Hz⁶. Dessa maneira, conforme equação (6.25), haverá defasagem mínima entre F_1^- e F_2^- , que resultará em um fasor de sequência negativa \dot{Y}_{a2} , de módulo infinitesimal e girante na frequência ω^- (onda dente de serra). Logo, o algoritmo proposto ALG-B calcula $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ inferiores a $\Delta\Phi_{lim}$ nessas condições. Mas, é importante ressaltar que esse resultado não afeta o desempenho do algoritmo proposto ALG-B, porque:

⁵ A zona de partida Z_p deve ser externa e concêntrica a maior zona de proteção do relé de distância. Por exemplo, caso seja habilitada a terceira zona de proteção (Z_3), o raio R_p da zona de partida Z_p deve ser reajustado para manter-se externo e concêntrico a Z_3 .

⁶ Vale dizer que a frequência do sistema elétrico, durante regime permanente senoidal, não é um valor fixo (número inteiro igual à 60 Hz). Nos casos simulados, isso se deve a precisão do cálculo numérico realizado pelo software de simulação. Já em sistemas elétricos reais, isso ocorre devido a busca pelo equilíbrio de carga-geração, impedindo que o gerador síncrono mantenha a velocidade síncrona continuamente.

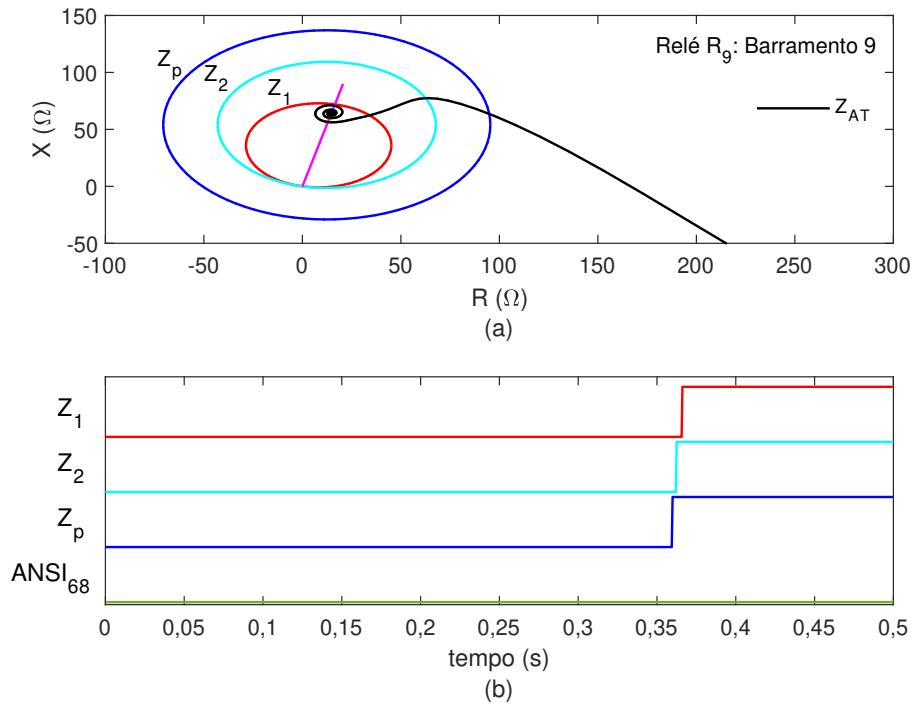


Figura 76 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal equilibrado. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos

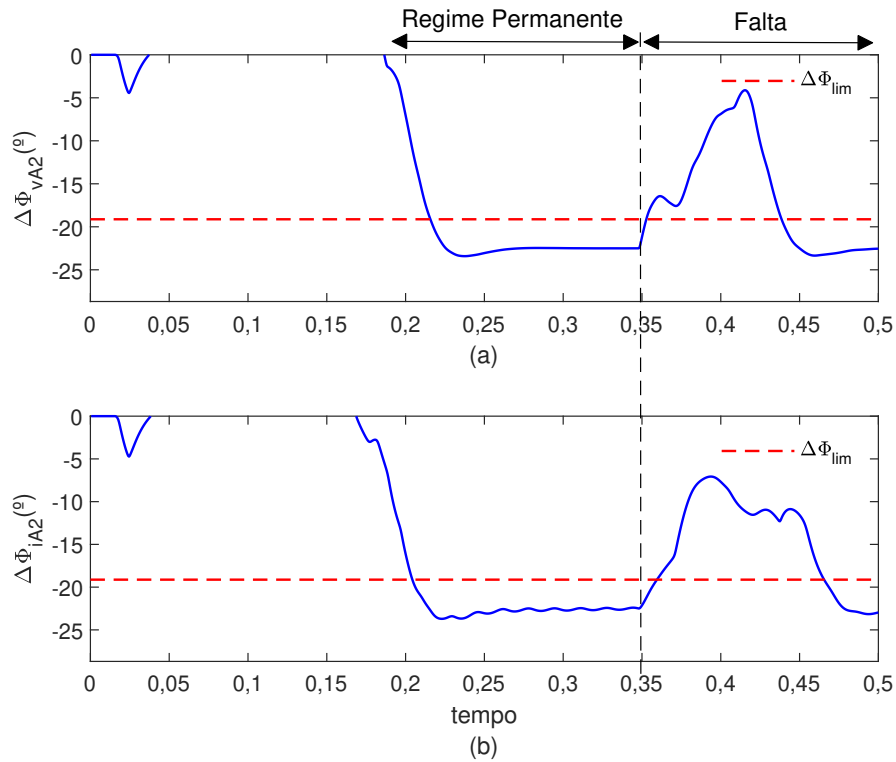


Figura 77 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal equilibrado. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$.

- conforme Fig. 74, o bloqueio das zonas de proteção está condicionado a inferioridade de $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ em relação a $\Delta\Phi_{lim}$, no momento exato que a impedância entra na zona de partida Z_p . Uma vez que a impedância está parada e distante de Z_p durante regime permanente senoidal equilibrado, o cálculo de $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ não é suficiente para indicar uma condição de oscilação de potência e bloquear as zonas de proteção. Conforme pode ser verificado na Fig. 76 (b) o desbloqueio é corretamente mantido ($ANSI_{68} = 0$) durante o regime permanente senoidal equilibrado.
- no momento que a impedância entra na zona de partida, $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ superam $\Delta\Phi_{lim}$, indicando a incidência de uma falta (Fig. 77 (a) e (b)). Como desejado, as zonas de proteção continuam livres para atuar ($ANSI_{68} = 0$ na Fig. 76 (b)). Vale destacar que a incidência de falta durante regime permanente senoidal, geralmente produz grande variação de impedância e, conseqüentemente, nos sinais trifásicos de tensão e corrente. Por esse motivo, falta durante regime permanente pode ser considerada de fácil detecção pelo algoritmo proposto ALG-B⁷.

Por fim, o cenário de teste descrito anteriormente foi alterado, considerando incrementos de 45° no ângulo de incidência de falta, totalizando oito casos. Todos os resultados obtidos, a partir do relé R_9 e do relé R_6 , foram semelhantes aos resultados apresentados na Fig. 76 e na Fig. 77. Resumidamente: notou-se que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são inferiores ao limite $\Delta\Phi_{lim}$ durante regime permanente senoidal equilibrado, mas esse limite é superado após incidência da falta. Como desejado, as zonas de proteção se mantiveram livres para atuar após a incidência da falta.

6.3.2 Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Considerando a Incidência de Faltas Durante Regime Permanente Senoidal Desequilibrado

Nessa etapa o algoritmo proposto ALG-B é testado considerando que o sistema elétrico opera em regime permanente senoidal, como antes. Porém, aqui é considerada uma condição de desequilíbrio de carga anteriormente a incidência da falta. Esse desequilíbrio é gerado a partir da carga B, que está conectada no barramento 6. A fase C é carregada com 10 % da potência consumida nas fases A e B. Nessas condições é criada uma falta trifásica sólida, na linha de transmissão LT_{96} . A falta incide no instante 0,3479 s, distante 70 % a partir do barramento 9.

As conclusões obtidas na seção anterior, quando investigadas condições de faltas durante regime permanente senoidal equilibrado, também se aplicam aqui. Ou seja, devido

⁷ Ficará evidente logo a frente que os cenários de difícil detecção, incluem faltas que incidem no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico, durante oscilações de potência. Nesses casos são observadas poucas variações nos sinais trifásicos, mesmo após a incidência da falta. Logo, o valor limite $\Delta\Phi_{lim}$ pode não ser superado nessas condições.

a estimação de fasores de sequência negativa \dot{Y}_{a2} de módulos infinitesimais³ e girantes na frequência ω^- , o algoritmo proposto ALG-B retorna $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ inferiores ao limite $\Delta\Phi_{lim}$ durante regime permanente senoidal desequilibrado. Mas, como antes, esse limite é superado na ocorrência de uma falta. A Fig. 78 (a) e (b) ilustra esse resultado, que nesse caso foi obtido a partir dos sinais trifásicos registrados pelo relé R_9 .

Vale destacar que o cenário de teste descrito nessa etapa também foi alterado, considerando incrementos de 45° no ângulo de incidência de falta, totalizando oito casos. Como desejado, todos os resultados obtidos, a partir do relé R_9 e do relé R_6 , foram semelhantes aos resultados apresentados na Fig. 78 (a) e (b).

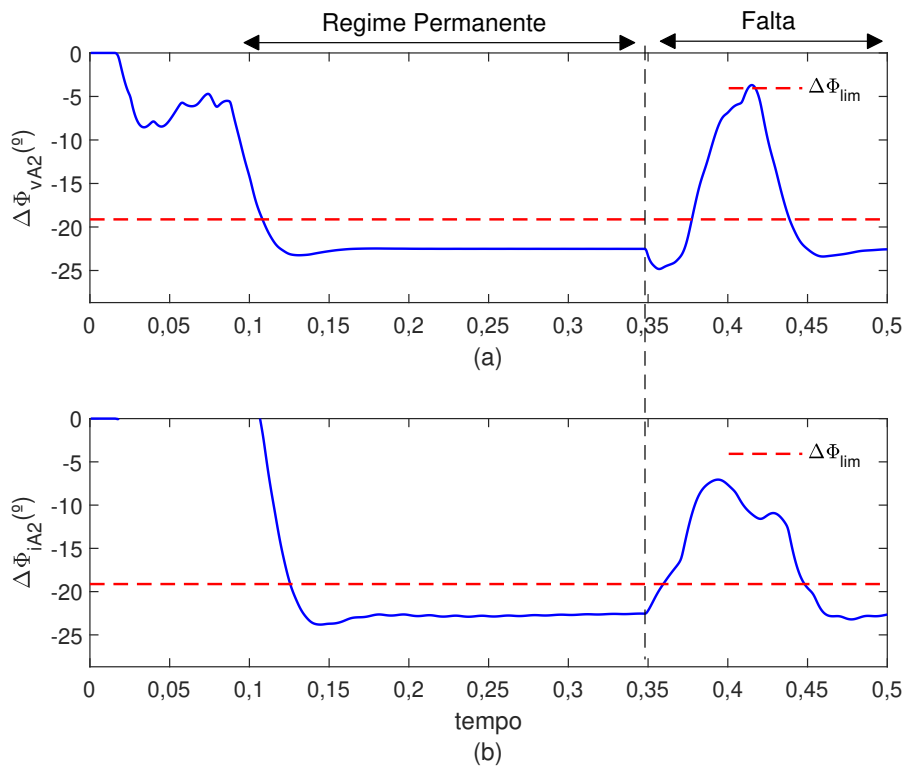


Figura 78 – Anterior à incidência da falta, ocorrida em 0,3479 s, o sistema operava em regime permanente senoidal desequilibrado. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$.

6.3.3 Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Diante de Oscilações de Potência Simétricas e Assimétricas

Nessa subseção serão apresentados os resultados, que foram obtidos a partir dos sinais trifásicos de tensão e corrente, registrados pelo relé R_9 . Embora não estejam apresentados, resultados semelhantes são obtidos a partir do relé R_6 e, por esse motivo, não serão mostrados nessa subseção.

6.3.3.1 Oscilação de Potência Simétrica e Instável

Esse cenário de teste considera que o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência simétrica e instável. É o mesmo cenário já descrito na seção 4.3.1. A Fig. 79 (a) mostra a trajetória da impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 , no plano RX . Na Fig. 79 (b) nota-se que o bloqueio ($ANSI_{68} = 1$) acontece pela primeira vez quando a impedância entra na zona de partida (0,5625 s). Logo em seguida, em 1,068 s, o desbloqueio ($ANSI_{68} = 0$) acontece porque a impedância Z_{AT} deixa a zona de partida Z_p . Como a impedância está girando no plano RX , esse processo se repete mais vezes. Isto é, durante os três intervalos de tempo que a impedância Z_{AT} atravessa a zona de partida Z_p , as zonas de proteção (Z_1 e Z_2) estão bloqueadas, pois $ANSI_{68} = 1$ durante estes intervalos. Já a Fig. 80 (a) e (b) mostra que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são menores que $\Delta\Phi_{lim}$ durante a oscilação de potência, o que justifica os bloqueios realizados corretamente.

Nesse ponto vale destacar a robustez do algoritmo proposto ALG-B. Embora a equação (6.23), que representa o fasor de sequência negativa girante, tenha sido demonstrada considerando f_0 e f_1 como valores fixos de frequências, os resultados obtidos na Fig. 79 e na Fig. 80, mostram que essa equação também é válida mesmo diante de frequências variáveis. Retornando à Fig. 32 (a), apresentada no Capítulo 4, é possível relembrar que as frequências do sistema estão mudando a todo instante durante essa oscilação de potência. Essa observação é também válida para os outros cenários de oscilações de potência que serão utilizados a seguir para avaliar o algoritmo proposto ALG-B.

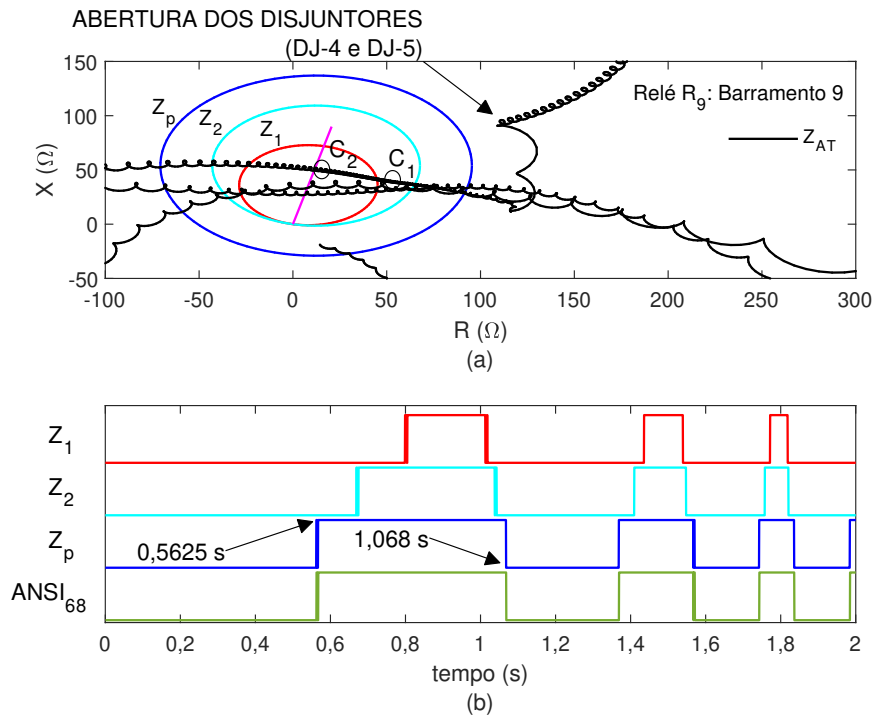


Figura 79 – Oscilação de potência simétrica e instável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . C_1 e C_2 indicam a posição da impedância Z_{AT} em diferentes momentos que serão aplicadas faltas (próxima seção). (b) Análise de eventos.

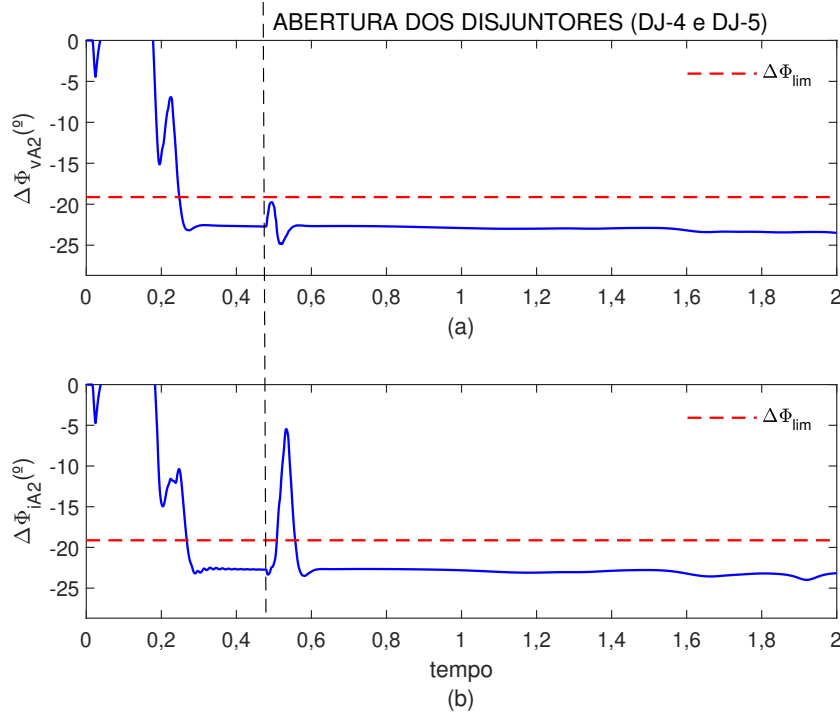


Figura 80 – Oscilação de potência simétrica e instável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$.

6.3.3.2 Oscilação de Potência Simétrica e Estável

Esse cenário de teste considera que o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência simétrica e estável. É o mesmo cenário já apresentado na seção 4.3.2. A análise desse caso é semelhante ao anterior. Observa-se na Fig 81 (a) que a impedância Z_{AT} , vista pelo relé R_9 , entra uma única vez dentro da zona de partida Z_p . Enquanto a impedância está dentro da zona de partida Z_p , o bloqueio acontece ($ANSI_{68} = 1$), conforme Fig. 81 (b). Esse bloqueio é justificado com auxílio da Fig. 82 (a) e (b), onde nota-se que que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são menores que $\Delta\Phi_{lim}$ durante toda a oscilação de potência.

6.3.3.3 Oscilação de Potência Assimétrica e Instável

Esse cenário de teste é o mesmo já descrito na seção 4.3.3. Nesse caso o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência assimétrica e instável. Vale lembrar que a fase A está fora de funcionamento devido à abertura monopolar dos disjuntores $DJ-6$ e $DJ-9$ e, portanto, somente as fases B e C enfrentam uma oscilação de potência. A Fig. 83 (a) mostra a trajetória da impedância Z_{CT} , vista pelo relé R_9 . Observa-se na Fig. 83 (b) que a impedância Z_{CT} atravessa a zona de partida Z_p por quatro vezes enquanto gira no plano RX . Durante o intervalo em que a impedância Z_{CT} está dentro da zona de partida Z_p , as zonas de proteção (Z_1 e Z_2) estão corretamente bloqueadas ($ANSI_{68} = 1$). Isso é justificado através da Fig. 84 (a) e (b), onde é possível verificar novamente que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são menores que $\Delta\Phi_{lim}$ durante toda a oscilação de potência.

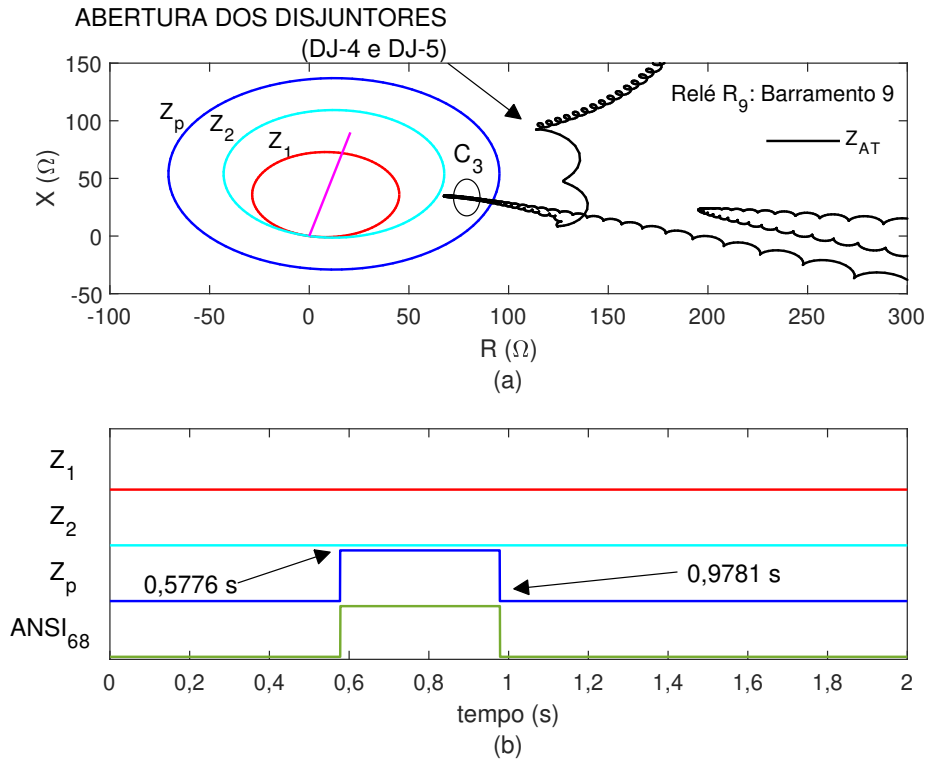


Figura 81 – Oscilação de potência simétrica e estável. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . A variável C_3 indica a posição da impedância Z_{AT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção). (b) Análise de eventos.

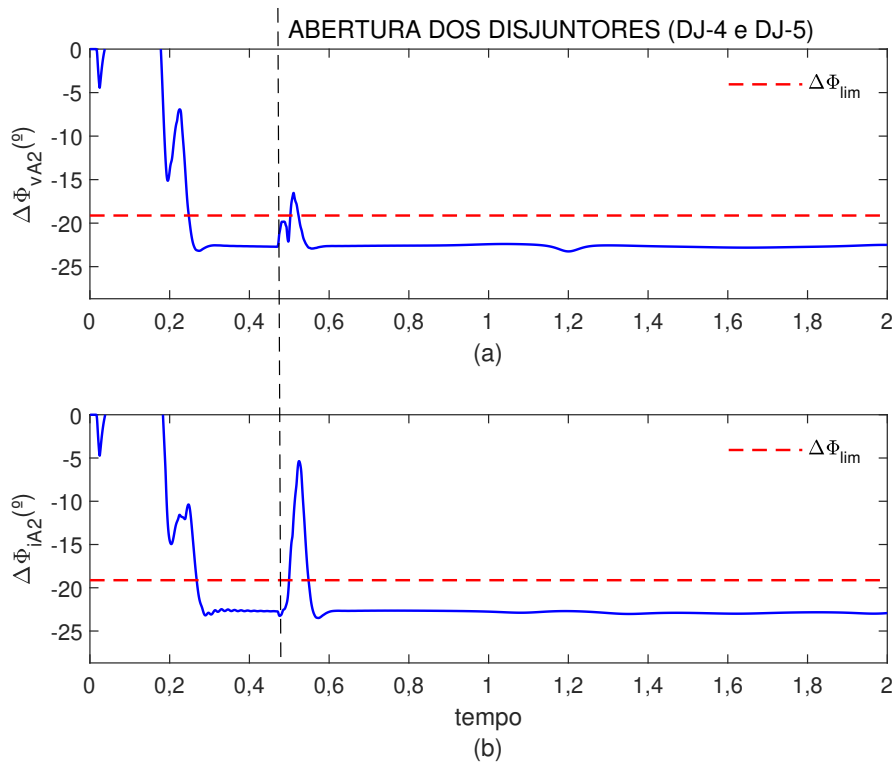


Figura 82 – Oscilação de potência simétrica e estável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$.

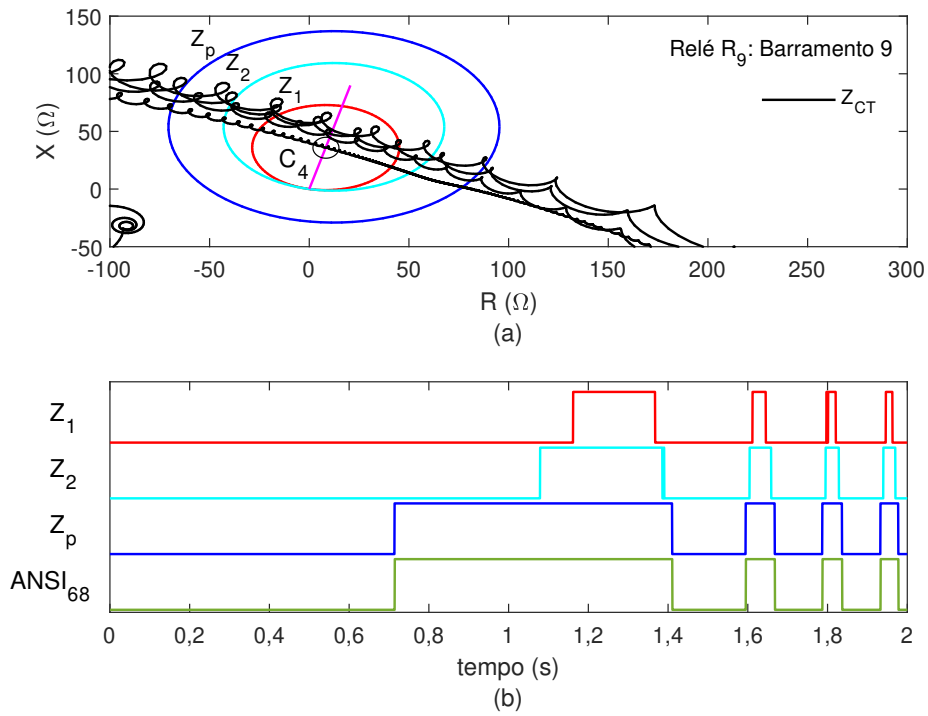


Figura 83 – Oscilação de potência assimétrica e instável. (a) Trajetória da impedância Z_{CT} no plano RX . A variável C_4 indica a posição da impedância Z_{CT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção). (b) Análise de eventos.

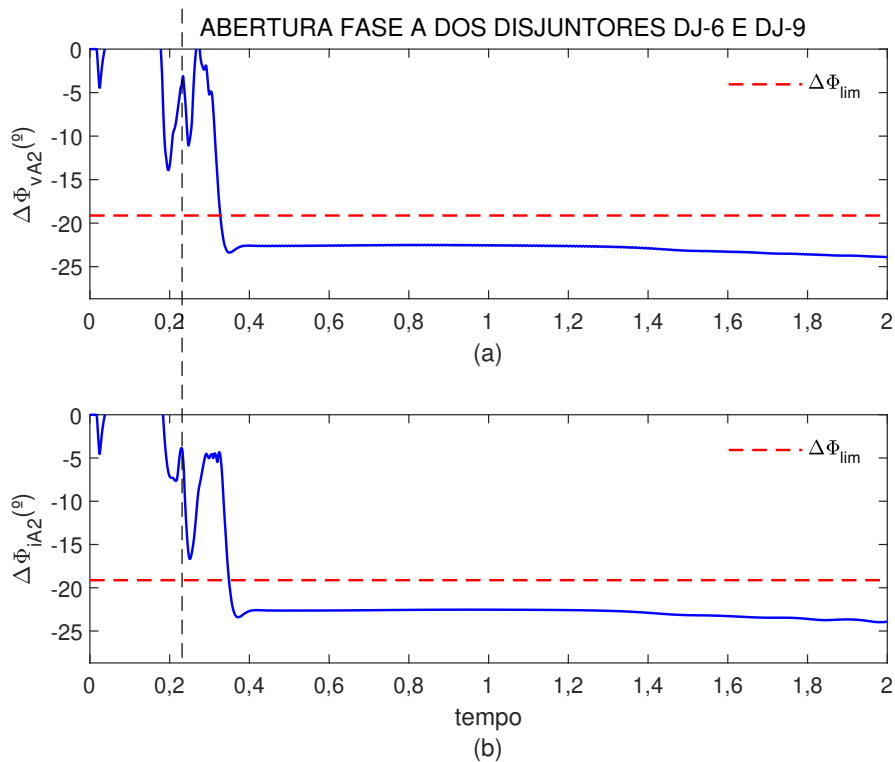


Figura 84 – Oscilação de potência assimétrica e instável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$.

6.3.3.4 Oscilação de Potência Assimétrica e Estável

Por fim, é analisado o cenário de teste em que o sistema elétrico está enfrentando uma oscilação de potência assimétrica e estável. Esse caso foi apresentado na seção 4.3.4. Novamente vale lembrar que a fase A do sistema elétrico está fora de funcionamento e será considerada a impedância Z_{CT} , vista pelo relé R_9 . Observa-se na Fig. 85 (a) que a impedância Z_{CT} entra uma vez na zona de partida Z_p , e enquanto se desloca dentro dessa região, as zonas de proteção (Z_1 e Z_2) são mantidas bloqueadas ($ANSI_{68} = 1$), conforme pode ser verificado na 85 (b). Já a Fig. 86 (c) e (d) mostra que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são menores que $\Delta\Phi_{lim}$ durante toda a oscilação de potência, o que justifica o bloqueio realizado corretamente.

6.3.4 Desempenho dos Algoritmos Diante de Falhas Ocorridas Durante Oscilações de Potência Simétricas

Nessa seção é considerado que o sistema elétrico enfrenta uma oscilação de potência simétrica e durante essa oscilação de potência serão aplicadas diversos tipos de falta.

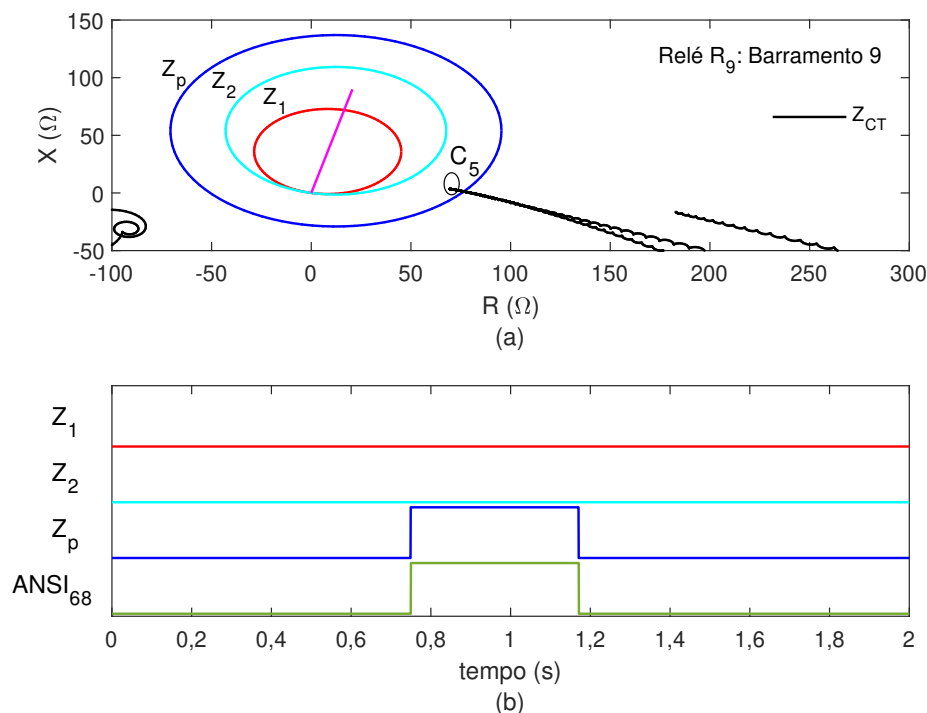


Figura 85 – Oscilação de potência assimétrica e estável. (a) Trajetória da impedância Z_{CT} no plano RX . A variável C_5 indica a posição da impedância Z_{CT} no momento que será aplicada uma falta (próxima seção) (b) Análise de eventos.

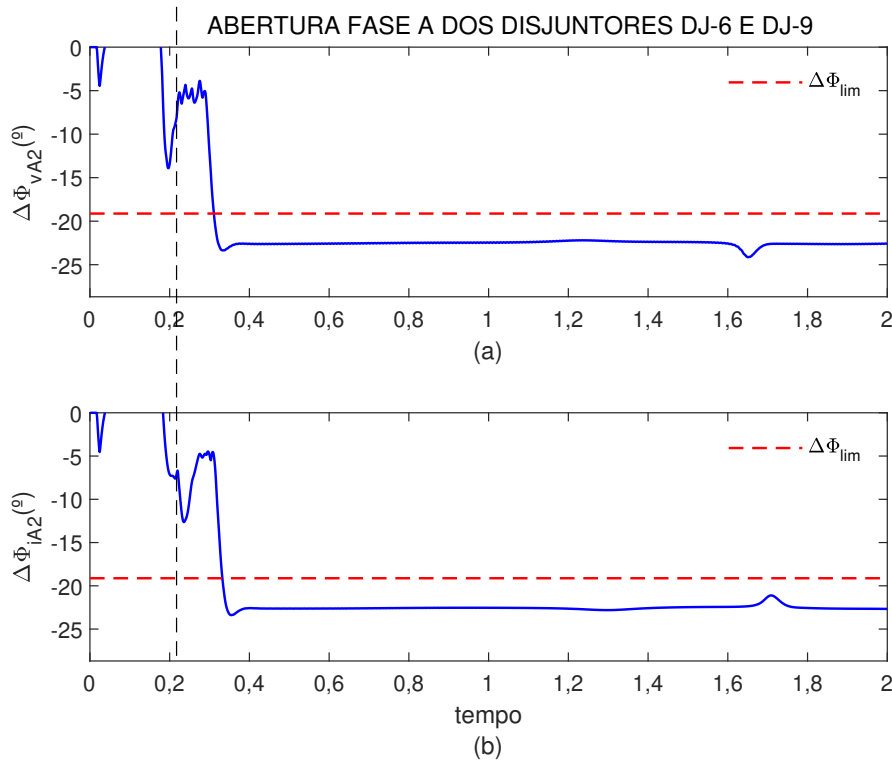


Figura 86 – Oscilação de potência assimétrica e estável. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$.

6.3.4.1 Faltas Durante Oscilações de Potência Simétricas: Relé R_0

Considerando a oscilação de potência simétrica e instável, já ilustrada na Fig. 79 (a), são aplicadas faltas em dois instantes distintos (0,7849 s e 0,9411 s). Esses instantes, correspondem, respectivamente, aos pequenos círculos (C_1 e C_2) indicados na Fig. 79 (a). E esses círculos mostram o local da impedância Z_{AT} , no plano RX , no momento da falta. Já para o caso de oscilação de potência simétrica e estável, mostrado na Fig. 81 (a), são aplicadas faltas no instante de 0,7026 s. Nessa figura, o pequeno círculo C_3 indica a posição da impedância Z_{AT} , no plano RX , no instante da falta. A Tabela 8 apresenta o instante da falta de acordo com a posição da impedância (C_1 , C_2 e C_3), assim como a defasagem angular (δ_L) neste momento. Observa-se na Tabela 8 que são gerados cenários de testes de difícil detecção, com incidência de faltas próximas ao centro elétrico ($\delta_L = 179^\circ$).

Tabela 8 – Local da Impedância no instante da Falta durante oscilações de potência simétricas.

Figura	Oscilação de Potência Simétrica	Círculo	Instante da falta (s)	$\delta_L(^\circ)$
Fig. 79 (a)	Instável	C_1	0,7849	105
Fig. 79 (a)	Instável	C_2	0,9411	179
Fig. 81 (a)	Estável	C_3	0,7026	75

Já na Tabela 9 estão indicados os diversos cenários de testes simulados⁸. Os instantes de falta estão indicados de acordo defasagem angular (δ_L). Como mencionado, são aplicadas faltas durante oscilações de potência simétricas, do tipo estável e instável. São consideradas faltas do tipo assimétricas (AT, AB e ABT) e simétricas (ABC), que incidem em diferentes locais da linha medidos a partir do relé R_9 (10%, 50% e 90%), e com resistências de falta (R_F) de 0 e 50Ω . Além disso, estão apresentados na Tabela 9 os resultados obtidos, onde estão indicados os tempos de detecção de falta calculados pelo algoritmo proposto neste capítulo (ALG-B) e por outros dois algoritmos disponíveis na literatura, ALG-1 e ALG-2, já discutidos no Capítulo 5. Os algoritmos são brevemente apresentados a seguir:

- ALG-B corresponde ao algoritmo proposto neste capítulo, apresentado na Fig. 74;
- ALG-1 corresponde ao algoritmo desenvolvido por Patel et al. (2019) e se baseia na derivada dos sinais trifásicos de tensão;
- ALG-2 corresponde ao algoritmo desenvolvido por Lazaro et al. (2017). Esse algoritmo monitora a assimetria nos sinais trifásicos de corrente por meio do Coeficiente de Assimetria de Fisher (CAF).

Tabela 9 – Avaliação do relé R_9 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.

Cenário de Teste	Oscilação de Potência Simétrica	$\delta_L(^{\circ})$	Local de Falta (%)	Tipo de Falta	Resistência de Falta (Ω)	Função de Desbloqueio / Tempo de Detecção de Falta (ms)		
						ALG-B	ALG-1	ALG-2
1	Estável	75	10	ABT	50*	15,11	2,23	5,21
2	Estável	75	10	ABC	0	17,19	2,40	5,21
3	Estável	75	50	AT	50*	16,67	x	x
4	Estável	75	50	AB	0	14,07	2,82	x
5	Estável	75	90	ABT	0	13,55	12,40	17,19
6	Estável	75	90	ABC	0	13,03	1,65	19,28
7	Instável	105	10	AT	0	16,14	2,35	5,72
8	Instável	105	10	AB	0	15,62	2,10	x
9	Instável	105	50	ABT	50*	14,58	x	x
10	Instável	105	50	ABC	0	15,62	x	x
11	Instável	105	90	AT	50*	15,62	x	x
12	Instável	105	90	AB	0	14,06	11,85	x
13	Instável	179	10	ABT	0	25,02	19,92	13,04
14	Instável	179	10	ABC	0	23,46	5,42	13,04
15	Instável	179	50	AT	0	x	x	x
16	Instável	179	50	AB	0	x	x	x
17	Instável	179	90	ABT	50*	29,71	6,67	x
18	Instável	179	90	ABC	0	38,04	4,25	x

x significa falta não detectada. Fases (ABC). Terra (T)

* Aplicável somente para faltas ABT e AT.

⁸ Os cenários foram selecionados qualitativamente, não sendo apresentadas todas as combinações de testes possíveis. Mas, destaca-se que são contemplados cenários difíceis, que incluem faltas que acontecem no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico (179°) e alta resistência de falta (50Ω).

Para melhor compreensão do princípio de funcionamento do algoritmo proposto ALG-B, considera-se inicialmente o cenário de teste 1 descrito na Tabela 9. Na Fig. 87 (a) estão apresentados os sinais trifásicos de tensão registrados pelo relé R_9 . A Fig. 87 (b) mostra os ângulos de sequência negativa (Φ_{va2}), para um menor intervalo de tempo, destacando dados pré e pós-falta. A Fig. 87 (c) revela a diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{va2}$) e a Fig. 87 (d) é uma representação no plano cartesiano da Fig. 87 (b). Observa-se na Fig. 87 (b) e (d) dois intervalos em destaque: o primeiro intervalo, delimitado por P_1 e P_2 , é definido durante o período da oscilação de potência simétrica e, portanto, faz parte da onda dente de serra na Fig. 87 (b). Na Fig. 87 (d) esse intervalo, P_1 e P_2 , corresponde ao giro do fasor no sentido horário. Já o segundo intervalo, delimitado por P_3 e P_4 , está definido após a incidência da falta e aproxima-se de uma reta horizontal na Fig. 87 (b), indicando que o fasor tende a estacionar, como pode ser notado na Fig. 87 (d). Logo, nota-se na Fig. 87 (c) que $\Delta\Phi_{va2}$ é um valor constante e inferior a $\Delta\Phi_{lim}$ durante a oscilação de potência, e $\Delta\Phi_{va2}$ supera $\Delta\Phi_{lim}$, tendendo a zero, após o início da falta. Esse resultado mostra que o algoritmo proposto ALG-B realizou corretamente o desbloqueio das zonas de proteção. Embora não esteja apresentado, é observado um comportamento semelhante para $\Delta\Phi_{iA2}$, calculado a partir dos sinais trifásicos de corrente.

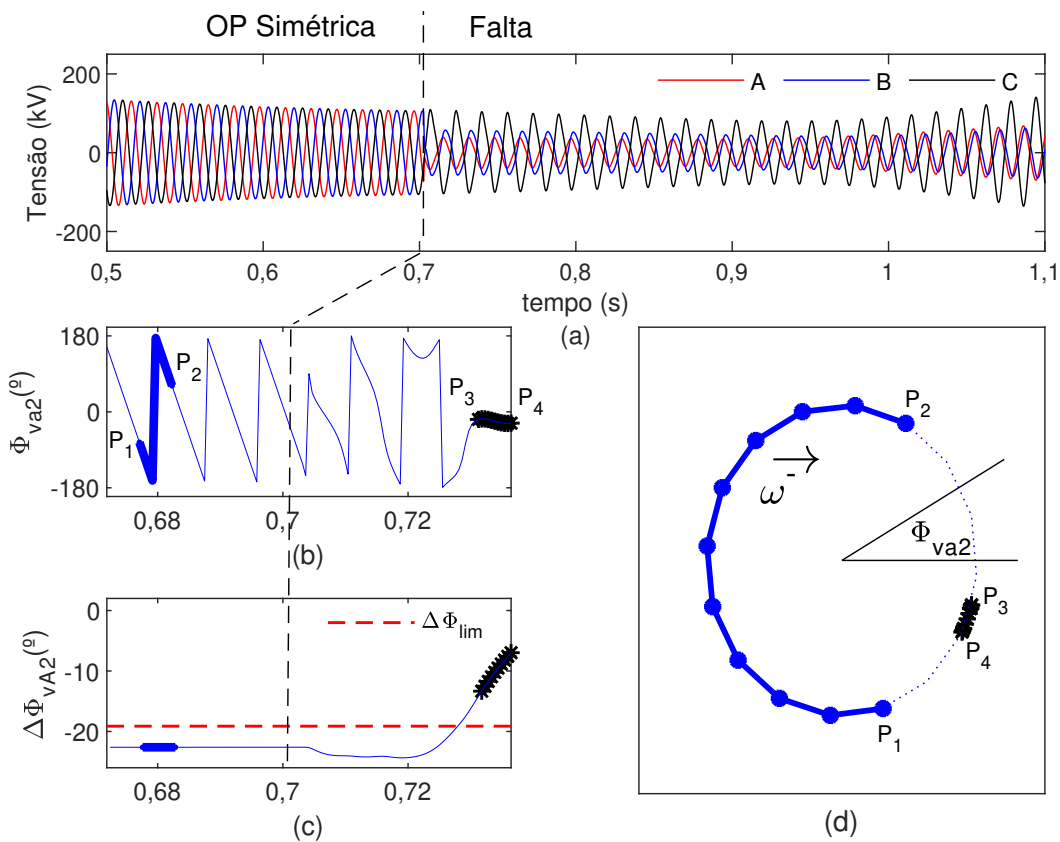


Figura 87 – Cenário de teste 1. (a) Sinais Trifásicos de tensão. (b) Ângulo do fasor de sequência negativa (Φ_{va2}). (c) Diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{va2}$). (d) Fasor girante durante oscilações de potência (entre P_1 e P_2), e fasor estacionário após a falta (entre P_3 e P_4).

Para este mesmo caso (cenário de teste 1), é mostrado na Fig. 88 (a) a trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . Já a Fig. 88 (b) mostra a sequência de eventos correspondente. Nessa figura estão indicados três instantes (0,5776 s, 0,7026 s e 0,7177 s), que correspondem, respectivamente, ao bloqueio por detecção de oscilação de potência, falta durante oscilação de potência e desbloqueio por falta detectada. Observa-se na Fig. 88 (b) que após a falta, Z_{AT} entra em Z_2 e Z_1 , nessa ordem, que estão livres para atuar, uma vez que o desbloqueio já havia acontecido, quando $ANSI_{68}$ pulou de 1 para 0 no instante 0,7177 s. Por fim, vale destacar que tempo de detecção da falta pelo algoritmo proposto ALG-B foi de 15,11 ms, conforme pode ser verificado na Tabela 9.

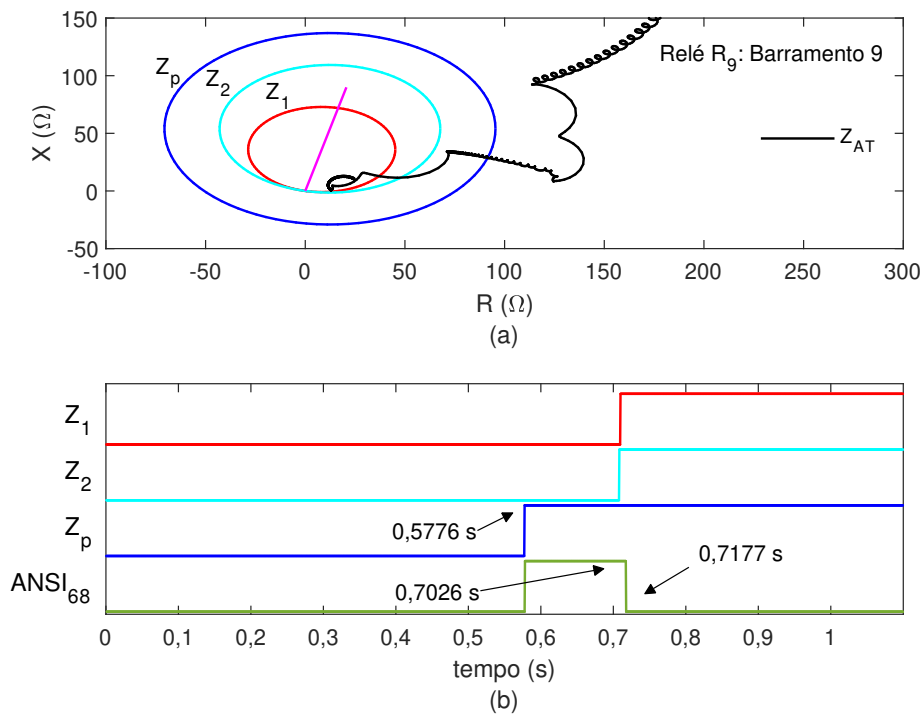


Figura 88 – Cenário de teste 1. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência no instante de 0,7177 s.

Ainda observando na Tabela 9 os resultados para o cenário de teste 1, nota-se que os algoritmos ALG-1 e ALG-2 também foram eficientes diante desse caso, inclusive com atuação mais rápida, detectando a falta com tempo de atuação de 2,23 e 5,21 ms, respectivamente. Mas, esse bom desempenho não é sempre confirmado. Por exemplo, o cenário de teste 3, que é rapidamente detectável pelo algoritmo proposto ALG-B, não é detectado pelos algoritmos ALG-1 e ALG-2. O desempenho do algoritmo proposto ALG-B é mostrado na Fig. 89 para esse caso. Observa-se que existe um transitório inicial, que é gerado pela abertura dos disjuntores $DJ-4$ e $DJ-5$, mas em seguida $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ se estabilizam e tornam-se inferiores a $\Delta\Phi_{lim}$, como esperado para condições de oscilações de potência simétricas (OPS). Logo depois, no instante que a falta incide, $\Delta\Phi_{lim}$ é superado

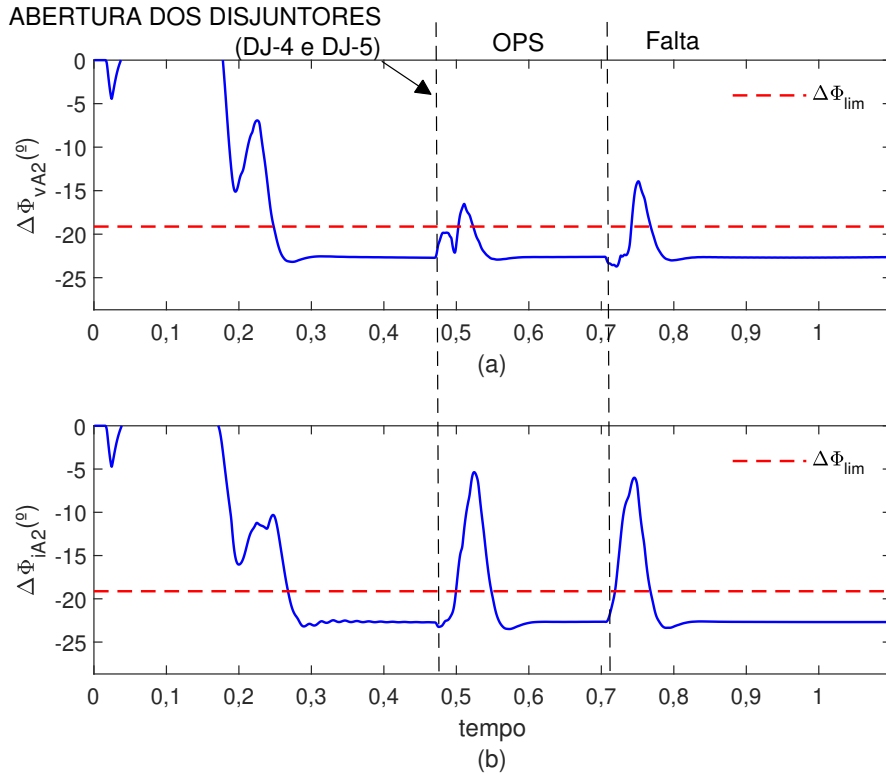


Figura 89 – Cenário de teste 3. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência.

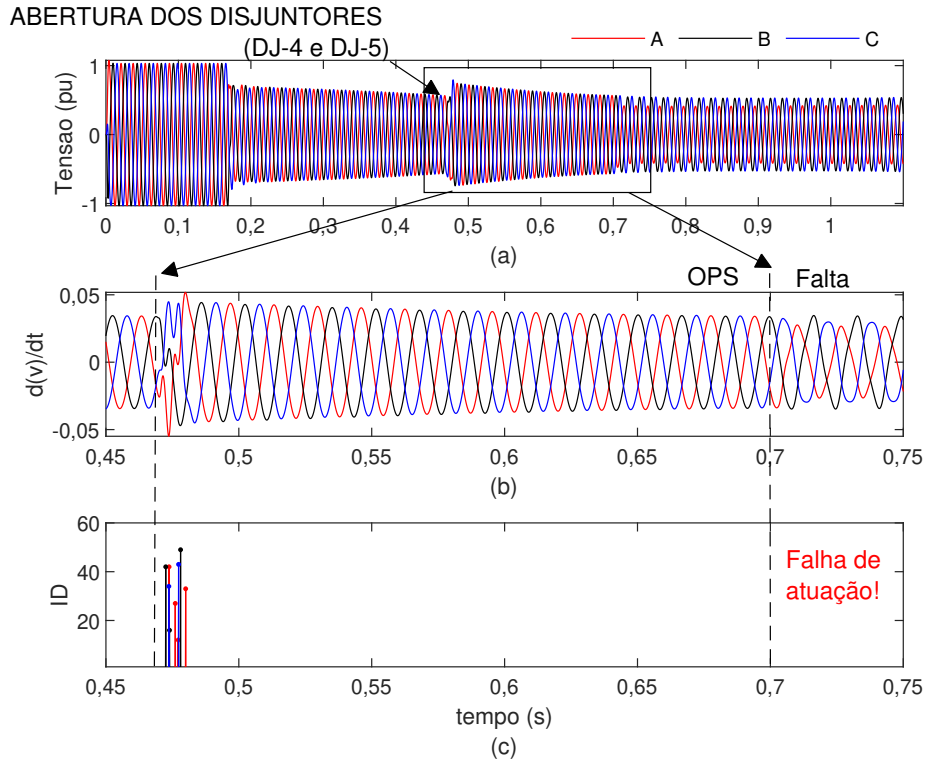


Figura 90 – Cenário de teste 3. Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Derivada dos sinais trifásicos de Tensão. (c) Índice de detecção de falta. Falta não detectada (Falha de atuação).

por $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$, detectando a ocorrência da falta durante a oscilação de potência. O tempo de atuação do algoritmo proposto ALG-B foi de 16,67 ms, conforme pode ser consultado na Tabela 9. Já a Fig. 90 mostra que o algoritmo ALG-1 não detecta a falta para este caso (cenário de teste 3). Aqui a falha de atuação se deve à inexistência de distorções nos sinais trifásicos de tensão após a incidência da falta, conforme em destaque na Fig. 90 (b). Por fim, é mostrado na Fig. 91 que o algoritmo ALG-2 também falha para este teste. Pode ser observado na Fig. 91 (a) uma leve assimetria ocorrida na fase A após a incidência da falta, que é insuficiente para que o limite CAF seja superado, conforme mostrado na Fig. 91 (b).

O cenário de teste 15, descrito na Tabela 9, é outro caso interessante. Esse é um cenário de teste difícil, que considera a incidência da falta no meio da linha, no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico ($\delta_L = 179^\circ$). Nessas condições a impedância pré-falta é aproximadamente igual a impedância pós-falta. Detalhadamente: durante a oscilação de potência a impedância se desloca em direção a linha de transmissão. Quando está próxima ao meio da linha ($\delta_L = 179^\circ$), incide uma falta no meio da linha (50%). Então, o valor da impedância praticamente não se altera após a falta. O plano RX , apresentado na Fig. 92 (a), ilustra essa discussão.

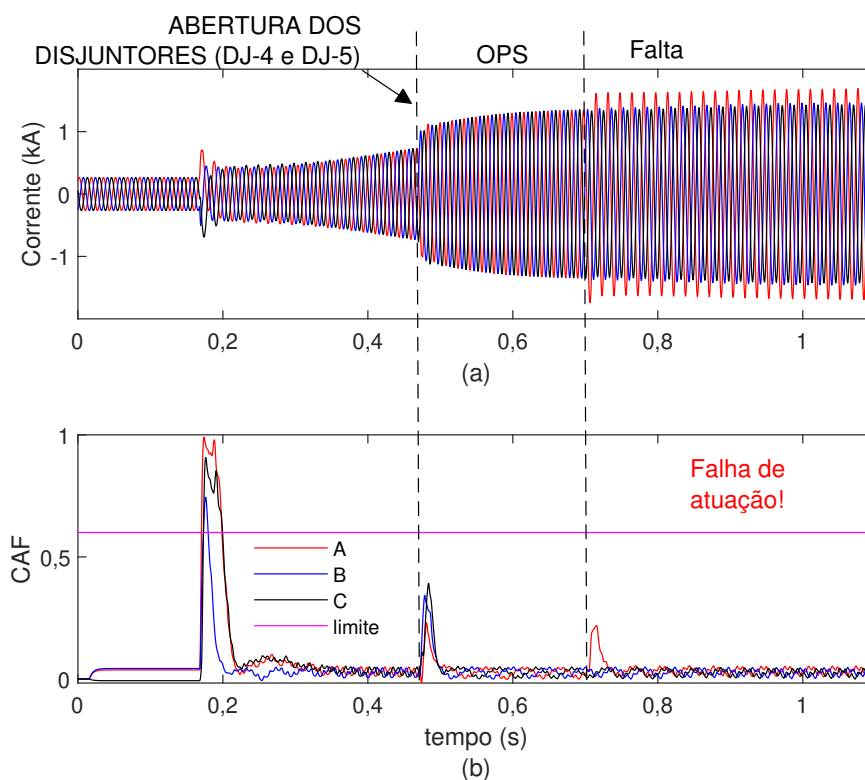


Figura 91 – Cenário de teste 3. Algoritmo baseado na assimetria dos sinais de corrente (ALG-2): (a) Sinais trifásicos de corrente. (b) Coeficiente de Assimetria de Fisher (CAF). Falta não detectada (Falha de atuação).

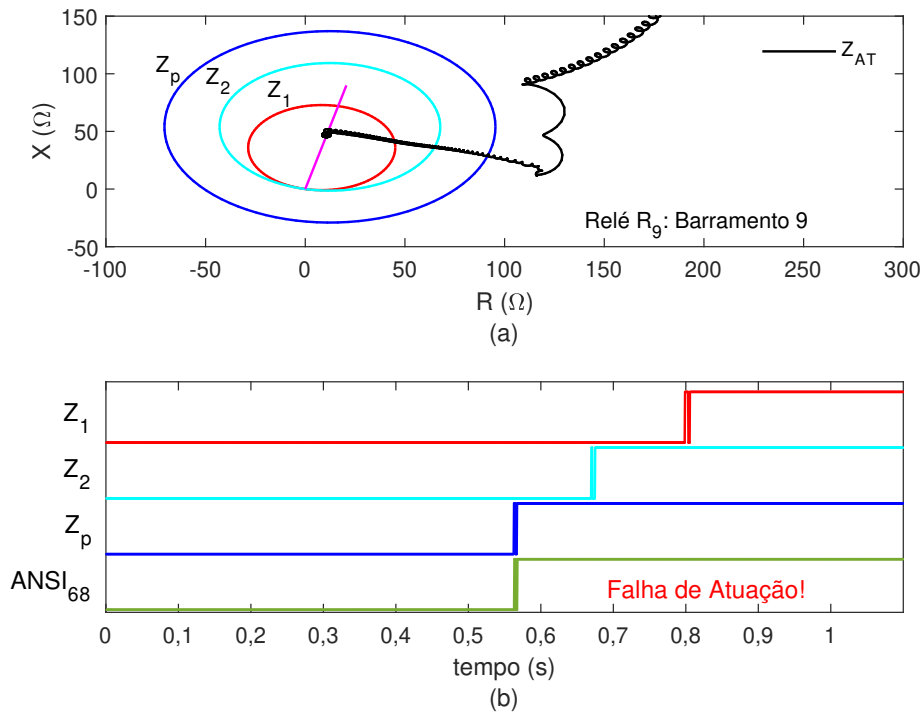


Figura 92 – Cenário de teste 15. (a) Trajetória da impedância Z_{AT} no plano RX . (b) Análise de eventos. Falha não detectada (Falha de atuação).

Um efeito importante que acontece nesses casos pode ser observado na Fig. 93, onde notam-se poucas variações nos sinais trifásicos após a incidência da falta, o que justifica a falha de atuação do algoritmo proposto ALG-B. A Fig. 94 mostra o desempenho do algoritmo proposto ALG-B, onde nota-se que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ não superam $\Delta\Phi_{lim}$ após a incidência da falta. Pode ser observado na Fig. 92 (b) que $ANSI_{68}$ se mantém em nível lógico 1, mesmo após a incidência da falta. Nesse ponto, cabe informar que a falha do algoritmo proposto ALG-B, diante de outro cenário de teste (caso 16 descrito na Tabela 9), também se deve a mesma razão (condições pré e pós-falta muito semelhantes).

Consultando na Tabela 9 outros cenários que consideram a incidência de faltas no momento que a impedância está próxima ao centro elétrico, como 13, 14, 17 e 18, nota-se que algoritmo proposto ALG-B atuou corretamente. Nesses casos, como a falta incide no início ou fim da linha (10% ou 90%), existe uma variação entre as impedâncias pré e pós-falta, uma vez que a impedância pré-falta é aproximadamente igual a impedância medida no meio da linha (50%). Consequentemente, são geradas variações suficientes nos sinais trifásicos após a falta, o que justifica a atuação correta do algoritmo proposto ALG-B nesses casos.

Ainda analisando o desempenho do algoritmo proposto ALG-B, porém diante de todos os cenários de testes descritos na Tabela 9, observa-se sua rapidez de atuação, que foi capaz de detectar faltas, para a maioria dos teste, com tempo inferior a 2 ciclos (33,33 ms).

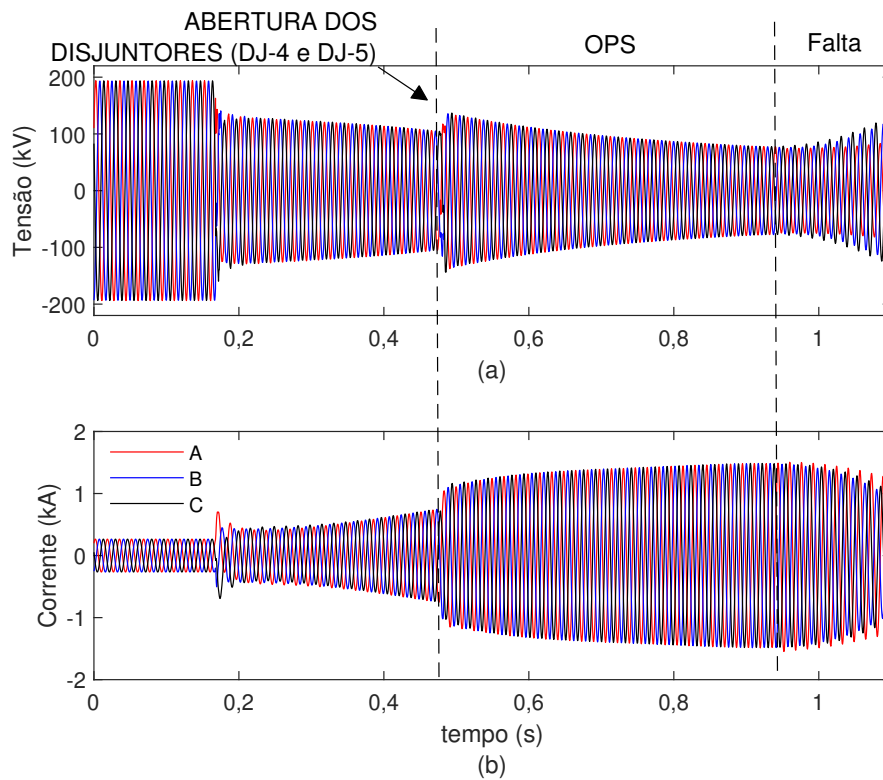


Figura 93 – Cenário de teste 15. Relé R_9 . (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente.

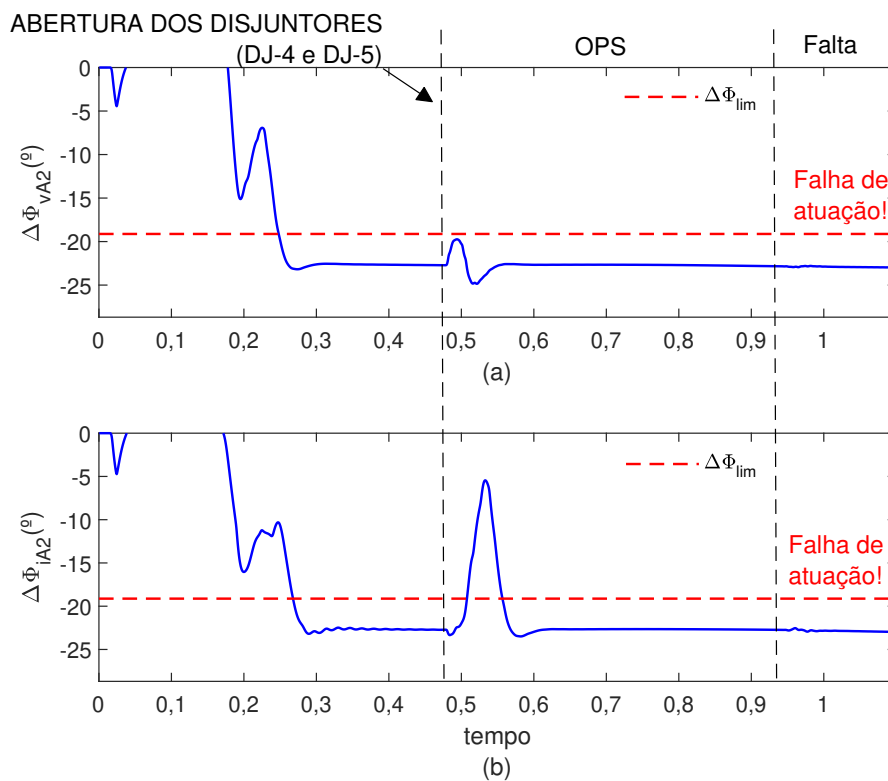


Figura 94 – Cenário de teste 15. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Falta não detectada (Falha de atuação).

Claramente não incluem os cenários 15 e 16, que o algoritmo proposto ALG-B falhou, e o cenário de teste 18, onde o algoritmo proposto ALG-B atuou com 38,04 ms. Já comparando o desempenho com os outros algoritmos, verifica-se que o algoritmo proposto ALG-B falhou apenas 2 vezes, enquanto os algoritmos ALG-1 e ALG-2 falharam, respectivamente, 6 e 11 vezes. Esses resultados evidenciam a segurança do algoritmo proposto ALG-B, que se demonstrou capaz de detectar faltas durante oscilações de potência simétricas, realizando o desbloqueio das zonas de proteção diante da maioria dos testes, obtendo um desempenho superior a dois algoritmos disponíveis na literatura técnica.

6.3.4.2 Faltas Durante Oscilações de Potência Simétricas: Relé R_6

Nessa seção são considerados os mesmos cenários de testes já apresentados na Tabela 9. Porém, os algoritmos são avaliados diante dos sinais trifásicos registrados pelo relé R_6 . A Tabela 10 apresenta os cenários de teste (confira a nota de rodapé 8) e os tempos de atuação realizados pelos algoritmos ALG-B, ALG-1 e ALG-2. De imediato já observa-se na Tabela 10 que o algoritmo proposto ALG-B detectou a falta corretamente para todos os testes realizados, inclusive diante dos casos 15 e 16, que havia falhado quando implementado no relé R_9 . Então, o cenário de teste 15 é um caso interessante a ser analisado aqui. A Fig. 95 mostra os sinais trifásicos de tensão e corrente registrados pelo relé R_6 para esse caso. Observa-se novamente que os sinais não sofrem grandes variações após a falta. No entanto, a Fig. 96 (a) mostra que as leves alterações nos sinais de tensão foram suficientes para $\Delta\Phi_{vA2}$ superar $\Delta\Phi_{lim}$ após o início da falta. Conforme Fig. 96 (b), neste caso não houve a detecção da falta a partir dos sinais de corrente. Esse caso evidencia

Tabela 10 – Avaliação do relé R_6 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência simétricas.

Cenário de Teste	Oscilação de Potência Simétrica	$\delta_L(^{\circ})$	Local de Falta (%)	Tipo de Falta	Resistência de Falta (Ω)	Função de Desbloqueio / Tempo de Detecção de Falta (ms)		
						ALG-B	ALG-1	ALG-2
1	Estável	75	90	ABT	50*	7,82	2,40	x
2	Estável	75	90	ABC	0	8,86	2,40	18,23
3	Estável	75	50	AT	50*	8,86	4,82	x
4	Estável	75	50	AB	0	7,30	3,90	x
5	Estável	75	10	ABT	0	7,30	2,57	9,90
6	Estável	75	10	ABC	0	22,92	2,07	9,90
7	Instável	105	90	AT	0	8,33	2,35	x
8	Instável	105	90	AB	0	7,29	2,18	x
9	Instável	105	50	ABT	50*	7,29	4,02	x
10	Instável	105	50	ABC	0	6,77	2,18	x
11	Instável	105	10	AT	50*	9,37	6,10	x
12	Instável	105	10	AB	0	7,81	5,60	x
13	Instável	179	90	ABT	0	15,65	6,67	x
14	Instável	179	90	ABC	0	13,04	5,42	x
15	Instável	179	50	AT	0	16,69	x	x
16	Instável	179	50	AB	0	16,69	x	x
17	Instável	179	10	ABT	50*	25,54	7,33	x
18	Instável	179	10	ABC	0	23,98	5,50	x

x significa falta não detectada. Fases (ABC). Terra (T)

* Aplicável somente para faltas ABT e AT.

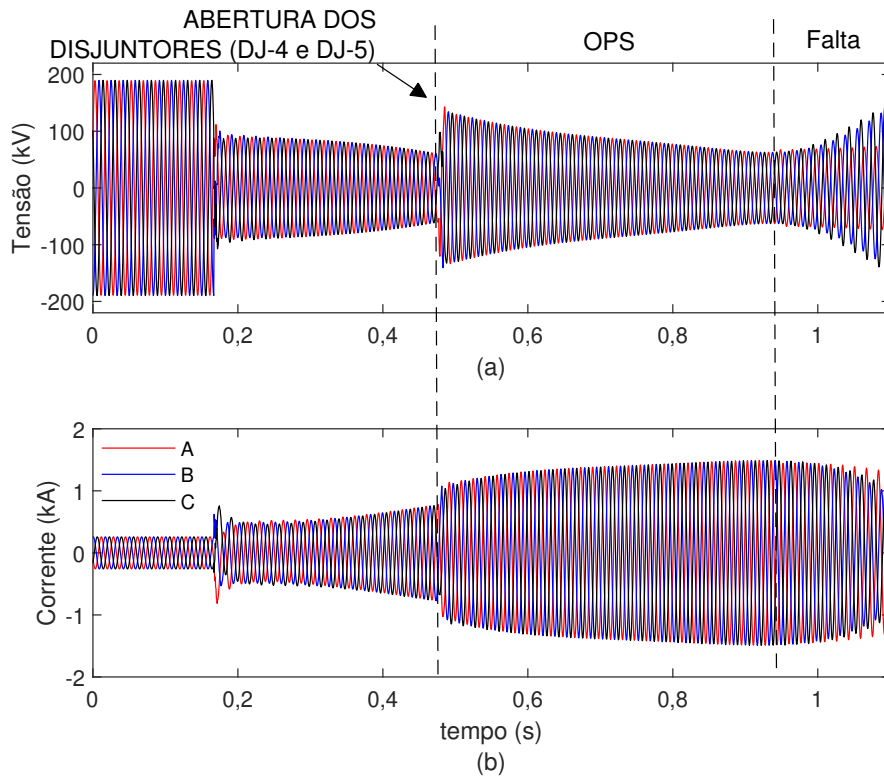


Figura 95 – Cenário de teste 15. Relé R_6 . (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente.

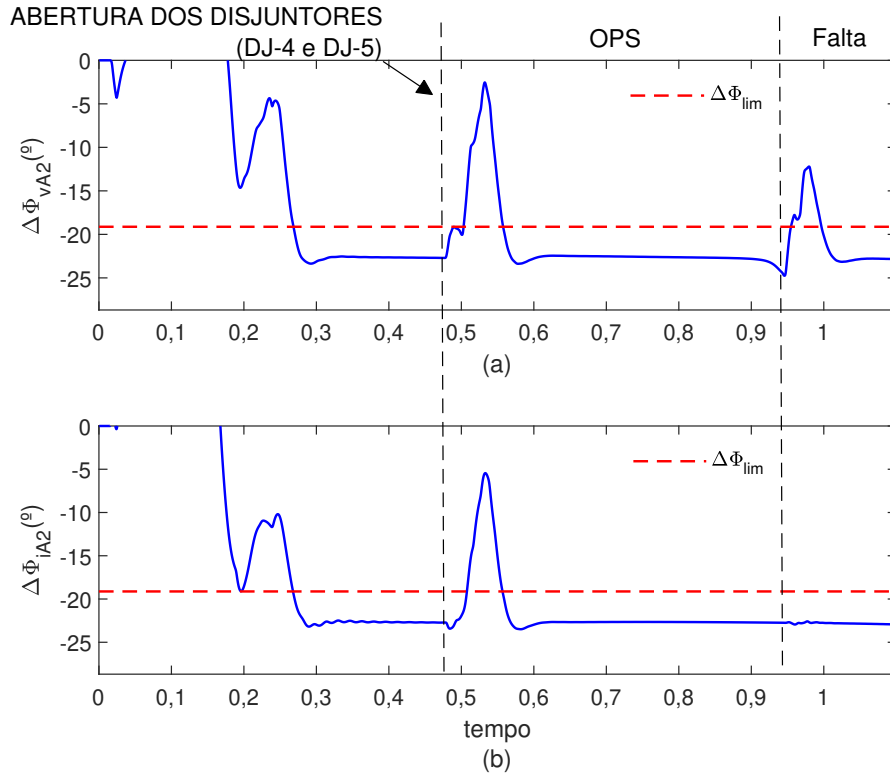


Figura 96 – Cenário de teste 15. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência.

que superar $\Delta\Phi_{lim}$ por apenas uma unidade ($\Delta\Phi_{vA2}$ ou $\Delta\Phi_{iA2}$) é suficiente para detectar a falta. A Tabela 10 mostra que o tempo de atuação do relé R_6 foi de 16,69 ms para este teste.

Ainda observando a Tabela 10, nota-se que o algoritmo ALG-1 falhou novamente diante dos casos 15 e 16, e que o algoritmo ALG-2 não apresentou bom desempenho, detectando faltas somente em 3 testes. No entanto, vale destacar que o algoritmo proposto ALG-B atuou corretamente, com tempo inferior a 2 ciclos (33,33 ms), diante de todos os cenários de testes, mostrando novamente ser um método seguro para desbloquear as zonas de proteção na ocorrência de faltas durante oscilações de potência simétricas.

6.3.5 Desempenho do Algoritmo Proposto ALG-B Diante de Faltas Ocorridas Durante Oscilações de Potência Assimétricas

Uma vez confirmada a efetividade do algoritmo proposto ALG-B, diante de faltas ocorridas durante oscilações de potência simétricas, nessa etapa o algoritmo é validado diante de faltas ocorridas durante oscilações de potência assimétricas. Vale citar que as faltas são aplicadas durante as condições de oscilações de potência assimétricas já estudadas e apresentadas na Fig. 83 e na Fig. 85. Deve ser lembrado que a fase *A* está desligada devido à abertura monopolar dos disjuntores e, portanto, somente as fases *B* e *C* enfrentam uma oscilação de potência. Dessa maneira, é escolhida a fase *C* para ser analisada. Na Fig. 83 é possível ver a trajetória da impedância Z_{CT} durante a oscilação de potência assimétrica e instável. Quando a impedância Z_{CT} alcança o ponto indicado pelo círculo C_4 , são aplicadas as faltas. Já a Fig. 85 mostra a trajetória da impedância Z_{CT} durante a oscilação de potência assimétrica e estável. Nesse caso, a posição da impedância Z_{CT} no momento da falta é indicado pelo círculo C_5 . A Tabela 11 apresenta a relação entre o instante de falta, a posição da impedância (C_4 e C_5) e a defasagem angular δ_L .

Tabela 11 – Local da Impedância no instante da Falta durante oscilações de potência assimétricas.

Figura	Oscilação de Potência Assimétrica	Círculo	Instante da falta (s)	$\delta_L(^{\circ})$
Fig. 83 (a)	Instável	C_4	1,305	180
Fig. 85 (a)	Estável	C_5	0,749	60

Assim, são gerados diversos tipos de faltas durante as condições de oscilações de potência assimétricas previamente citadas. Conforme apresentado na Tabela 12, os cenários de teste simulados⁹ consideram faltas do tipo assimétricas (BC, BCT e CT) e

⁹ Os cenários foram selecionados qualitativamente, não sendo apresentadas todas as combinações de testes possíveis. Mas, destaca-se que são contemplados cenários difíceis, que incluem faltas que acontecem no momento que a impedância está no centro elétrico (180°) e alta resistência de falta (50Ω).

com resistências de falta (R_F) de 0 e 50 Ω . A posição da impedância Z_{CT} é indicada por δ_L e as faltas incidem a 10%, 50% e 90% da linha de transmissão, medidos a partir do relé R_9 . Na Tabela 12 também estão apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo proposto ALG-B, calculados a partir dos sinais trifásicos registrados pelo relé R_9 e relé R_6 .

Analisando a Tabela 12, nota-se que foi diante do cenário de teste 10 a única falha do algoritmo proposto ALG-B, que nesse caso foi ocorrida no relé R_9 . As explicações para essa falha não detectada são as mesmas já mencionadas: condições pós-falta muito semelhantes as condições pré-falta, como acontece em cenários de testes que consideram incidências de faltas próximas ao centro elétrico. É mostrado na Fig. 97 que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ não superam $\Delta\Phi_{lim}$ após a falta, o que exemplifica a falha de atuação. Ainda analisando o cenário de teste 10, porém considerando o algoritmo proposto ALG-B implementado no relé R_6 , observa-se na Fig. 98 que a falta foi detectada, pois $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ superam $\Delta\Phi_{lim}$ após sua incidência. Embora não estejam apresentados, pode-se dizer, resumidamente, que as poucas variações ocorridas nos sinais trifásicos, registrados no barramento 6, foram suficientes para fazer o relé R_6 detectar a falta nesse caso.

Por fim, uma análise geral da Tabela 12 revela que o algoritmo proposto ALG-B atuou corretamente para todos os demais testes realizados, detectando a falta com um tempo inferior a 33,33 ms (2 ciclos), tanto pelo relé R_9 quanto pelo relé R_6 . Esses resultados destacam que o algoritmo proposto ALG-B é seguro e rápido para detectar faltas durante oscilações de potência assimétricas. Os algoritmos ALG-1 e ALG-2 não são avaliados nessa etapa, pois, conforme proposto por Patel et al. (2019) e Lazaro et al. (2017), esses algoritmos são desenvolvidos apenas no contexto de oscilações de potência simétricas.

Tabela 12 – Avaliação do relé R_9 e R_6 . Cenários de testes e resultados: faltas durante oscilações de potência assimétricas.

Cenário de Teste	Oscilação de Potência Assimétrica	$\delta_L(^{\circ})$	Local de Falta (%)	Tipo de Falta	Resistência de Falta (Ω)	Função de Desbloqueio / Tempo de Detecção de Falta (ms)	
						ALG-B: R_9	ALG-B: R_6
1	Estável	60	10	CT	50*	17,15	8,81
2	Estável	60	10	BC	0	6,73	10,38
3	Estável	60	50	BCT	0	16,63	24,44
4	Estável	60	50	CT	50*	16,63	9,33
5	Estável	60	90	BC	0	9,33	23,40
6	Estável	60	90	BCT	0	12,46	24,96
7	Instável	180	10	CT	50*	11,15	6,98
8	Instável	180	10	BC	0	17,40	23,13
9	Instável	180	50	BCT	50*	9,06	23,13
10	Instável	180	50	CT	0	x	22,60
11	Instável	180	90	BC	0	8,54	17,40
12	Instável	180	90	BCT	50*	8,54	17,40

x significa falta não detectada. Fases (ABC). Terra (T)

* Aplicável somente para faltas BCT e CT.

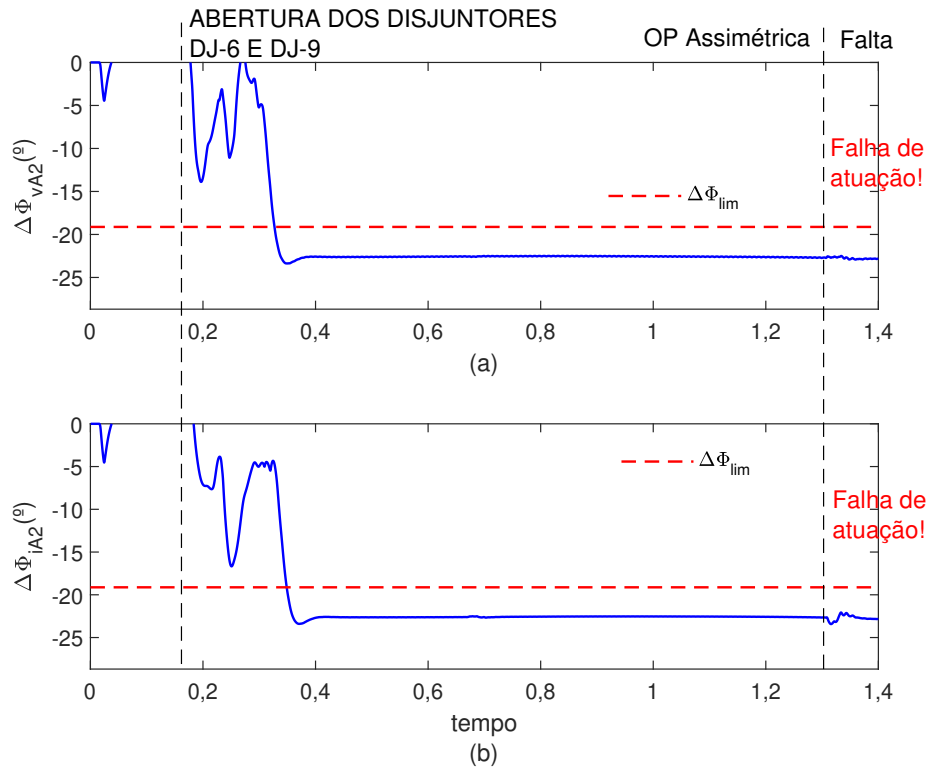


Figura 97 – Cenário de teste 10. Relé R_9 . Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Falta não detectada (Falha de atuação).

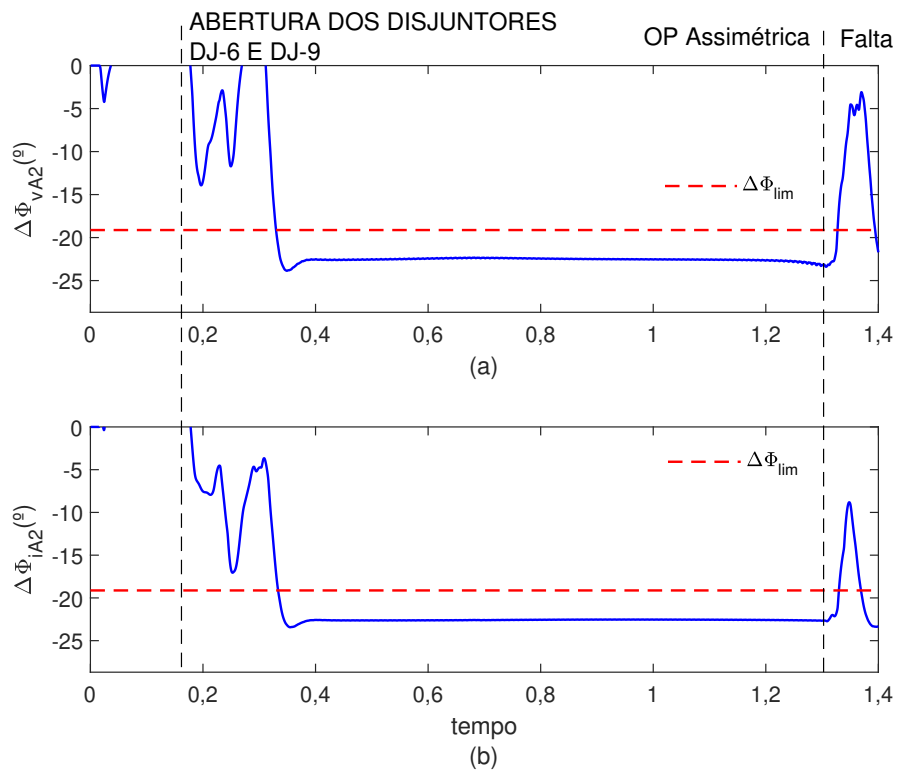


Figura 98 – Cenário de teste 10. Relé R_6 . Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Desbloqueio por detecção de falta durante oscilação de potência.

6.3.6 Análise do Algoritmo Proposto ALG-B sob Condições de Ruído, Harmônicas e Diferentes Frequências de Amostragem

Um vez avaliado o desempenho do algoritmo proposto ALG-B, diante de vários cenários de testes que incluem oscilações de potência e faltas durante oscilações de potência, nessa etapa o algoritmo proposto ALG-B é analisado na presença de ruídos, harmônicas e diferentes frequências de amostragem.

6.3.6.1 Ruídos e Harmônicas

É conhecido que sinais trifásicos, contaminados por ruídos ou harmônicas, contém distorções na sua forma de onda. Essas distorções podem influenciar na precisão da estimação fasorial e, conseqüentemente, causar mau funcionamento do sistema de proteção. De forma específica, a contaminação por ruído ou harmônicas, pode levar a atuação incorreta da função de desbloqueio, que pode detectar como falta uma condição de oscilação de potência. Então, é interesse avaliar o algoritmo proposto ALG-B nessas condições.

Buscando inicialmente avaliar o desempenho do algoritmo proposto ALG-B na presença de ruídos, é definido a seguir como é gerado o sinal de ruído $y_x^r(k)$, sendo

$$y_x^r(k) = \frac{X(k)}{100} y_x(k) \quad (6.34)$$

onde,

- k representa o instante de tempo discreto;
- x representa as fases A , B ou C ;
- $y_x(k)$ representa os sinais trifásicos, sendo que y assume v para tensão ou i para corrente;
- X é uma variável aleatória que tem distribuição gaussiana. Sua notação é dada por $X \sim (\mu; \sigma^2)$, sendo que μ e σ^2 representam, respectivamente, a média e a variância da distribuição;
- por fim, a divisão por 100 é necessária para que a amplitude do sinal de ruído $y_x^r(k)$ seja aproximadamente 1% da amplitude do sinal $y_x(k)$.

Na verdade, segundo a IEEE Std-1159TM (2019), que discursa sobre recomendações práticas no monitoramento de energia, diz que o sinal de ruído $y_x^r(k)$ é tipicamente menor do que 1% da amplitude do sinal $y_x(k)$. Assim, para gerar um sinal de ruído de alta

intensidade, tem-se utilizada uma distribuição gaussiana dada por $X \sim N(0; 0, 9^2)$. Para ilustrar, é considerado inicialmente a condição de oscilação de potência simétrica e estável, já apresentada na seção 4.3.2. Na Fig. 99 (a) está apresentado o sinal de tensão $v_c(k)$, registrado pelo relé R_6 . A Fig. 99 (b) mostra o sinal de ruído $v_c^r(k)$, calculado conforme (6.34) e $X \sim N(0; 0, 9^2)$. Na Fig. 99 (c) tem-se o sinal contaminado, dado por $v_c(k) + v_c^r(k)$. Embora na Fig. 99 (c) não seja possível visualizar os grandes efeitos provenientes da adição do sinal de ruído, a relação sinal-ruído (SNR)¹⁰ torna-se altamente perceptível quando calculada em decibel (dB). Assim, é mostrado na Fig. 99 (d) a relação sinal-ruído (SNR) obtida a partir do sinal contaminado mostrado na Fig. 99 (c). Observa-se na Fig. 99 (d) que o valor de SNR oscila ao redor de um valor constante, de aproximadamente 41 dB. Esse resultado mostra que o sinal contaminado possui altos índices de ruído. Segundo Djuric e Djuric (2008), os sinais registrados nos sistemas elétricos de potência possuem relação sinal-ruído (SNR) entre 50 e 70 dB.

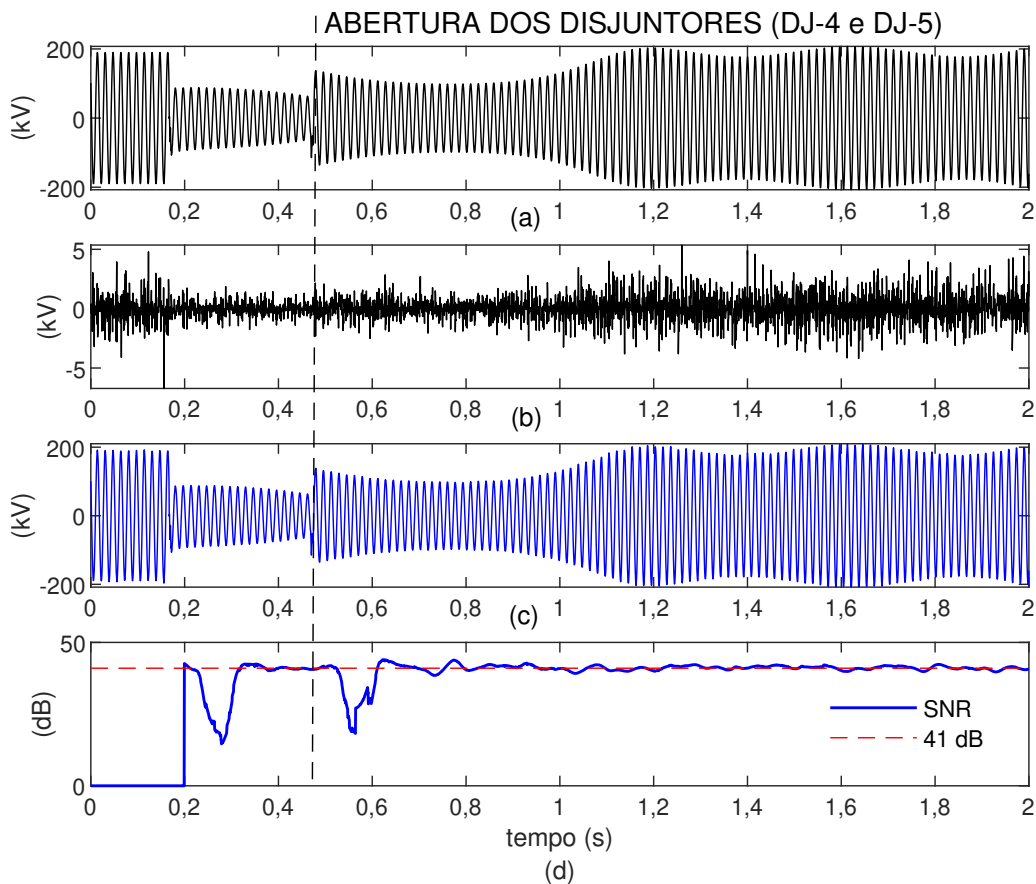


Figura 99 – Oscilação de potência simétrica e estável. (a) Sinal de tensão $V_c(k)$. (b) Sinal de ruído $V_c^r(k)$. (c) Sinal contaminado $V_c(k) + V_c^r(k)$. (d) Relação sinal-ruído (SNR).

Vale destacar que o valor de SNR apresentado na Fig. 99 (d) pode ser verificado analiticamente. Para isso, deve-se adotar uma simplificação e considerar que a variável X

¹⁰ A abreviatura SNR, para relação sinal-ruído, vem do inglês *signal-to-noise ratio*.

tenha desvio padrão constante ($\sigma = 0,9$) e, então, a relação sinal-ruído (SNR) expressa em decibel (dB), pode ser calculada como

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{Y_{RMS}}{Y_{RMS}^r} \right) \quad (6.35)$$

Onde

- Y_{RMS} é o valor RMS do sinal instantâneo $y_x(k)$;
- Y_{RMS}^r é o valor RMS do sinal de ruído $y_x^r(k)$;

Sendo que Y_{RMS}^r , calculado a partir de (6.34), é

$$Y_{RMS}^r = \frac{\sigma}{100} Y_{RMS} = \frac{0,9}{100} Y_{RMS} \quad (6.36)$$

Substituindo (6.36) em (6.35), obtém-se SNR igual à 40,91 dB (SNR \approx 41 dB conforme obtido na Fig. 99 (d)). Esse resultado mostra que o método de contaminação por ruído foi corretamente realizado. Nesse ponto vale destacar que todo esse processo de contaminação por ruído é realizado considerando dados subamostrados, portanto, diante de uma $f_s = 1920$ Hz (32 pontos por ciclo da fundamental de 60 Hz).

Uma vez adicionado o ruído aos sinais trifásicos de tensão e corrente, o algoritmo proposto ALG-B é avaliado. Os resultados estão apresentados na Fig. 100 para o cenário de teste anteriormente citado (oscilação de potência simétrica e estável), onde é mostrado que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são inferiores a $\Delta\Phi_{lim}$ durante toda a oscilação de potência, evidenciando a confiabilidade do algoritmo proposto ALG-B, que não gerou desbloqueios, apresentado um desempenho adequado mesmo na presença de ruídos (SNR \approx 41 dB).

Outro interessante cenário de teste é o caso de oscilação de potência assimétrica e estável, já discutido na seção 4.3.4. Os resultados obtidos, a partir dos sinais registrados pelo R_6 e diante das mesmas condições de ruído (SNR \approx 41 dB), estão apresentados na Fig. 101. Observa-se que o algoritmo proposto ALG-B não se manteve confiável para este teste, realizando alguns desbloqueios indevidamente durante a oscilação de potência. Mas isso pode ser explicado através da Fig. 102. Observa-se na Fig. 102 (a) o sinal de tensão $v_c(k)$. Na Fig. 102 (b) um destaque é dado entre 0,8 e 0,9 s, onde podem ser observadas distorções devido a presença de harmônicos. Na Fig. 102 (c) é mostrado que a distorção harmônica total (Thd)¹¹ desse sinal é extremamente elevada, sendo superior a 5% praticamente durante todo o período de oscilação de potência. Esse resultado justifica a atuação indevida do algoritmo proposto ALG-B nesse caso, que é testado diante de um sinal contaminado simultaneamente por altos índices de ruídos (adicionados intencionalmente) e harmônicas (ocorrência em consequência da oscilação de potência).

¹¹ A abreviatura Thd, para distorção harmônica total, vem do inglês *total harmonic distortion*.

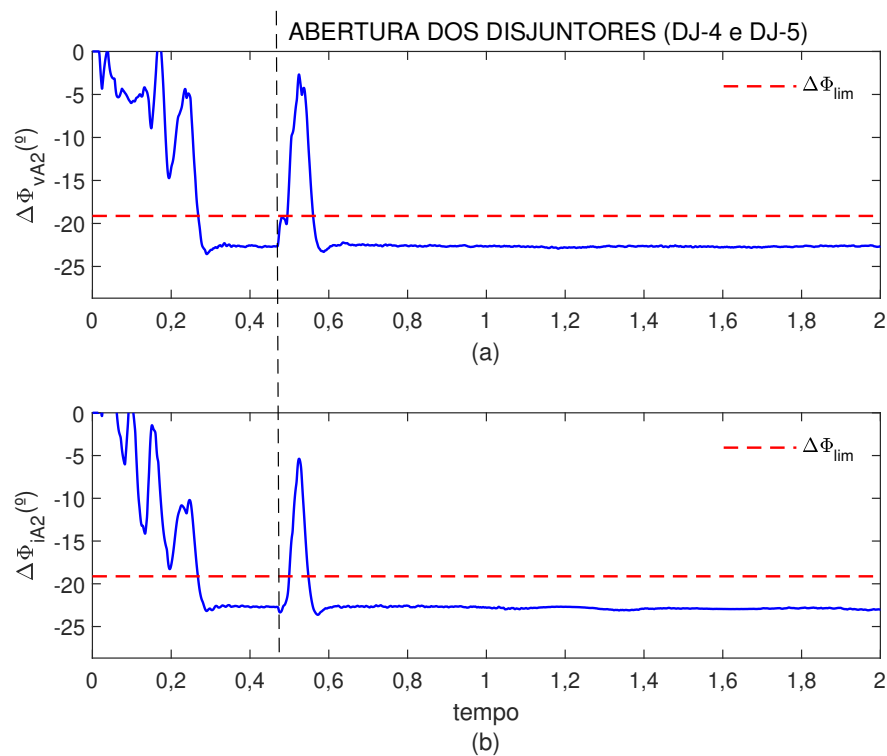


Figura 100 – Oscilação de potência simétrica e estável na presença de ruído (SNR \approx 41 dB). Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Atuação confiável do algoritmo proposto ALG-B.

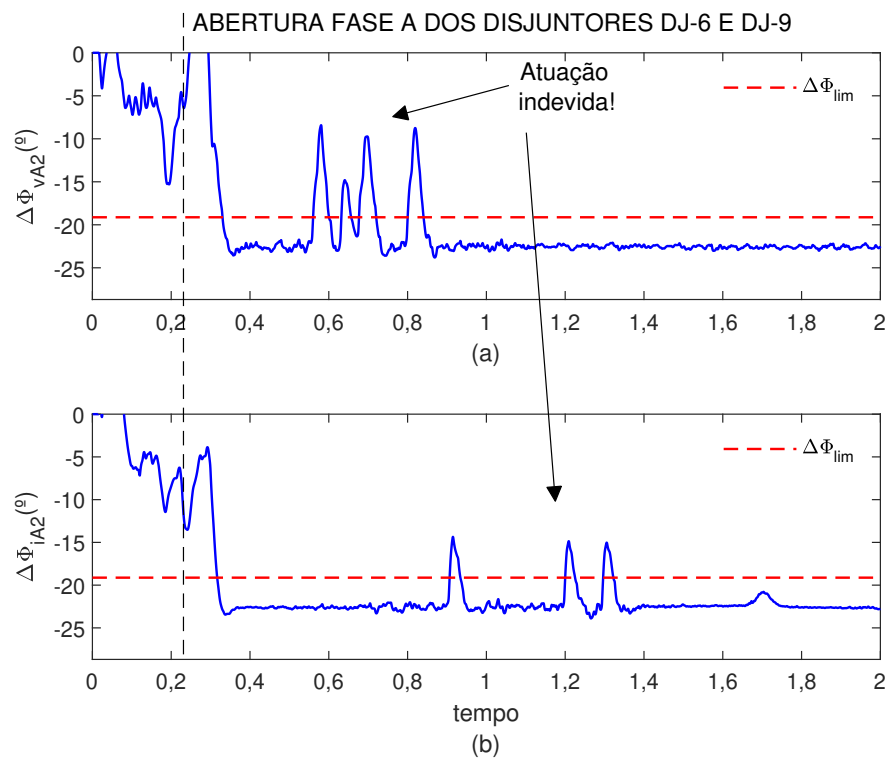


Figura 101 – Oscilação de potência assimétrica e estável na presença de harmônicas e ruído (SNR \approx 41 dB). Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Atuação indevida do algoritmo proposto ALG-B.

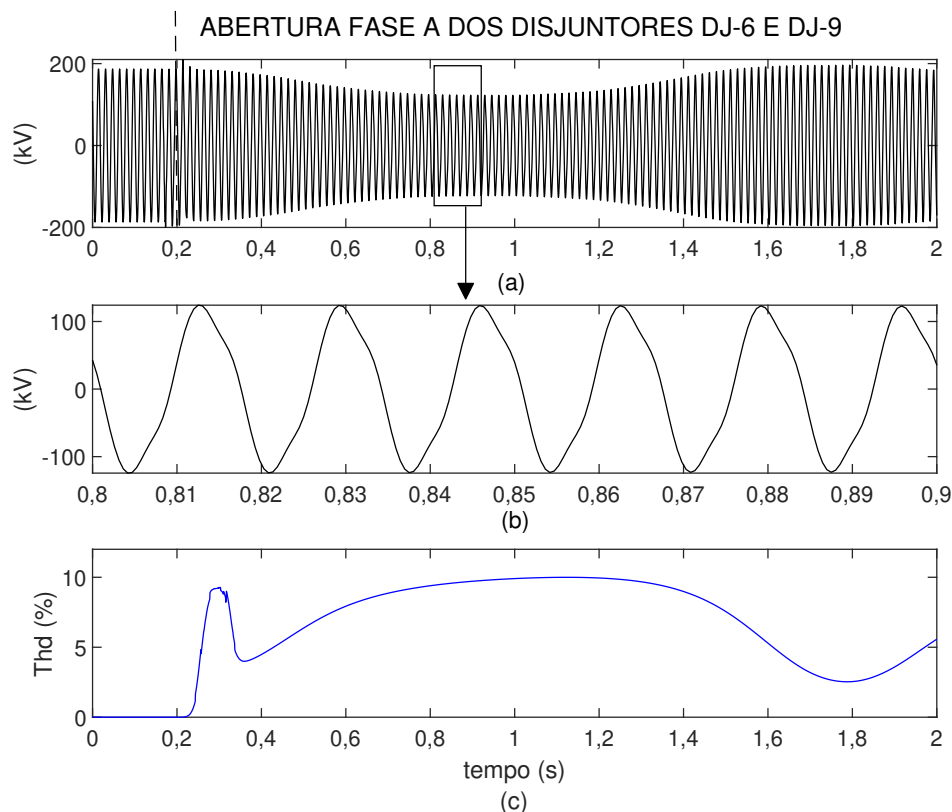


Figura 102 – Oscilação de potência assimétrica e estável na presença de harmônicas e ruído ($\text{SNR} \approx 41$ dB). (a) Sinal de tensão $V_c(k)$. (b) Destaque no intervalo entre 0,8 e 1 s. (c) Distorção harmônica total (Thd).

No entanto, deve ressaltar que, mesmo na presença de altos índices de Thd, porém considerando condições menos severas de ruído, o algoritmo proposto ALG-B tem apresentado bom desempenho. Então pode-se assim resumir o desempenho do algoritmo proposto ALG-B:

- durante oscilações de potência assimétricas, onde são observados altos índices de Thd, o algoritmo proposto ALG-B tem se mostrado eficiente considerando sinais impregnados por ruídos com SNR de até 49 dB;
- durante oscilações de potência simétricas, o algoritmo proposto ALG-B tem apresentado bom desempenho considerando alta intensidade de contaminação por ruído (SNR de até 41 dB). Embora não estejam apresentados, os baixos níveis de Thd, próximos a 0%, observados durante oscilações de potência simétricas, justificam a maior tolerância a ruídos nesses casos.

Dessa maneira, vale destacar que os altos índices de contaminação por Thd e ruído (superior a situação mais crítica de SNR de 50 dB, conforme citado por [Djuric e Djuric \(2008\)](#)), evidenciam a robustez do algoritmo proposto ALG-B, que se demonstrou imune diante dessas condições.

6.3.6.2 Diferentes Frequências de amostragem

Uma vez validado o desempenho do algoritmo proposto ALG-B na presença de ruídos e harmônicas, todos os testes apresentados neste capítulo foram repetidos. Porém, agora foram consideradas diferentes frequências de amostragem comumente utilizadas por relés de proteção (1920, 2880 e 3840 Hz). Verificou-se que o algoritmo proposto ALG-B se manteve confiável e seguro como antes, podendo citar que:

- durante os casos de oscilações de potência não realizou desbloqueios indevidos;
- obteve rápida atuação na ocorrência de faltas durante oscilações de potência, com tempos de detecção similares aos apresentados nas Tabelas 9, 10 e 12 (inferiores a dois ciclos).

Como o algoritmo proposto ALG-B se demonstrou imune a diferentes frequências de amostragem, nesse ponto é interessante ilustrar a relação entre $\Delta\Phi_{lim}$ e a frequência de amostragem utilizada. Para isso, o caso 1 descrito na Tabela 9 é escolhido. Ele está impregnado por ruído neste exemplo ($SNR \approx 41$ dB) e é considerada a frequência de amostragem de 3840 Hz ($N_a = 64$). Observa-se na Fig. 103 que $\Delta\Phi_{lim} = -9,5625^\circ$ nesse caso. Esse resultado pode verificado de acordo com as equações (6.32) e (6.33). Além disso, observa-se que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ são inferiores a $\Delta\Phi_{lim}$ durante a oscilação de potência simétrica. Mas, como desejado, $\Delta\Phi_{lim}$ é rapidamente superado após a incidência da falta.

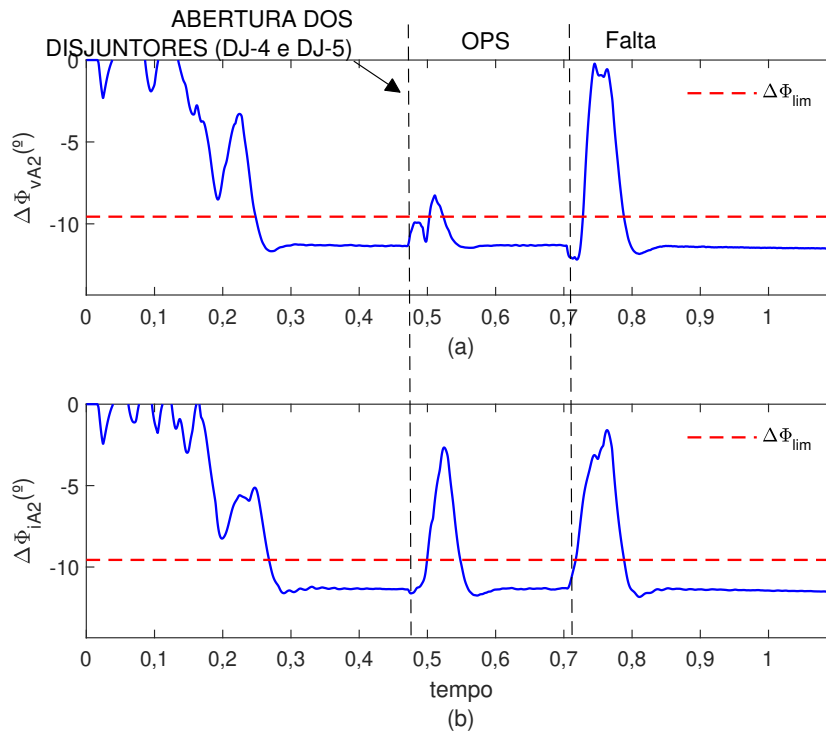


Figura 103 – Cenário de teste 1. Diferença entre dois ângulos consecutivos: (a) $\Delta\Phi_{vA2}$ e (b) $\Delta\Phi_{iA2}$. Destaque para $\Delta\Phi_{lim} = -9,5625^\circ$ ($f_s = 3840$ Hz).

6.4 Resultados: Casos Reais de Oscilações de Potência.

Uma vez validado o desempenho do algoritmo proposto ALG-B, diante de cenários de testes obtidos via software de simulação, nessa etapa o algoritmo proposto ALG-B é avaliado diante de oscilografias obtidas a partir de casos reais de oscilações de potência. Também é realizada uma análise comparativa do algoritmo proposto ALG-B com o algoritmo proposto no Capítulo 5 (ALG-A), e com os algoritmos ALG-1 e ALG-2, já apresentados neste estudo.

Vale destacar que as oscilografias apresentadas nessa seção são obtidas a partir de arquivos COMTRADE. Três arquivos COMTRADE foram registrados em diferentes anos, por relés de proteção instalados em barramentos distintos do Sistema Elétrico Brasileiro. Assim, não há qualquer relação entre essas oscilografias. Um arquivo COMTRADE foi registrado no Sistema elétrico dos Estados Unidos. É importante mencionar que os casos 1 e 2 possuem frequência de amostragem de 1440 Hz ($N_a = 24$). Enquanto os casos 3 e 4 possuem frequência de amostragem de 3840 Hz ($N_a = 64$). O algoritmo proposto ALG-B será testado considerando essas frequências de amostragem, conforme cada caso, o que evidenciará novamente que o algoritmo proposto ALG-B independe da frequência de amostragem utilizada pelo relé de proteção.

O caso 1 de oscilação de potência real está apresentado na Fig. 104. É conhecido que essa oscilação de potência é decorrente de um religamento (fechamento em anel do sistema elétrico). Observando a Fig. 104 (a) e (b) nota-se que após o fechamento em anel há variações lentas nos sinais trifásicos de tensão e corrente (flutuações). O efeito dessas variações pode ser observado na Fig. 104 (e), que mostra o deslocamento das impedâncias (Z_{AT} , Z_{BT} , Z_{CT}) nos loops de terra. Observa-se nessa figura que trata-se de uma oscilação de potência estável, porque as impedâncias se deslocam em direção ao sistema elétrico mas retornam para um ponto de operação externo as zonas de proteção. Nota-se também na Fig. 104 (e) que trata-se de uma oscilação de potência simétrica, com impedâncias aproximadamente iguais entre si ($Z_{AT} \approx Z_{BT} \approx Z_{CT}$).¹² Analisando agora o desempenho do algoritmo proposto ALG-B, nota-se na Fig. 104 (e) e (f) que a impedância não entra na zona de partida Z_p e, por isso, não acontece corretamente o bloqueio por oscilação de potência ($ANSI_{68} = 0$). Mas, verifica-se na Fig 104 (c) e (d) que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ se mantêm inferiores a $\Delta\Phi_{lim}$ após o fechamento em anel, como esperado para condições de oscilações de potência. Isso mostra que o bloqueio aconteceria numa eventual entrada da impedância na zona de partida Z_p , o que evidencia a confiabilidade do algoritmo proposto ALG-B.

Da mesma forma, o caso 2, apresentado na Fig. 105, também corresponde a

¹² Diferentemente dos casos simulados, onde foi mostrado impedâncias iguais entre si durante oscilações de potência simétricas ($Z_{AT} = Z_{BT} = Z_{CT}$), o estudo de casos reais tem revelado essa característica de aproximação ($Z_{AT} \approx Z_{BT} \approx Z_{CT}$), que é devido ao não perfeito equilíbrio entre os sinais trifásicos.

uma oscilação de potência real simétrica e estável. Na Fig. 105 (e) pode ser notado que as impedâncias são aproximadamente iguais ($Z_{AT} \approx Z_{BT} \approx Z_{CT}$) e que, durante essa oscilação de potência, entram na zona de partida Z_p , por um curto intervalo de tempo, mas em seguida retornam e saem Z_p . Já na Fig. 105 (a) e (b), observa-se variações lentas nos sinais trifásicos de tensão e corrente, como esperado para essas condições. É conhecido que, durante essa oscilação de potência, aconteceram pelo menos 13 atuações indevidas da proteção de distância, desligando diversas linhas de transmissão do sistema elétrico (rejeição de carga). Um efeito dessas rejeições de cargas pode ser observado na Fig. 105 (e), onde são mostradas algumas mudanças de direção na trajetória da impedância. Já a Fig. 105 (c) e (d) mostra que $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ não superam $\Delta\Phi_{lim}$, o que evidencia a confiabilidade do algoritmo proposto ALG-B, mesmo havendo situação crítica de rejeições de cargas durante essa oscilação de potência. Na Fig. 105 (f) também é possível ver que a impedância entra, e logo em seguida deixa a zona de partida Z_p durante a oscilação de potência. Nesse curto intervalo de tempo o bloqueio acontece corretamente ($ANSI_{68} = 1$).

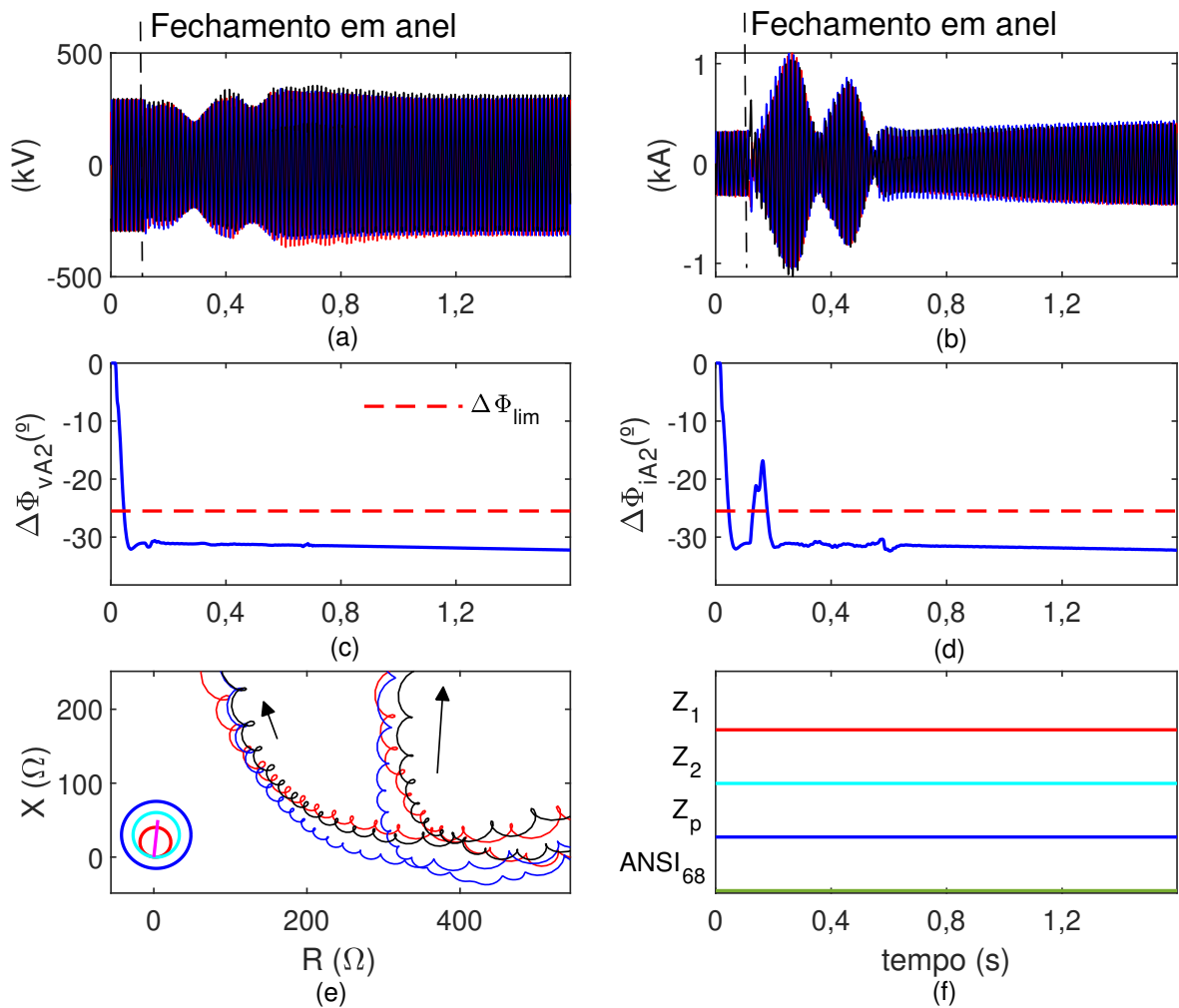


Figura 104 – Caso 1 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.

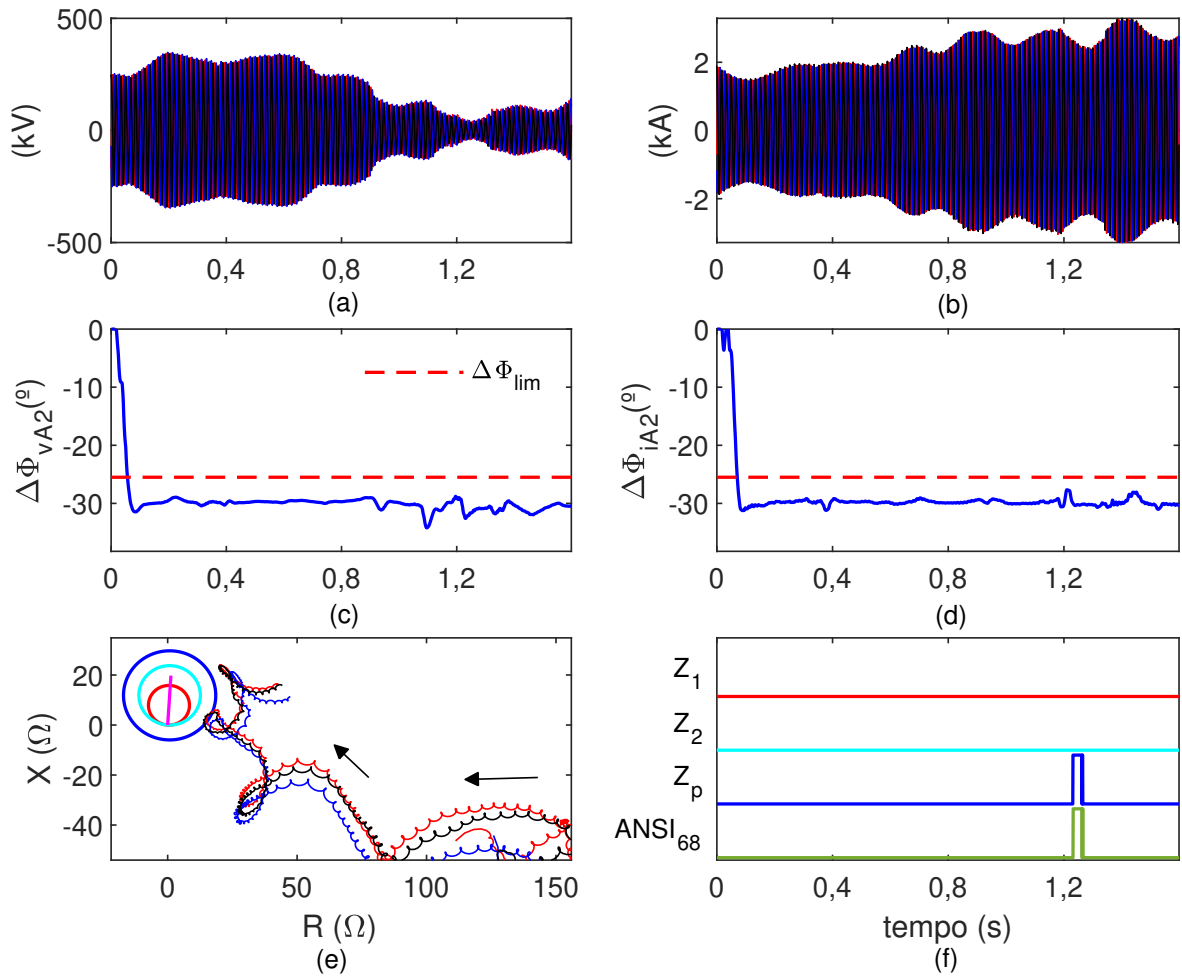


Figura 105 – Caso 2 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.

Similarmente, os casos 3 e 4 se referem a oscilações de potência simétricas e estáveis. Eles estão apresentados, respectivamente, na Fig. 106 e na Fig. 107. A análise desses casos pode ser resumida da seguinte maneira:

- observam-se variações lentas nos sinais trifásicos de tensão e corrente. Isso é mostrado na Fig. 106 (a) e (b) para o caso 3 e na Fig. 107 (a) e (b) para o caso 4;
- as impedâncias são aproximadamente iguais entre si ($Z_{AT} \approx Z_{BT} \approx Z_{CT}$) e não entram na zona de partida Z_p . Esse deslocamento é verificado na Fig. 106 (e) e (f) para o caso 3 e na Fig. 107 (e) e (f) para o caso 4;
- $\Delta\Phi_{vA2}$ e $\Delta\Phi_{iA2}$ se mantêm inferiores a $\Delta\Phi_{lim}$, conforme pode ser notado na Fig. 106 (c) e (d) para o caso 3 e na Fig. 107 (c) e (d) para o caso 4. Isso mostra que o bloqueio aconteceria numa eventual entrada da impedância na zona de partida Z_p , o que evidencia novamente a confiabilidade do algoritmo proposto ALG-B.

6.4.1 Análise Comparativa com Outros Métodos.

Após confirmada a confiabilidade do algoritmo proposto ALG-B, diante de quatro casos reais de oscilações de potência, nessa seção é escolhido o caso 2, já apresentado na Fig. 105, e é investigado o desempenho de outros três algoritmos diante desse cenário. São analisados o algoritmo proposto no capítulo 5 (ALG-A), e os algoritmos ALG-1 e ALG-2, já apresentados anteriormente. O objetivo é mostrar a superioridade do algoritmo proposto ALG-B em relação aos outros algoritmos discutidos nesse estudo.

A Fig. 108 (a) e (b) mostra os resultados obtidos a partir do algoritmo proposto ALG-A. Observa-se na Fig. 108 (a) que Φ_{va2} diminui continuamente do início da oscilação até aproximadamente o instante de 0,7 s. Depois salta aleatoriamente entre $+\pi$ e $-\pi$ até 0,9 s. Por fim, Φ_{va2} volta a diminuir continuamente até o tempo final da oscilografia. De outra maneira, nota-se na Fig. 108 (a), que o esperado padrão de onda dente de serra não é calculado pelo algoritmo proposto ALG-A durante a oscilação de potência.

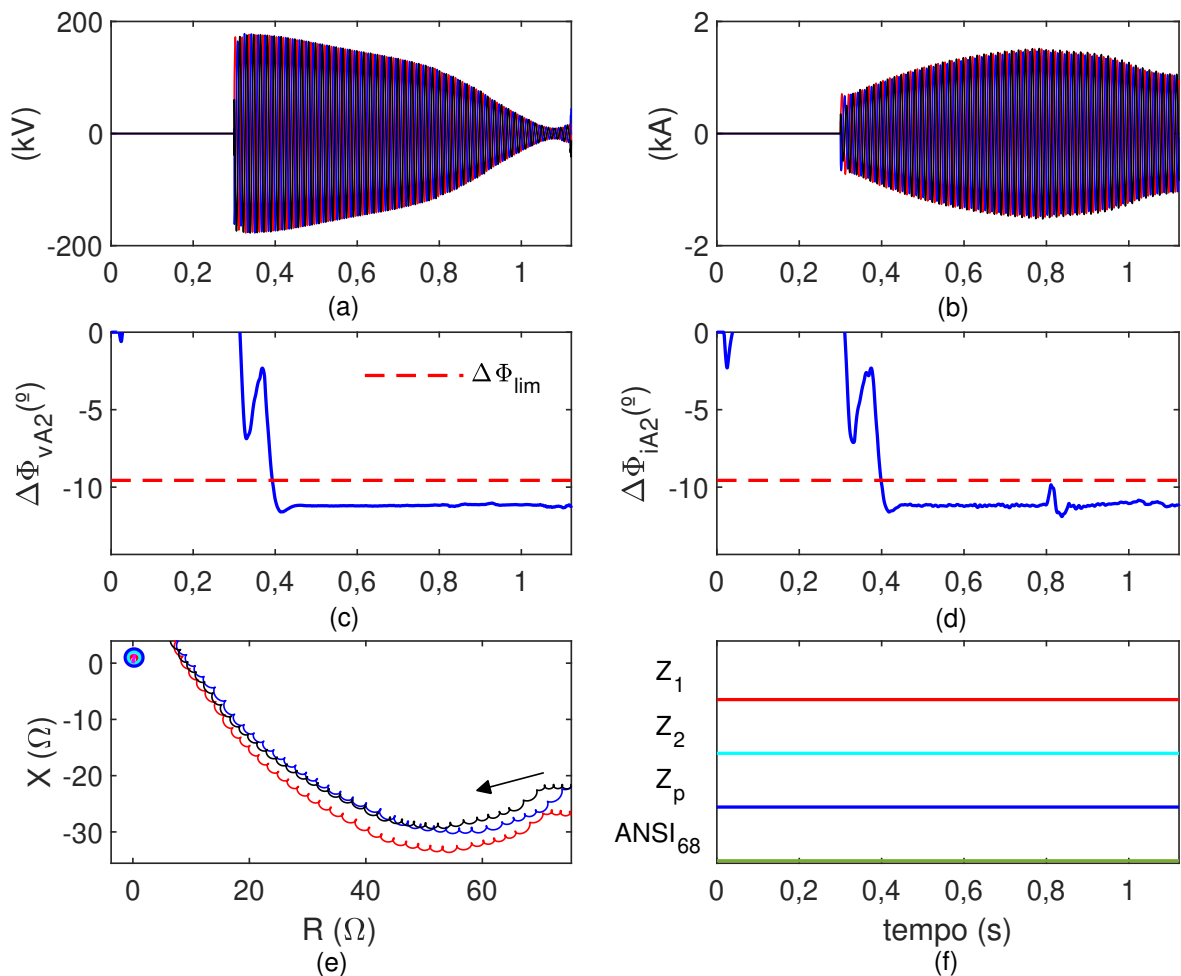


Figura 106 – Caso 3 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.

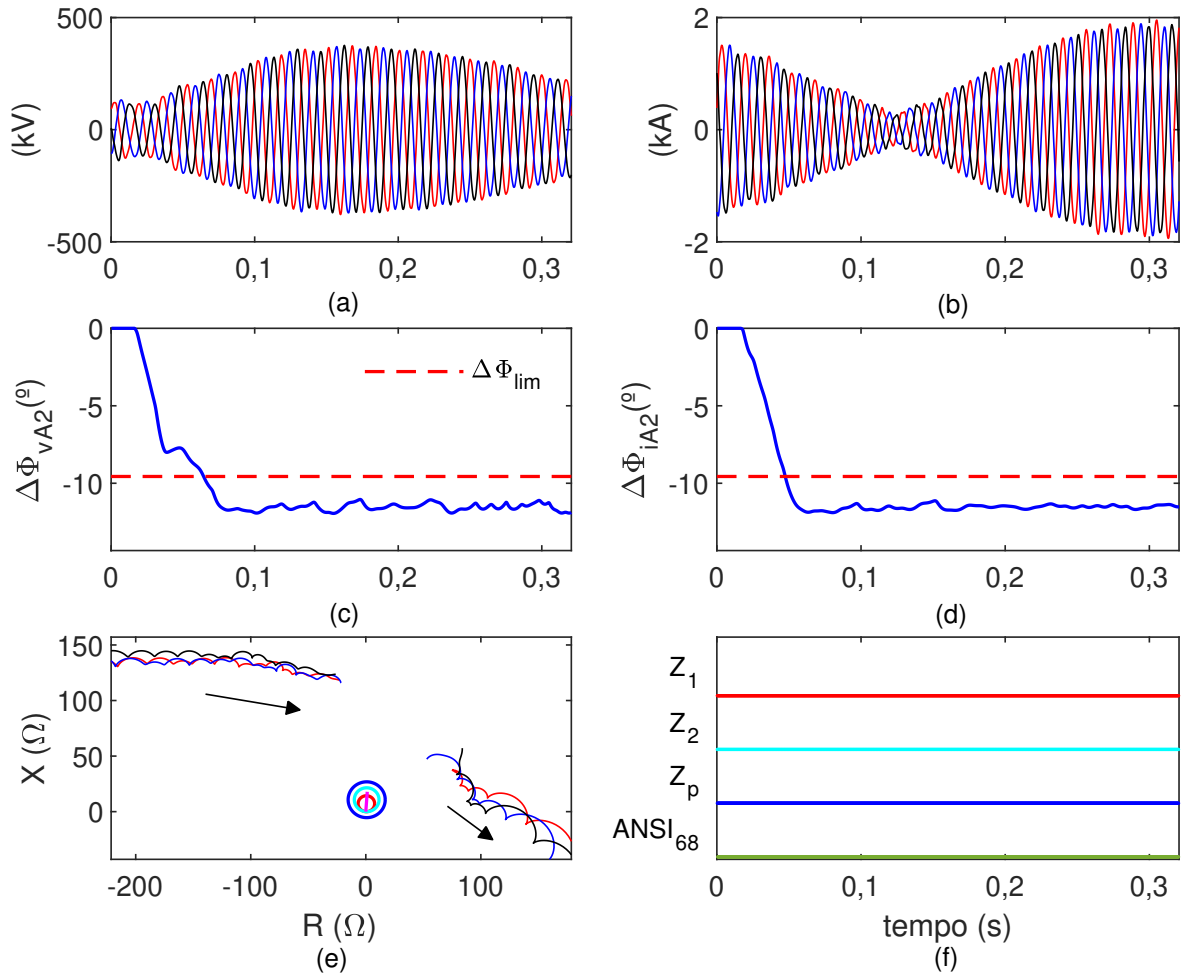


Figura 107 – Caso 4 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$. (e) Plano RX . (f) Análise de eventos.

Uma compreensão semelhante para Φ_{ia2} pode ser obtida analisando Fig. 108 (b). Esses resultados mostram que a proteção de distância está desbloqueada, podendo o algoritmo proposto ALG-A detectar como falta uma condição de oscilação de potência. Essa falha acontece porque o algoritmo proposto ALG-A é desenvolvido a partir da equação (5.1), que considera sinais trifásicos perfeitamente equilibrados durante oscilações de potência simétricas. Havendo pequenos desequilíbrios, como acontece no caso 2 de oscilação de potência real, o algoritmo proposto ALG-A não obtém o padrão de onda dente de serra e consequentemente não tem bom desempenho. Esse resultado mostra a superioridade do algoritmo proposto ALG-B, que foi desenvolvido de acordo com a equação (6.2), onde é admitido situações de desequilíbrios entre os sinais trifásicos e, portanto, apresentou bom desempenho diante deste caso, conforme já apresentado na Fig. 105. Vale lembrar que a equação (6.2) é uma proposta de modelagem matemática originalmente apresentada neste estudo.

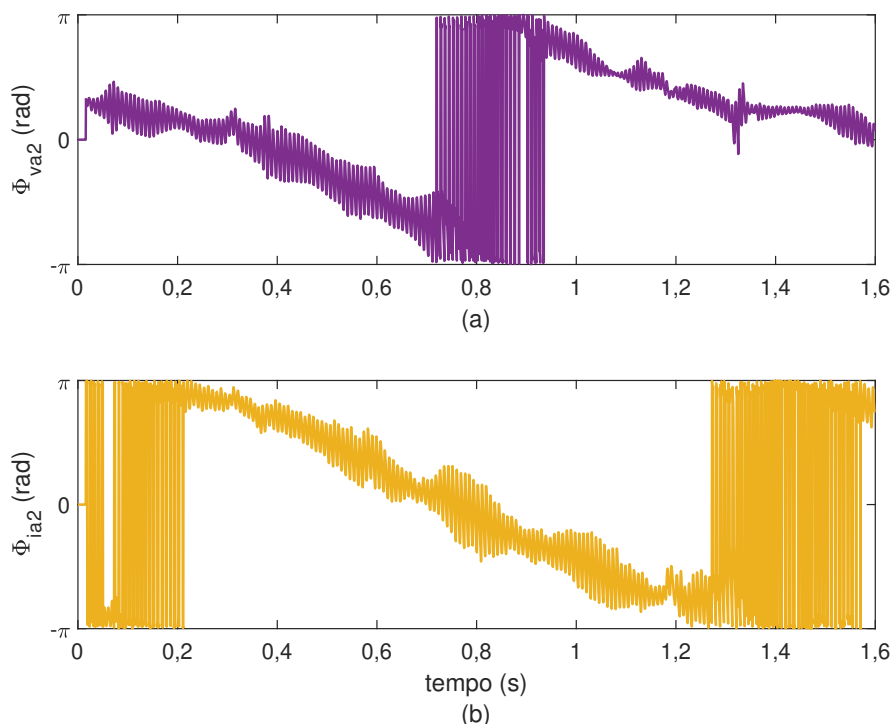


Figura 108 – Caso 2 de oscilação de potência real. Ângulo do fasor de sequência negativa: (a) Φ_{va2} e (b) Φ_{ia2} . Falha de atuação do ALG-A.

Já a Fig. 109 mostra o desempenho do algoritmo ALG-1, que também falhou para este caso. Observa-se que vários desbloqueios indevidos acontecem próximo ao instante de tempo de 1,2 s. Neste caso, as variações nos sinais trifásicos de tensão, decorrentes dos vários desligamentos de linhas, são vistas pelo algoritmo ALG-1 como faltas durante oscilação de potência. Esses resultados novamente confirmam a superioridade do algoritmo proposto ALG-B, que não realizou desbloqueios indevidos, conforme já discutido na Fig. 105.

Por fim, a Fig. 110 mostra o desempenho do algoritmo ALG-2, que demonstrou-se confiável diante deste cenário de teste, uma vez que o limite de CAF=0,6 não foi superado durante a oscilação de potência, conforme mostrado na Fig. 110 (b). Deve ser lembrado que o algoritmo ALG-2 é menos sensível ao surgimento de pequenas assimetrias, que nesse caso são decorrentes dos desligamentos de linhas. Isso justifica o seu bom desempenho durante o caso 2 de oscilações de potência real. No entanto, por essa mesma razão (ocorrência de pequenas assimetrias), o algoritmo ALG-2 não apresentou bom desempenho para detectar faltas durante oscilações de potência, conforme já discutido e mostrado nas Tabelas 9 e 10, onde ficou comprovada a superioridade do algoritmo proposto ALG-B.

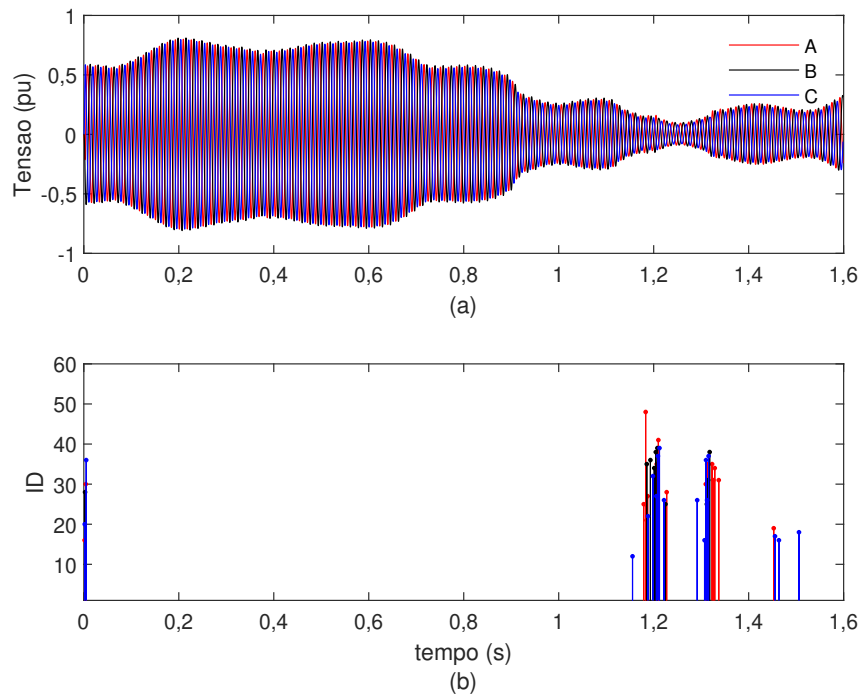


Figura 109 – Caso 2 de oscilação de potência real. Algoritmo baseado na derivada da tensão (ALG-1). (a) Sinais trifásicos de tensão. (b) Índice de detecção de falta. Condição de oscilação de potência detectada como falta pelo ALG-1 (Falha de atuação).

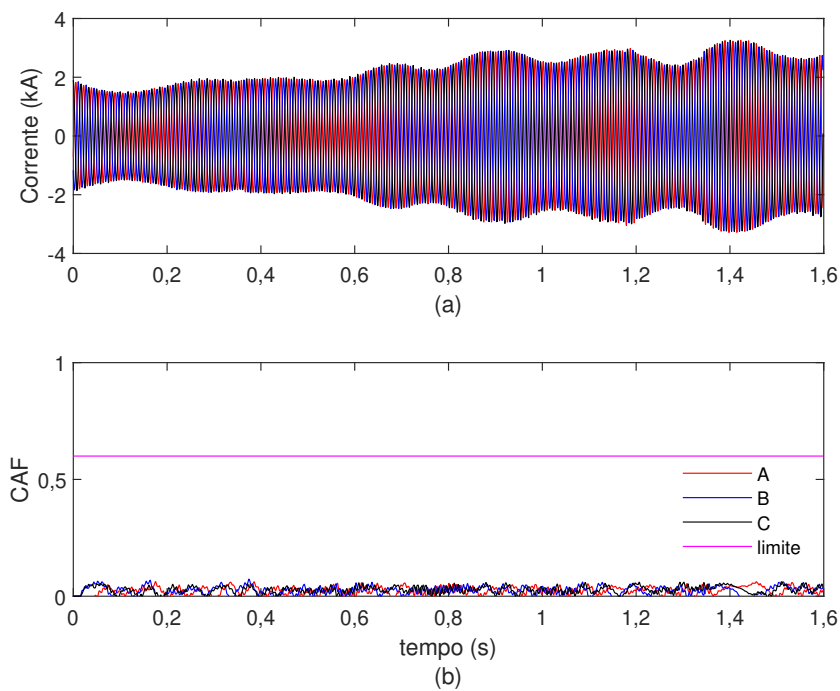


Figura 110 – Caso 2 de oscilação de potência real. Algoritmo baseado na assimetria da corrente (ALG-2). (a) Sinais trifásicos de Corrente. (b) Coeficiente de Assimetria de Fisher (CAF). Desempenho correto do ALG-2.

6.5 Considerações Finais

Este capítulo iniciou-se apresentando nova formulação matemática, originalmente proposta neste estudo, capaz de modelar oscilações de potência simétricas, estáveis e instáveis, e oscilações de potência assimétricas, estáveis e instáveis. A partir dessa nova formulação foi desenvolvido um algoritmo, que independe de estudos sistêmicos complexos para definir seus ajustes de parametrização, e que utiliza ferramentas matemáticas comumente encontradas em relés de proteção, como filtros Butterworth, filtro de Fourier e teorema de Fortescue. Baseando-se na metodologia de cálculo, originalmente desenvolvida no Capítulo 5, foi mostrado que durante oscilações de potência, não importando o tipo, são estimados fasores de sequência negativa. Então, utilizando um filtro passa alta, do tipo Butterworth, foram selecionados os fasores de sequência negativa que giram no sentido horário com frequência ω^- . Esses dados se demonstraram valiosos para caracterizar oscilações de potência simétricas e assimétricas.

Neste capítulo destacam-se os resultados alcançados. Diante de cenários de testes, obtidos via software de simulação, pode-se dizer que o algoritmo proposto ALG-B foi capaz de realizar o bloqueio por detecção de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Também se demonstrou capaz de realizar desbloqueios por ocorrência de faltas durante oscilações de potência simétricas e assimétricas. Nesses testes, o algoritmo proposto ALG-B obteve desempenho superior a dois algoritmos disponíveis na literatura. Além disso, é importante mencionar que o algoritmo proposto ALG-B se demonstrou confiável diante de diferentes frequências de amostragem, ruídos e harmônicas. Quando analisados casos reais, vale destacar a superioridade do algoritmo proposto ALG-B, que atuou corretamente, enquanto o algoritmo proposto anteriormente no Capítulo 5 (ALG-A) e o algoritmo ALG-1 obtiveram falha de atuação. Esses resultados confirmam que o algoritmo proposto ALG-B é um método de proteção multifunção, confiável e seguro, durante oscilações de potência.

Capítulo 7

Conclusões

Esse trabalho se desenvolveu no contexto de oscilações de potência e faltas durante oscilações de potência. Além de discutir amplamente esses fenômenos, foram desenvolvidos dois algoritmos para melhorar o desempenho da proteção de distância durante essas condições. Nesse sentido, a função de bloqueio por oscilação de potência e a função de desbloqueio por detecção de falta durante oscilações de potência foram amplamente discutidas e estudadas neste trabalho.

Dessa maneira, pode-se dizer que este trabalho iniciou-se apresentado um estudo conceitual e analítico sobre oscilações de potência. Foram definidas oscilações de potência simétricas, estáveis e instáveis, e oscilações de potência assimétricas, estáveis e instáveis. Também foi apresentado um método analítico para verificar a formação de centro elétrico. Esse método se desenvolveu considerando uma condição de oscilação de potência simétrica e instável.

Em seguida foi apresentado um estudo, baseado em resultados de simulações, onde foi investigado o comportamento de diversas grandezas elétricas, durante as condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas. Nesse sentido, foram analisados sinais trifásicos de tensão e corrente, trajetória da impedância no plano RX , potências trifásicas ativa e reativa, variação de frequência e defasagem angular.

Numa terceira etapa foi proposto um novo algoritmo (ALG-A) para proteção de linhas de transmissão durante oscilações de potência simétricas. Esse algoritmo está de acordo com solução analítica originalmente desenvolvida neste trabalho e se fundamenta em ferramentas matemáticas comumente utilizadas por relés de proteção, como o filtro de Fourier e o teorema de Fortescue. Destaca-se que essa metodologia dispensa estudos sistêmicos complexos para definir ajustes de parametrização e demanda baixa frequência de amostragem. Os resultados mostraram que o algoritmo proposto ALG-A é confiável ao realizar o bloqueio diante de oscilações de potência simétricas, estáveis e instáveis, além de apresentar rápido desbloqueio após a incidência de faltas ocorridos durante oscilações de potência. Para essa última função o algoritmo proposto ALG-A obteve desempenho

superior quando comparado a outros dois métodos disponíveis na literatura. Vale destacar que esse algoritmo foi validado apenas diante de cenários de testes obtidos via software *Simulink*, conforme apresentado no Capítulo 5.

Por fim, no Capítulo 6 foi apresentado o algoritmo proposto ALG-B. Este algoritmo foi proposto de acordo com metodologia originalmente desenvolvida neste estudo, que inclui nova formulação matemática, capaz de modelar condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas, e solução analítica, desenvolvida no Capítulo 5 e novamente utilizada no Capítulo 6, demonstrando que também são estimados fasores de sequência negativa durante essas condições de oscilações de potência. Foi mostrado que esse algoritmo utiliza ferramentas matemáticas comumente encontradas em relés de proteção, como o filtro de Fourier, filtro de Butterworth e o teorema de Fortescue. Além disso, independe de estudos sistêmicos complexos para definir ajustes de parametrização e trabalha com baixa frequência de amostragem. Os resultados obtidos diante de casos simulados, mostraram que o método é capaz de realizar o bloqueio por detecção de oscilações de potência, simétricas e assimétricas, e realizar desbloqueios por ocorrência de faltas durante oscilações de potência simétricas e assimétricas. Para essa função de desbloqueio, o algoritmo proposto ALG-B obteve desempenho superior quando comparado a outros dois métodos disponíveis na literatura. Também alcançou desempenho confiável na presença de ruídos, harmônicas e diferentes frequências de amostragem. Quando analisados casos reais, o algoritmo proposto ALG-B também atuou corretamente, com desempenho superior ao algoritmo proposto ALG-A, e ao algoritmo ALG-1. De forma geral, os resultados obtidos evidenciam que o algoritmo proposto ALG-B é um método de proteção multifunção, capaz de realizar bloqueio e desbloqueio, de forma confiável e segura, durante condições de oscilações de potência simétricas e assimétricas.

7.1 Propostas de Continuidade

Embora este trabalho apresente de forma satisfatória novas contribuições e algoritmos de proteção, acredita-se que ainda persistem campos que podem ser explorados no intuito de melhorá-lo ou mesmo adicionar novos conhecimentos sobre os métodos definidos e estudados. Neste contexto podem ser citadas as seguintes propostas de continuidade:

7.1.1 Primeira Proposta

Os resultados apresentados nesse estudo evidenciaram a confiabilidade e segurança do algoritmo proposto ALG-B. Portanto, analisar seu desempenho, diante de diferentes topologias de sistemas elétricos de potência, é citado como primeira opção de investigação a ser realizada em estudos futuros. Detalhadamente, essa proposta significa avaliar o desempenho do algoritmo proposto ALG-B considerando a presença de:

- fontes renováveis de energia em sistemas elétricos de potência;
- dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*) em sistemas elétricos de potência.

7.1.2 Segunda Proposta

Foi mostrado, através do estudo de casos reais de oscilações de potência simétricas, que nessas condições os sinais trifásicos não são perfeitamente equilibrados entre si e, por esse motivo, o algoritmo proposto ALG-A falhou nessas condições. No entanto, ficou evidente que o algoritmo proposto ALG-A é eficiente quando testado diante de sinais perfeitamente equilibrados. Então, a busca por métodos, capazes de decompor sinais trifásicos senoidais desequilibrados, em sinais trifásicos equilibrados, compostos pelas componentes de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, demonstra ser boa direção em trabalhos futuros. Nesse caso, os dados de sequência positiva, obtidos no domínio do tempo, podem ser representados conforme equação (5.1) e, portanto, devem ser escolhidos e enviados para o algoritmo proposto ALG-A para melhorar o seu desempenho diante de condições de oscilações de potência desequilibradas.

7.1.3 Terceira Proposta

Foi mostrado que o algoritmo proposto ALG-B obteve melhor desempenho diante dos testes realizados. Portanto, sua implementação em dispositivos programáveis reais (como FPGA, do inglês *Field Programmable Gate Array*) e posterior testes em um simulador digital de tempo real (RTDS, do inglês: *Real Time Digital Simulator*), podem ser estudos explorados em trabalhos futuros.

7.1.4 Quarta Proposta

Foi mostrado, através das equações (5.35) e (6.23), apresentadas respectivamente nos Capítulos 5 e 6, que durante oscilações de potência são estimados fasores de sequência negativa. Neste trabalho foi explorada somente a característica girante do fasor de sequência negativa, dada por essas equações. No entanto, observa-se em (5.35) e (6.23), que essas equações também fornecem informações sobre o módulo do fasor de sequência de negativa. Então, em trabalhos futuros essas equações podem ser investigadas buscando conhecer o comportamento do módulo, e assim desenvolver novos esquemas de proteção para melhorar o desempenho da proteção de distância durante oscilações de potência.

Referências

- ABB. *Line distance protection REL650, Version 2.2 IEC*. ABB Grid Automation Products, Relion @ 650 SERIES, Document ID 1MRK 506 381–UEN, 2019.
- Alves, T. M. T. S.; Oliveira, D. B.; Duarte, A. C.; Cardoso, I. S.; Castro, A.; Barros, H. M.; Aquino, A. F.; Massaud, A. G.; Barbosa, A.; Penna, L. D. 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. In *XIV STPC*, 2018.
- Anderson, P. M.; Fouad, A. A. *Power System Control and Stability*. Wiley-IEEE Press, 2 edition, 2002. ISBN ISBN 0-471-23862-7.
- Andrade, J. S. Caracterização e modelagem de oscilações de potência para testes em relés de distância. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dezembro 2020.
- Apostolov, A. P.; Tholomier, D.; Richards, S. H. Superimposed components based sub-cycle protection of transmission line. In *IEEE Power Eng. Soc. Power Syst. Conf. Expo.*, 2004.
- Brahma, S. Distance relay with out of step blocking function using wavelet transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3):1360–1366, July 2007.
- 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*, 6, March 2020.
- Chatterjee, S.; Anand, A.; Roy, B. K. S.; Terzija, V. Dual use line relays to improve power swing deblocking function. *Electrical Power and Energy Systems*, 121, May 2020.
- Djuric, M. B.; Djuricic, Z. R. Frequency measurement of distorted signals using fourier and zero crossing techniques. *Electric Power Systems Research*, 78(8):1407–1415, August 2008.
- GE. *D60 Line Distance Relay, UR Series Instruction Manual*. General Electric Multilin Inc, D60 Revision 7.8x, 2019.

- Hasani, A.; Haghjoo, F. A secure and setting-free technique to detect loss of field in synchronous generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32:1512–1522, December 2017.
- Hashemi, S. M.; Sanaye-Pasand, M. Distance protection during asymmetrical power swings: Challenges and solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(6):2736–2745, December 2018.
- Hashemi, S. M.; Pasand, M. S.; Shahidehpour, M. Fault detection during power swings using the properties of fundamental frequency phasors. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10, March 2019.
- Jafari, R.; Moaddabi, N.; Eskandari-Nasab, M.; Gharehpetian, G. B.; Naderi, M. S. A novel power swing detection scheme independent of the rate of change of power system parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(3):1192–1202, June 2014.
- Kang, D.; Gokaraju, R. A new method for blocking third-zone distance relays during stable power swings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(4):1836–1843, August 2016.
- Khodaparast, J.; Khederzadeh, M. Three-phase fault detection during power swing by transient monitor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(5):2558–2565, September 2015.
- Khodaparast, J.; Khederzadeh, M. Adaptive concentric power swing blocker. *Protection Control Modern Power Syst*, 1(16):324–339, December 2016.
- Kundur, P. *Power system stability and control*. McGraw Hill, United States, 1994.
- Lazaro, C. *Método para Detecção de Oscilação de Potência no Domínio do tempo*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Maio 2018.
- 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*, 155:340–349, November 2017.
- Lazaro, C.; Morais, A. P.; Marchesan, G.; Junior, G. C.; Gutierrez, L. F. F. Rate of change of active power as a power swing rate of change of active power as a power swing. *IEEE Latin America Transactions*, March 2021.
- Lin, X.; Gao, Y.; Liu, P. A novel scheme to identify symmetrical faults occurring during power swings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(1):73–78, January 2008.
- Lin, X.; Li, Z.; Ke, S.; Gao, Y. Theoretical fundamentals and implementation of novel self-adaptive distance protection resistant to power swings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25, July 2010.

- Mahamedi, B.; Fletcher, J. E. Setting-free method for detection of asymmetrical faults during power swings. *Electric Power Systems Research*, 181, January 2020.
- Mahamedi, B.; Zhu, J. G. A novel approach to detect symmetrical faults occurring during power swings by using frequency components of instantaneous three-phase active power. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3):1368–1376, July 2012.
- Mahamedi, B.; Zhu, J. G.; Hashemi, S. M. A setting free approach to detecting loss of field in synchronous generators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31:2270–2278, October 2016.
- Mathworks. Help center, simscape electrical: blocks. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/sps/referencelist.html?type=block&s_tid=CRUX_topnav, 2022. Acesso em 14 de novembro de 2022.
- Mcdonald, M.; Tziouvaras, D. *Power swing and out-Of-step considerations on transmission lines*. IEEE PSRC WG D6, July 2005.
- Mooney, P. E. J.; Fischer, N. Application guidelines for power swing detection on transmission systems. In *IEEE 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, pages 289–298, 2006.
- Morais, A. P. *Algoritmo de Alto Desempenho para Proteção Numérica de Linhas de Transmissão Imune a Oscilações de Potência*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Maio 2012.
- Musa, M. H. H.; He, Z.; Fu, L.; Deng, Y. A covariance indices based method for fault detection and classification in a power transmission system during power swing. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105(4):581–591, February 2019.
- Nayak, P.; Rao, J. G.; Kundur, P.; Pradhan, A. K.; Bajpai, P. A comparative assessment of power swing detection techniques. In *Joint Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. Power India*, pages 1–4, 2010.
- ONS. *Análise da Perturbação do Dia 10/11/2009 às 22H 13MIN Envolvendo o Desligamento dos Três circuitos da LT 765 kV Itaberá-Ivaiporã*. Relatório de Análise da Perturbação - RAP (ONS-RE-3-252-2009), Dezembro 2009. Disponível: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/conselhos-e-comites/cmse/relatorios>.
- Pang, C.; Kezunovic, M. Fast distance relay scheme for detecting symmetrical fault during power swing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4):2205–2212, October 2010.
- Patel, B. A new technique for detection and classification of faults during power swing. *Electric Power Systems Research*, 175, June 2019.

- Patel, B.; Bera, P.; Dey, S. H. N. Differential voltage-based fault detection during power swing. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14:157–165, December 2019.
- Rao, J. G.; Pradhan, A. K. differential power-based symmetrical fault detection during power swing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3):1557–1564, July 2012.
- Rao, R. G.; Pradhan, P. K. Power-swing detection using moving window averaging of current signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(1):1123–1134, February 2015.
- Sauer, P. W.; Pai, M. A. *Power System Dynamics and Stability*. The University of Illinois, 1997.
- Schweitzer. *SEL – 421 Relay Protection and Automation System, Instruct Manual*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc, 2011.
- Silveira, E. G. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão: Desenvolvimento de Novos Algoritmos e Implementação de Sistema Computacional para Aplicações Práticas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- Sorrentino, E.; Carvalho, R. Performance of three algorithms for frequency measurement under transient conditions. *Electric Power Systems Research*, 80:1191–1196, May 2010.
- Std-1159TM. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE Power and Energy Society, New York, June 2019.
- Su, B.; Jing, L.; Liu, Q. Fast power swing unblocking method and apparatus for distance protection in power system. *United States Patent*, 2011. N^o US 9496706B2.
- Tekdemir, I. G.; Alboyaci, B. A novel approach for improvement of power swing blocking and deblocking functions in distance relay. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(4):1986–1994, August 2014.
- Thorp, J. S.; Phadke, A. G. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer, second edition, 2008. ISBN 978-3-319-50584-8 (ebook).
- Ziegler, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Siemens AG, July 1999. ISBN 3-89578-142-8.

Apêndice A

Comparação Entre os Métodos: Análise Quantitativa

A fim de comparar os diversos métodos disponíveis na literatura técnica atual e os algoritmos propostos ALG-A e ALG-B, nesse apêndice é realizada uma análise quantitativa dos dados apresentados na Tabela 1. A Tabela 1 é reproduzida a seguir como Tabela 13, onde cada palavra (SIM, NÃO e NI) são substituídas por um peso. Para o caso específico da palavra SIM, são atribuídos pesos de acordo com a coluna em que aparece, conforme a seguinte regra:

coluna	peso
3	1
4	0,7
5	0,3
6	1
7	1
8	3
9	3
total	10

Observa-se que os maiores pesos (peso 3) são atribuídos às colunas 8 e 9. O autor acredita que os algoritmos que independem de estudos complexos para definir ajustes de parametrização (coluna 8), e que são testados diante de casos reais (coluna 9) devem ser melhores valorizados, pois essas características atribuem segurança e confiabilidade ao método. Outro destaque deve ser dado aos pesos atribuídos às colunas 4 e 5. Observa-se que foi dado peso 0,7 à coluna 4, por entender que faltas simétricas são mais difíceis de serem detectadas, enquanto foi dado peso 0,3 à coluna 5, que refere-se à detecção de faltas assimétricas. As demais colunas receberam peso 1. Logicamente, caso o algoritmo não atenda a um determinado questionamento, indicado pela palavra NÃO na tabela 1, será atribuído peso 0. Da mesma forma, será atribuído peso 0, se o método não foi investigado diante de um determinado cenário de oscilação de potência (NI). Vale destacar que esses

pesos foram distribuídos de acordo com a interpretação deste autor e que outros resultados podem ser obtidos, dependendo, é claro, dos pesos considerados.

Dessa maneira, a Tabela 13 é apresentada a seguir considerando a presença dos pesos e uma nota final para cada algoritmo. Observa-se que o algoritmo proposto ALG-B, apresentado na linha 28, foi o único a obter nota máxima (nota 10). A segunda maior nota (nota 5) foi obtida pelos algoritmos enumerados como 22, 23, 24 e 27. Como esses algoritmos são independentes de estudos complexos para definir ajustes de parametrização, isso justifica essa avaliação mediana. Os demais algoritmos obtiveram nota inferior a 5.

Tabela 13 – Revisão da literatura: Métodos para proteção de linhas de transmissão durante oscilações de potência (OP) Simétricas (S) e Assimétricas (AS)

Nº	Descrição do método	OP Simétrica			OP Assimétrica		*Livre de Ajuste	Casos reais	Nota
		Bloq	Desbloq Falta		Bloq	Desbloq Falta			
			S	AS		AS			
1	(Mooney e Fischer, 2006): Convencional duplo blinder	1	0	0	0	0	0	1	
2	(Kang e Gokaraju, 2016): Máquina equivalente vista do ponto de medição	1	0	0	0	0	3	4	
3	(Khodaparast e Khederzadeh, 2016): Característica concêntrica adaptativa	1	0,7	0	0	0	0	1,7	
4	(Nayak et al., 2010): Tensão do centro elétrico	1	0,7	0	0	0	0	1,7	
5	(Lin et al., 2010): Característica concêntrica modificada	1	0,7	0,3	0	0	0	2	
6	(Brahma, 2007): Transformada Wavelet	1	0,7	0,3	0	0	0	2	
7	(Jafari et al., 2014): Trajetória circular da admitância	1	0,7	0,3	0	0	0	2	
8	(Tekdemir e Alboyaci, 2014): Série de Taylor	1	0,7	0,3	0	0	0	2	
9	(Apostolov et al., 2004): Correntes superpostas	1	0,7	0,3	0	0	0	2	
10	(Rao e Pradhan, 2015): Média móvel dos sinais de corrente	1	0,7	0,3	0	0	3	5	
11	(Lin et al., 2008): Derivada no tempo das potências trifásicas ativa e reativa	0	0,7	0	0	0	0	0,7	
12	(Mahamedi e Zhu, 2012): Potência trifásica ativa instantânea	0	0,7	0	0	0	0	0,7	
13	(Mahamedi e Fletcher, 2020): Monitora 120 Hz na potência trifásica ativa	0	0	0,3	0	0	3	3,3	
14	(Khodaparast e Khederzadeh, 2015): Transformada de Fourier-Taylor	0	0,7	0,3	0	0	0	1	
15	(Rao e Pradhan, 2012): Variação de potência	0	0,7	0,3	0	0	0	1	
16	(Patel, 2019): Figuras de Lissajous	0	0,7	0,3	0	0	0	1	
17	(Pang e Kezunovic, 2010): Ondas viajantes e transformada Wavelet	0	0,7	0,3	0	0	0	1	
18	(Patel et al., 2019): Derivada dos sinais trifásicos de tensão	0	0,7	0,3	0	0	3	4	
19	(Musa et al., 2019): Índice de covariância	0	0,7	0,3	0	0	0	1	
20	(Lazaro et al., 2017): Coeficiente de assimetria de Fisher	0	0,7	0,3	0	0	3	4	
21	(Hashemi et al., 2019): Variação de Admitância	0	0,7	0,3	0	0	3	4	
22	(Chatterjee et al., 2020): Produto entre ângulo do fator de potência e módulo da corrente	0	0,7	0,3	0	1	3	5	
23	(Chatterjee e Roy, 2020): Produto entre admitância e potência	0	0,7	0,3	0	1	3	5	
24	(Su et al., 2011): Taxa de variação de impedância	0	0,7	0,3	0	1	3	5	
25	(Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018)-a: Método $ dI_0/dt $	0	0	0	0	1	0	1	
26	(Hashemi e Sanaye-Pasand, 2018)-b: Método de detecção de falta fase terra	0	0	0	0	1	3	4	
27	Algoritmo Proposto ALG-A	1	0,7	0,3	0	0	3	5	
28	Algoritmo Proposto ALG-B	1	0,7	0,3	1	1	3	3	10

* Nesta tabela o termo livre de ajuste deve ser entendido como: o método é livre (independente) de estudos sistêmicos complexos prévios para definir o seu correto ajuste de parametrização?

Apêndice B

Parâmetros do Sistema Elétrico IEEE-9 Barras

Tabela 14 – Geradores Síncronos

	G1	G2	G3
S (MVA)	247,5	192	128
V(kV)	16,5	18	13,8
H (s)	9,55	3,3	2,35
Velocidade (rpm)	180	3600	3600
Rs (pu)	0,003	0,003	0,003
Ll (pu)	0,0336	0,0521	0,0742
Lmd (pu)	0,1124	0,8437	1,2383
Lmq (pu)	0,0633	0,8124	1,1836
Rf (pu)	4,3897e-5	4,0553e-04	6,1046e-4
Llfd (pu)	0,0358835	0,0736	0,117240037
Rkd (pu)			
Llkd (pu)			
Rkq1 (pu)		0,00490149	0,006145298
Llkq1 (pu)		0,17620659	0,206466441
Rkq2 (pu)			
Llkq2 (pu)			

Tabela 15 – Sistema elétrico IEEE-9 Barras. Condições Iniciais dos Geradores: Oscilações de Potência Simétricas

Gerador	P_m (MW)	V_{ref} (pu)
G1*	50,4	1,04
G2	163	1,025
G3	108,8	1,025

*Gerador classificado como *swing* ao inicializar o fluxo de potência.

Tabela 16 – Sistema elétrico IEEE-9 Barras Modificado. Condições Iniciais dos Geradores: Oscilações de Potência Assimétricas

Gerador	P_m (MW)	V_{ref} (pu)
G1*	216,4	1,04
G2	0,6	1,025
G3	116,5	1,025

* Gerador classificado como *swing* ao inicializar o fluxo de potência.

Tabela 17 – Sistema de Excitação

K_A	20
T_A (s)	0,2
K_E	1
T_E (s)	0,314
K_F	0,063
T_F (s)	0,35

Tabela 18 – Parâmetros dos Transformadores de Potência

De	Para	MVA	Xpu	$\Delta - Y$
2	7	200	0,1250	18-230 kV
3	9	200	0,1172	13,8-230 kV
1	4	300	0,1728	16,5-230 kV

Bases nominais

Tabela 19 – Cargas

Carga	Barramento	P (MW)	Q (MVar)
A	5	125	50
B	6	90	30
C	8	100	35

Tabela 20 – Parâmetros das Linhas de Transmissão em pu

Barramentos		Dados em pu		
De	Para	R	X	Y
7	8	0,0085	0,072	0,149
8	9	0,0119	0,1008	0,209
9	6	0,039	0,17	0,358
6	4	0,017	0,092	0,158
4	5	0,01	0,085	0,176
5	7	0,032	0,161	0,306

Velocidade de propagação = 298000 km/s

Sbase = 100 MVA

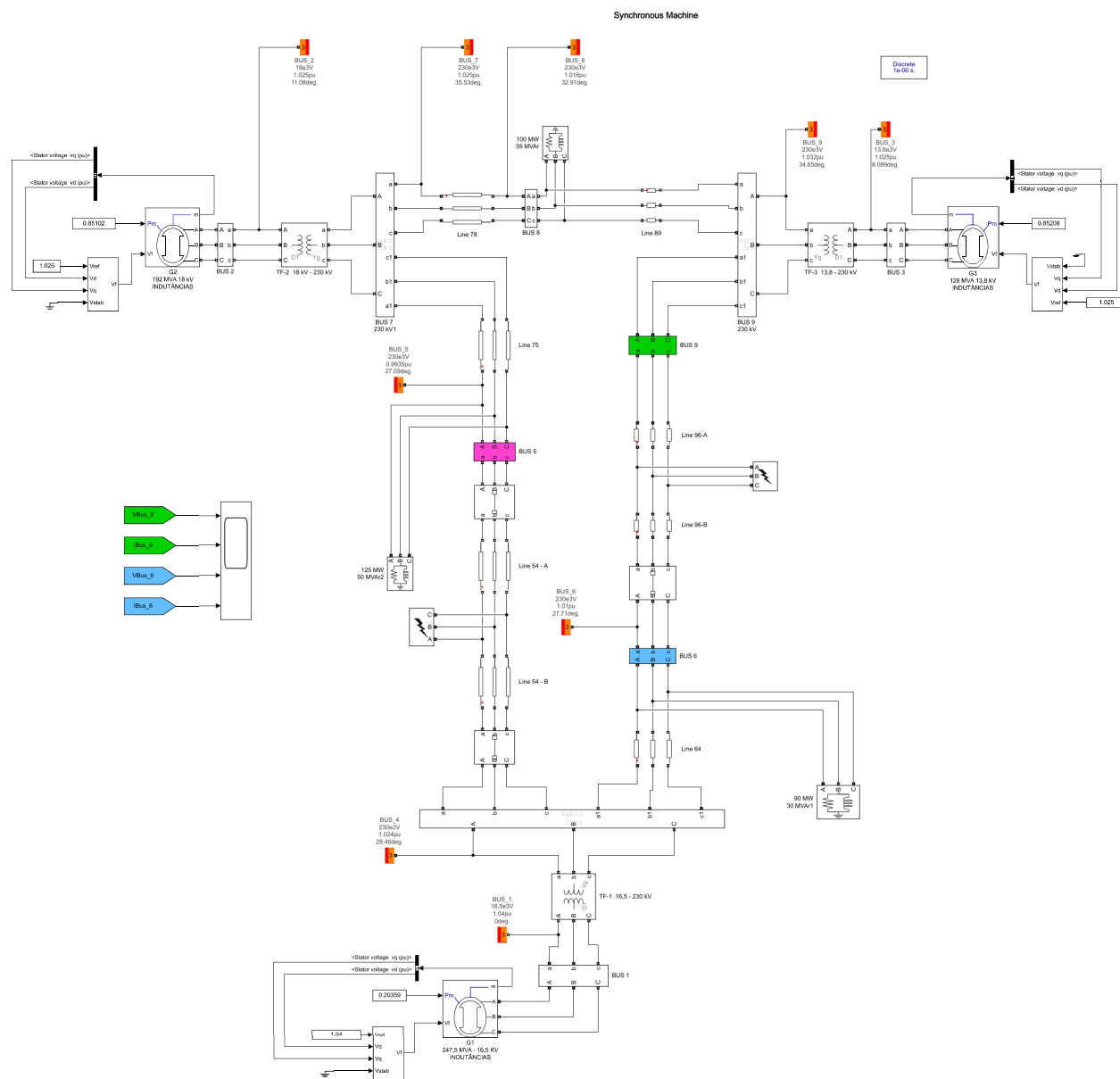
Tabela 21 – Parâmetros das Linhas de Transmissão em unidades elétricas

De	Para	$R_{\pm}(\Omega/\text{km})$	$L_{\pm}(\text{mH}/\text{km})$	$C_{\pm}(\text{nF}/\text{km})$	$R0(\Omega//\text{km})$	$L0(\text{mH}/\text{km})$	$C0(\text{nF}/\text{km})$	km
7	8	0,0548	1,2319	9,11	0,1645	3,6956	6,07	82,02
8	9	0,0548	1,2307	9,12	0,1643	3,6920	6,08	114,93
6	4	0,0940	1,3489	8,28	0,2819	4,0467	5,52	95,71
4	5	0,0546	1,2315	9,11	0,1639	3,6946	6,07	96,85
5	7	0,0960	1,2814	8,70	0,2880	3,8441	5,80	176,31
9	6	0,1051	1,2154	9,15	0,3153	3,6462	6,10	196,26

Velocidade de propagação = 298000 km / s

Apêndice C

Modelagem do Sistema Elétrico IEEE-9 Barras no Software *Matlab/Simulink*



Apêndice D

Filtro de Fourier de um Ciclo não Recursivo

Na literatura técnica é comum descrever o filtro de Fourier utilizando como referência a função cosseno, como em [Thorp e Phadke \(2008\)](#). De forma equivalente, o filtro de Fourier pode utilizar como referência a função seno, como neste trabalho. Além disso, é utilizado neste trabalho o filtro de Fourier de um ciclo não recursivo.

É conhecido que o filtro de Fourier não recursivo, mesmo diante de um sinal de entrada de frequência fundamental, não estima fasores estacionários nessas condições. No entanto, correções angulares podem ser realizadas, e assim obter fasores estacionários. Essa questão será explorada a seguir. As equações abaixo definem o filtro de Fourier de um ciclo não recursivo.

$$E = \frac{2}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a-1} y(n) \operatorname{sen} [n \theta] \quad (\text{D.1})$$

$$F = \frac{2}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a-1} y(n) \operatorname{cos} [n \theta] \quad (\text{D.2})$$

$$\dot{Y} = E + jF \quad (\text{D.3})$$

sendo que:

- f_0 é a frequência fundamental em Hz;
- N_a corresponde ao número de amostras por ciclo;
- θ é valor do ângulo de fase entre amostras em rad ($\theta = 2\pi f_0 \Delta t$);
- Δt é o intervalo de tempo fixo entre amostras em s ($\Delta t = 1 / (f_0 N_a)$).

Entre os parâmetros apresentados, destaca-se que o filtro de Fourier considera em sua formulação matemática a frequência fundamental (f_0) do sistema elétrico, uma vez que $\theta = 2\pi f_0 \Delta t$. Dessa maneira, é objetivo desse filtro estimar fasores de frequência fundamental (f_0).

Analisando agora as equações, destaca-se que (D.1), (D.2) e (D.3) são válidas apenas para uma primeira janela de dados. Para uma janela de dados genérica, estas equações podem ser reescritas, porém considerando n variando de um instante qualquer $k - N_a + 1$ até um instante atual k , resultando em

$$E(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y(n) \sin [(n + N_a - k) \theta] \quad (D.4)$$

$$F(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y(n) \cos [(n + N_a - k) \theta] \quad (D.5)$$

$$\dot{Y}(k) = E(k) + jF(k) \quad (D.6)$$

Para melhor compreender os resultados obtidos através de (D.4), (D.5) e (D.6), considera-se que o sinal de entrada $y(n)$ está na frequência fundamental f_0 e é uma função seno da forma $y(n) = \sin(n\theta)$. Analisando inicialmente a equação (D.4), a Fig. 111 ilustra o produto realizado entre a função de entrada $y(n) = \sin(n\theta)$ e a função seno do filtro ($\sin[(n + N_a - k) \theta]$), para duas janelas de dados. Pode-se concluir que o resultado obtido para a janela de dados calculada no instante $k = 4$ (Fig. 111 (a)) é diferente do resultado obtido para a janela de dados calculada no instante $k = 5$ (Fig. (111 (b))). Isso acontece

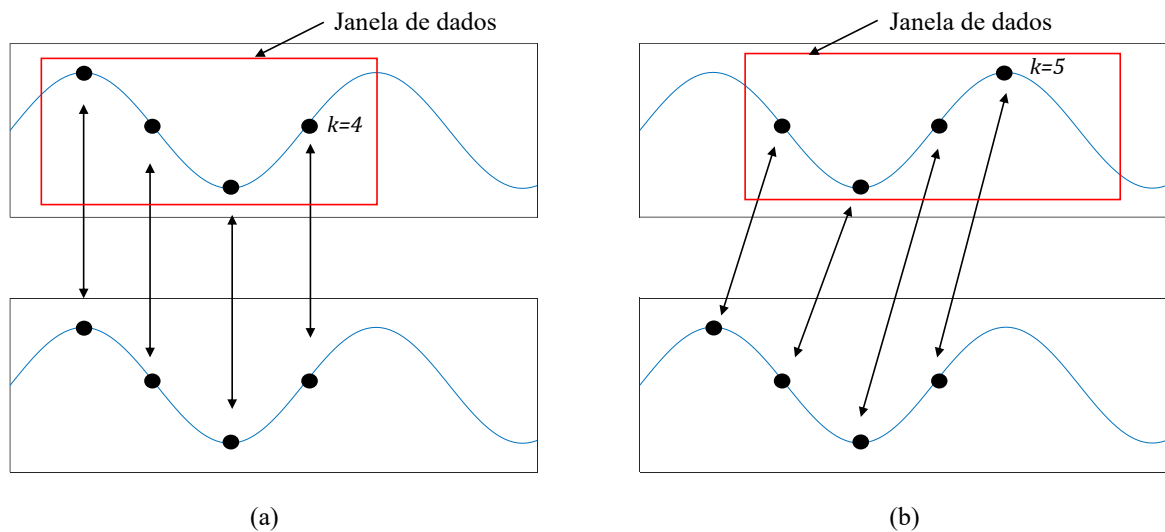


Figura 111 – Filtro de Fourier não recursivo ($N_a = 4$). (a) Janela de dados no instante $k = 4$. (b) Janela de dados no instante $k = 5$.

porque a correlação entre as funções seno não é constante com o deslocamento da janela. Conseqüentemente, o coeficiente associado a parte real (E), dado em (D.4), não é um valor constante. Esta análise também é válida para o coeficiente associado a parte imaginária (F), definido em (D.5). Logo, o fasor \dot{Y} , obtido em (D.6) não é estacionário.

No entanto, se modificadas as equações (D.4) e (D.5), diminuindo o ângulo de fase das funções $\text{sen} [(n + N_a - k) \theta]$ e $\text{cos} [(n + N_a - k) \theta]$ por $(N_a - k)\theta$, é possível estimar fasores estacionários. As equações (D.7) e (D.8), apresentadas a seguir, consideram esta correção angular, retornando em (D.9) fasores estacionários para qualquer instante k .

$$E(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y(n) \text{sen} [n \theta] \quad (\text{D.7})$$

$$F(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y(n) \text{cos} [n \theta] \quad (\text{D.8})$$

$$\dot{Y}(k) = E(k) + jF(k) \quad (\text{D.9})$$

Para compreender os resultados obtidos em (D.7), (D.8) e (D.9), considera-se novamente o sinal entrada $y(n) = \text{sen}(n\theta)$. Na Fig. 112 é ilustrado o produto entre a função de entrada $y(n) = \text{sen}(n\theta)$ e a função seno do filtro ($\text{sen} [(n + N_a - k) \theta]$), realizado em (D.7). Nesse caso, nota-se que a correlação entre as funções seno é constante, para as duas janelas de dados. Dessa maneira, pode-se concluir que a equação (D.7), retorna para a janela de dados calculada no instante $k = 5$ (Fig. 112 (b)) o mesmo valor já obtido para a janela de dados calculada no instante $k = 4$ (Fig. 112 (a)). Conseqüentemente, o

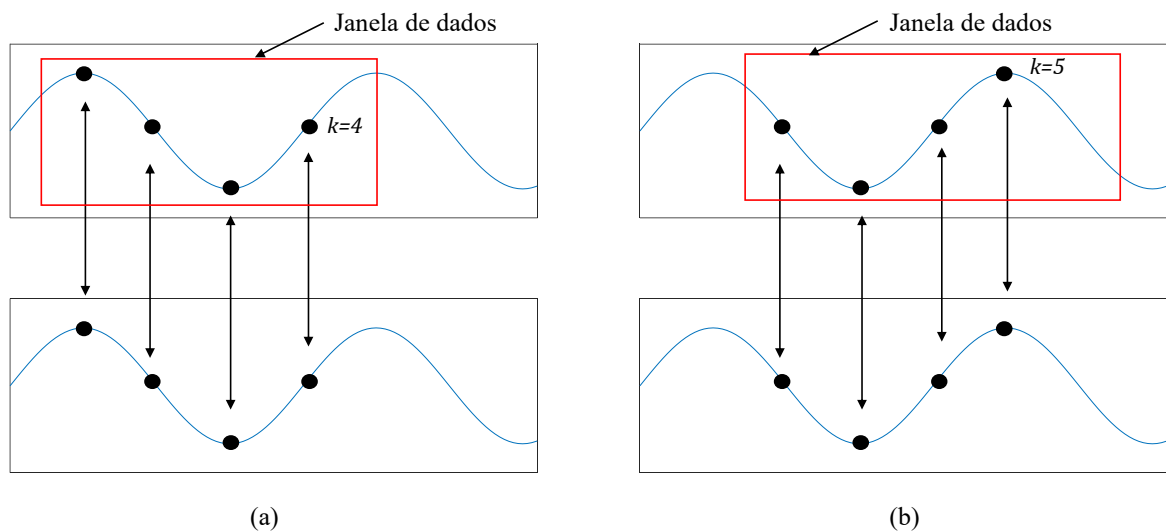


Figura 112 – Correção angular aplicada ao Filtro de Fourier não recursivo ($N_a = 4$). (a) Janela de dados no instante $k = 4$. (b) Janela de dados no instante $k = 5$.

coeficiente associado a parte real (E), dado em (D.7), é um valor constante. Essa análise também se aplica ao coeficiente associado a parte imaginária (F) definido em (D.8). Assim, como E e F são constantes, são estimados fasores estacionários em (D.12) para qualquer instante k .

Logo, as equações (D.7), (D.8) e (D.9), que consideram as correções angulares aplicadas ao filtro de Fourier de um ciclo não recursivo, podem ser reescritas como apresentadas nos Capítulos 4, 5 e 6. Portanto

$$E(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y(n) \operatorname{sen} [2\pi f_0 t(n)] \quad (\text{D.10})$$

$$F(k) = \frac{2}{N_a} \sum_{n=k-N_a+1}^k y(n) \operatorname{cos} [2\pi f_0 t(n)] \quad (\text{D.11})$$

$$\dot{Y}(k) = E(k) + jF(k) \quad (\text{D.12})$$

onde $t(n) = n \Delta t$.

Apêndice E

Filtro Passa Alta do Tipo Butterworth

Foi proposto neste trabalho um filtro passa alta, do tipo Butterworth de 4^a ordem ($N = 4$) e com frequência de corte de 30 Hz ($f_c = 30$ Hz), para selecionar a característica de interesse de (6.18), e assim obter um fasor de sequência negativa que gira na frequência ω^- , conforme obtido na equação (6.23).

Com relação às características, foi escolhido o filtro de Butterworth por este apresentar resposta plana na banda passante e por ser amplamente utilizado na área de proteção, principalmente com aplicações voltadas para eliminações de ruídos (Silveira, 2007). Foi utilizada a função *butter* do *matlab* para calcular os coeficientes da sua função de transferência, e os dados são filtrados utilizando a função *filter*, também disponível no *matlab*.

A respeito dos parâmetros desse filtro passa alta, pode-se dizer que a ordem ($N = 4$) e a frequência de corte ($f_c = 30$ Hz) foram definidas com o auxílio da resposta em frequência e dos testes realizados. Foram analisados três filtros. A partir da Fig. 113, é possível notar que o ganho na frequência de interesse (≈ 120 Hz) para os três filtros analisados é aproximadamente igual a 0 dB e, portanto, todos atendem quanto a esse

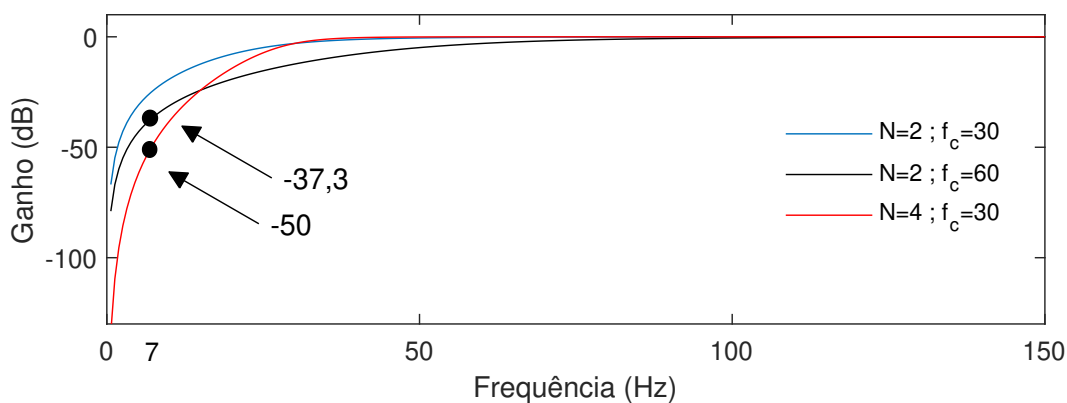


Figura 113 – Resposta em frequência. Filtro passa alta, tipo Butterworth ($f_s = 1920$ Hz).

critério. No entanto, quando é avaliada a banda de rejeição (≤ 7 Hz), é notório que o filtro escolhido ($N = 4$ e $f_c = 30$ Hz) possui maior capacidade de atenuação. Para exemplificar, pode-se observar que o filtro escolhido possui ganho de -50 dB na frequência de 7 Hz. Isso significa que o sinal de frequência igual a 7 Hz é dividido por aproximadamente 316. Já o filtro de ordem 2 ($N = 2$) e frequência de corte de 60 Hz ($f_c = 60$ Hz) possui ganho de -37,3 dB nessa frequência (7 Hz), o que significa uma atenuação menos eficiente. Nesse caso o sinal de frequência de 7 Hz é dividido por aproximadamente 73. Por fim, vale destacar que essa característica do filtro escolhido (maior capacidade em atenuar o sinal presente na faixa de rejeição) possibilitou o bom desempenho do algoritmo proposto ALG-B diante de todos os testes realizados, incluindo os casos reais de oscilações de potência.

Apêndice F

Filtro Passa Baixa do Tipo Butterworth aplicado a $\Delta\Phi_{ya2}$

Na Fig. 69 (c) foi mostrado que a diferença entre dois ângulos consecutivos ($\Delta\Phi_{ya2}$), durante oscilações de potência, é um valor constante e, embora não esteja apresentado, este resultado (valor constante) também tem sido observado quando calculado a partir de sinais trifásicos obtidos via software de simulação. No entanto, quando o cálculo é

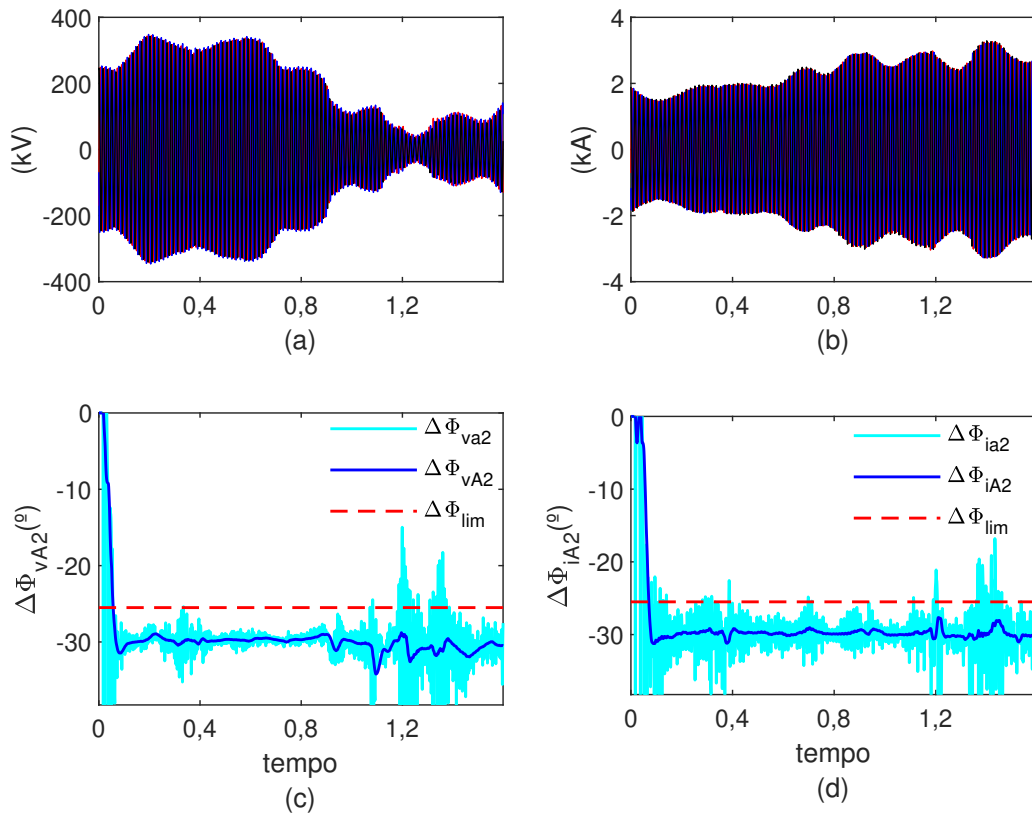


Figura 114 – Caso 2 de oscilação de potência real. (a) Sinais trifásicos de Tensão. (b) Sinais trifásicos de Corrente. (c) $\Delta\Phi_{vA2}$. (d) $\Delta\Phi_{iA2}$.

realizado a partir de oscilografias reais de oscilações de potência, $\Delta\Phi_{ya2}$ não é um valor constante. Nesse caso, são calculados $\Delta\Phi_{ya2}$ que oscilam ao redor de um valor central. Essas variações podem ser associadas a dinâmica do sistema elétrico real e as incertezas provenientes do sistema de medição, por exemplo. No entanto, aplicando uma filtragem passa baixa do tipo Butterworth, com frequência de corte $f_c = 15$ Hz e ordem $N = 2$, é possível eliminar os transitórios de $\Delta\Phi_{ya2}$ e assim obter $\Delta\Phi_{yA2}$, que representa uma resposta mais limpa e próxima a um valor constante durante oscilações de potência. A Fig. 114 ilustra $\Delta\Phi_{ya2}$ (anterior a filtragem) e $\Delta\Phi_{yA2}$ (filtrado), calculados a partir dos sinais trifásicos de tensão (y assume v) e corrente (y assume i), para o caso 2 de oscilação de potência real, apresentado na Fig. 105 da seção 6.4.