

Modelos para geração de sinais de oscilação de potência em linhas de transmissão para testes em relés de distância

Johnny S. Andrade*. Clever Pereira **
Alberto De Conti***

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil*
*Email: souza.johnny19@gmail.com
**Email: clever@ufmg.br
***Email: conti@cpdee.ufmg.br

Abstract: The distance relay tests of the functions designed to block and trip power swings in transmission lines require the use of voltage and current signals that characterize the phenomenon. The generation of such signals in non-commercial software is generally limited, as time, impedance velocities and trajectory parameters may not be available. This paper aims to present two models (test systems) for simulation of stable and unstable power swings, with parameterized trajectories, including the respective parameterization and numerical solutions adopted. The reading of the generated signals and the subsequent decision making (blocking, unlocking or tripping) is performed by the ANSI 68-78 protection functions implemented by the “Concentric Characteristics Method” (MCC) algorithm. The results were satisfactory in the simulated cases, since the instantaneous signals generated were able to perform the parameterized impedance path and the phenomenon could be correctly identified by the MCC.

Resumo: Os testes em relés de distância das funções destinadas ao bloqueio e disparo por oscilação de potência em linhas de transmissão demandam a utilização de sinais de tensão e corrente que caracterizem o fenômeno. A geração destes sinais em *softwares* não-comerciais é geralmente limitada, pois a parametrização de tempos, velocidades de impedância e trajetórias podem não estar disponíveis. Este artigo tem como objetivo apresentar dois modelos (sistemas teste) para simulação de oscilações de potência estáveis, instáveis e com trajetórias editáveis, incluindo-se as respectivas parametrizações e soluções numéricas adotadas. A leitura dos sinais gerados e a posterior tomada de decisão (bloqueio, desbloqueio ou *trip*) é realizada pelas funções de proteção ANSI 68-78, implementadas por meio do algoritmo “Método das Características Concêntricas” (MCC). Os resultados obtidos demonstraram-se satisfatórios, nos diversos casos simulados, dado que os sinais instantâneos gerados conseguiram realizar a trajetória de impedância parametrizada e o fenômeno pôde ser corretamente identificado pelo MCC.

Keywords: Distance relay; Out-of-Step; Power swing blocking; Power swing model; Transmission lines.

Palavras-chaves: Relé de distância; Perda de sincronismo; Bloqueio por oscilação de potência; Modelo de oscilação de potência; Linhas de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

A validação de funções de proteção para bloqueio e disparo por oscilação de potência em relés de distância é usualmente feita por meio da aplicação de sinais de tensão e corrente calculados em *softwares* comerciais. Nestes casos, a metodologia empregada consiste na geração de rampas de corrente e/ou tensão em modelos disponíveis nos *softwares* de caixas de testes, como disposto nos trabalhos de Verzosa (2013) e Salge (2011). Contudo, os algoritmos empregados nesses *softwares* e suas especificidades não são integralmente disponibilizados para os usuários, o que dificulta o teste de relés de proteção e lógicas de proteção virtuais implementados em programas computacionais como o ATP (*Alternative Transients Program*) e o MATLAB®.

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

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

Morais (2012). Essas estratégias, contudo, não permitem que o usuário especifique diretamente a trajetória da impedância vista pelo relé de distância, como usualmente ocorre em *softwares* comerciais. Isso limita a variedade dos testes que podem ser feitos nos algoritmos de relés virtuais, restringindo o número de condições de operação a que esses podem ser submetidos em simulações computacionais.

Neste trabalho, apresenta-se a descrição e o equacionamento de modelos que possibilitam a definição da trajetória da impedância, velocidade, ângulo de deslizamento e tempos associados ao fenômeno de oscilação de potência.

A implementação desses modelos no *software* MATLAB® permite ao usuário um controle de parâmetros análogo ao obtido em *softwares* comerciais na simulação do fenômeno de oscilação de potência. Esses modelos também servem como referência para uma implementação no ATP, o que se pretende fazer em etapa posterior a este trabalho.

2. MODELO PARA OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA ESTÁVEIS E INSTÁVEIS

2.1 Sistema equivalente de duas máquinas

O sistema equivalente de duas máquinas apresentado na Figura 1 possibilita a geração de oscilações estáveis e instáveis, inclusive com ocorrência de faltas durante a oscilação. As fontes de tensão trifásicas são consideradas equilibradas, e os equivalentes e a LT são modelados como circuitos do tipo “RL acoplado”.

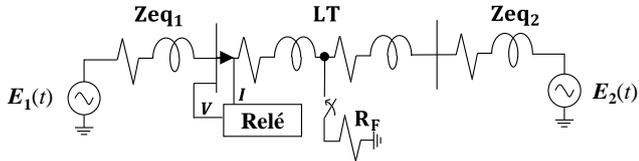


Fig. 1. Sistema para simulação de oscilações de potência.

O fenômeno oscilação de potência consiste na variação do fluxo de potência trifásico que ocorre nos terminais da LT, geralmente após distúrbios sistêmicos responsáveis pelo desequilíbrio carga-geração. Logo, o escorregamento de frequência caracteriza-se como a principal causa para oscilações de potência.

Para realização de uma oscilação estável ou instável basta que o ângulo de uma das fontes “deslize” em relação ao ângulo da outra fonte, o que fisicamente ocorre por desvios na frequência das máquinas. Para a solução do circuito da Figura 1 no MATLAB®, realizou-se a implementação do modelo numérico de um circuito RL trifásico acoplado, cuja dedução é descrita na seção a seguir.

2.2 Circuito RL Trifásico acoplado: modelo numérico

Este item tem por objetivo descrever o modelo no domínio do tempo discreto de um circuito RL trifásico acoplado, ilustrado na Figura 2, constituído de resistências e indutâncias próprias (R_p, L_p) e mútuas (R_m, L_m).

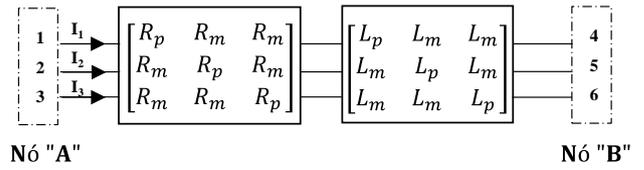


Fig. 2. Circuito RL trifásico acoplado.

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

$$V_A - V_B = (R + j\omega L)I \quad (1)$$

onde:

$$V_A = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}, V_B = \begin{bmatrix} V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \text{ e } I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

$$A[v_A(t) - v_B(t)] = ARi(t) + \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

Integrando-se no intervalo de $t - \Delta t$ a t , temos:

$$A \int_{t-\Delta t}^t [v_A(t) - v_B(t)] dt = AR \int_{t-\Delta t}^t i(t) dt + i(t) - i(t - \Delta t) \quad (4)$$

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

$$i(t) = G \Delta v(t) + I_{hist}(t - \Delta t) \quad (5)$$

onde:

$$[i(t)]_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}, [G]_{3 \times 3} = \left(AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} A \quad (6)$$

$$[\Delta v(t)]_{3 \times 1} = [v_a(t)]_{3 \times 1} - [v_b(t)]_{3 \times 1} \quad (7)$$

Em (6), o número “1” corresponde a uma matriz identidade de ordem 3x3. A cada iteração da solução numérica (5), a corrente histórica I_{hist} deve ser atualizada. Assim, a corrente histórica no instante t é dada por:

$$[I_{hist}(t)]_{3 \times 1} = G(1 + K)\Delta v(t) + K \cdot I_{hist}(t - \Delta t) \quad (8)$$

onde:

$$[K]_{3 \times 3} = \left(AR \frac{\Delta t}{2} + 1 \right)^{-1} \left(1 - AR \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (9)$$

Assim, o modelo numérico do circuito RL trifásico acoplado desenvolvido é apresentado na Figura 3.

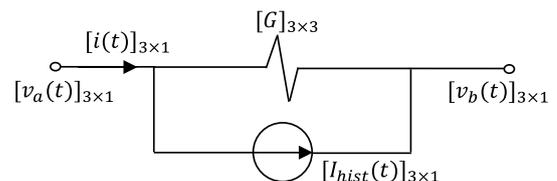


Fig. 3. Modelo numérico para circuito RL trifásico acoplado.

De posse da formulação anterior, a solução final do circuito equivalente de duas máquinas consiste na representação de cada ramo RL acoplado pelo respectivo modelo numérico, conforme apresentado na Figura 4.

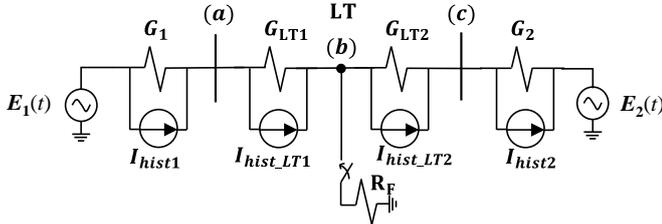


Fig. 4. Sistema de duas máquinas no domínio do tempo.

Destaca-se que, na Figura 4, as resistências representam matrizes de condutâncias de ordem 3×3 , conforme equação (6). As correntes históricas, por sua vez, correspondem a vetores de ordem 3×1 . Os índices “a”, “b” e “c” referem-se aos nós do circuito para montagem da matriz Ybarra. As fontes E_1 e E_2 são vetores de ordem 3×1 , constituídos das tensões nodais conhecidas. Assim, a solução numérica do circuito da Figura 4 é dada por:

$$[V]_{9 \times 1} = \begin{bmatrix} v_a(t)_{3 \times 1} \\ v_b(t)_{3 \times 1} \\ v_c(t)_{3 \times 1} \end{bmatrix} = [Y_{BUS}]_{9 \times 9}^{-1} [I(t)]_{9 \times 1} \quad (10)$$

$$[Y_{BUS}]_{9 \times 9} = \begin{bmatrix} (G_1 + G_{LT1}) & -G_{LT1} & 0 \\ -G_{LT1} & (G_{LT1} + G_{LT2} + G_F) & -G_{LT2} \\ 0 & -G_{LT2} & (G_2 + G_{LT2}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[I(t)]_{9 \times 1} = \begin{bmatrix} I_{hist1}(t) - I_{histLT1}(t) + G_1 \cdot E_1 \\ I_{histLT1}(t) - I_{histLT2}(t) \\ I_{histLT2}(t) - I_{hist2}(t) + G_2 \cdot E_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

A matriz de condutâncias G_F , de ordem 3×3 , contém as resistências de falta (R_F). Para simulação de um curto-circuito entre a fase A e a terra (AT), a matriz G_F contém apenas o elemento (1,1) não nulo. Já para um curto-circuito trifásico (3F), toda a diagonal da matriz é preenchida, como apresentado em (13).

$$[G_F]_{3 \times 3}^{AT} = \begin{bmatrix} R_F^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [G_F]_{3 \times 3}^{3F} = \begin{bmatrix} R_F^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & R_F^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & R_F^{-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A solução numérica descrita neste item foi validada por meio da comparação dos sinais instantâneos gerados no MATLAB com aqueles fornecidos pelo ATP, resultando em sobreposição de curvas.

2.3 Parametrização de oscilação de potência instável

Oscilações de potência do tipo instável são caracterizadas pela perda de sincronismo das máquinas. No plano RX, a trajetória da impedância cruza o eixo das reatâncias, passando pelo centro elétrico do sistema, com tendência de giro, em função do tempo do fenômeno. A trajetória da impedância é influenciada pela relação entre os módulos das tensões E_1 e E_2 . Neste trabalho é utilizado “ $E_1 > E_2$ ”, o que gera trajetórias circulares na parte superior do plano RX, conforme apresentado por Verzosa (2013).

Tomando-se a fase A como referência, uma oscilação instável pode ser obtida fazendo-se com que a fonte 1 tenha frequência angular “ ω_1 ”. Assim, temos:

$$\delta(t) = (\omega_1 - \omega_0)t \quad (14)$$

$$E_1(t) = E_{1\text{máx}} \cos(\omega_0 t + \delta(t)) \quad (15)$$

$$E_2(t) = E_{2\text{máx}} \cos(\omega_0 t) \quad (16)$$

A diferença “ $\omega_1 - \omega_0$ ” consiste em um deslize de frequência que ocasionará o avanço de uma fonte em relação à outra. No caso particular em que $\omega_1 = 2\pi 61$ e $\omega_0 = 2\pi 60$, a frequência da oscilação de potência será de 1 Hz, com período de 1 s, conforme mostrado no item 4.4 deste trabalho. Assim, em 0,5 s, a fonte 1 estará 180° adiantada da fonte 2.

2.4 Parametrização de oscilação de potência estável

Conforme descrito no item 2.1, durante o fenômeno oscilação de potência o ângulo entre as fontes varia ao longo do tempo. Uma oscilação estável consiste em uma situação de carga em que o sistema sofre um escorregamento, porém retorna ao estado estável (ângulo de carga fixo). Para a geração dos sinais nesta situação, basta definir uma função no tempo para o ângulo da fonte 1, mantendo-se constante o ângulo de carga da fonte 2. Na Figura 5 é apresentado o comportamento de $\delta(t)$ para a oscilação de potência estável.

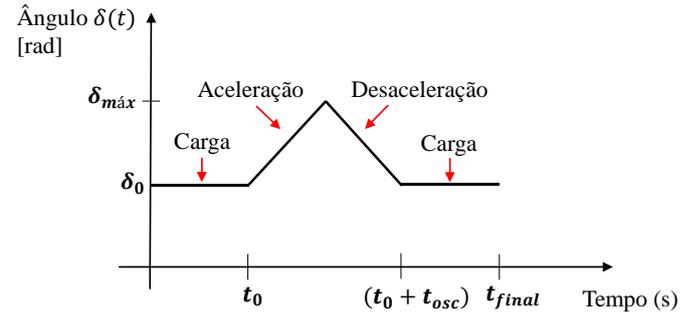


Fig. 5. Ângulo da fonte 1 em função do tempo.

Na Figura 5, δ_0 é o ângulo inicial da fonte 1, t_0 é o tempo de início da oscilação de potência, $\delta_{\text{máx}}$ é o ângulo máximo atingido pela fonte 1, t_{osc} é a duração da oscilação, e t_{final} é o instante de término da simulação. Um exemplo do efeito da variação do ângulo da fonte E_1 sobre a corrente e a tensão é mostrado na Figura 6. Em vermelho têm-se os sinais instantâneos (Fase A, nó “a”) e, em azul, os fasores estimados.

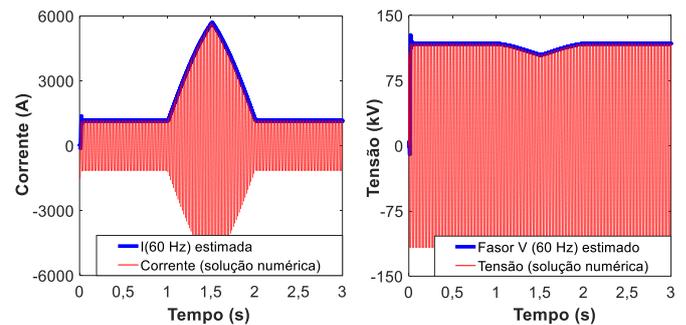


Fig. 6. Corrente e tensão durante oscilação estável.

Os fasores estimados neste trabalho foram obtidos utilizando-se o algoritmo “Fourier de um ciclo não-recursivo”. O fasor “ Z_{AT} ” que descreve a trajetória da impedância do *loop* da fase A para terra é apresentado na Figura 7. A parametrização definida neste caso foi de 1 s com ângulo inicial de 20°, seguido de 1 s de oscilação com ângulo máximo de 120°. Por fim, a fonte 1 retorna ao ângulo de 20° e permanece por 1 s, o que é confirmado pelas Figuras 6 e 7.

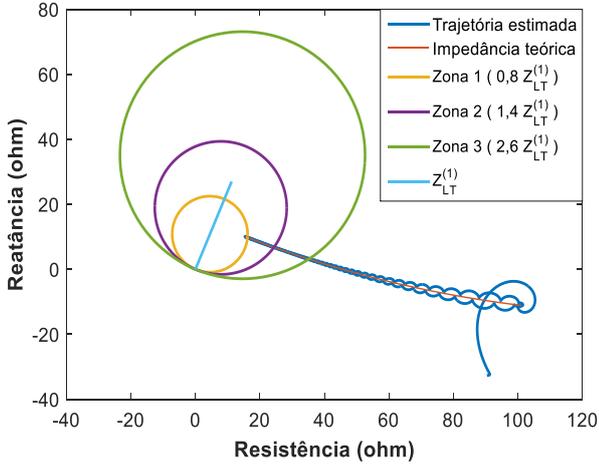


Fig. 7. Trajetória da impedância *loop* “AT” – Oscilação Estável parametrizada.

A trajetória teórica mostrada na Figura 7 foi obtida utilizando-se as formulações descritas no trabalho de Moraes (2012). Os parâmetros utilizados para LT e equivalentes estão listados na Tabela 1.

3. MODELO PARA GERAÇÃO DE OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA COM TRAJETÓRIAS EDITÁVEIS

3.1 Sistema equivalente

A geração de oscilografias a partir da definição da trajetória no plano RX é destinada apenas para testes das funções de proteção 68-78, haja vista não se tratar de algo fisicamente possível de ocorrer no sistema elétrico. O sistema utilizado constitui-se de um equivalente (fonte e impedância) com um ramo de impedância vista pelo relé, conforme Figura 8.

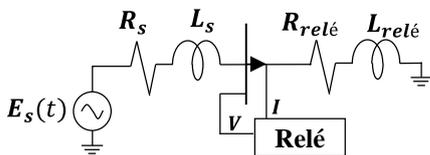


Fig. 8. Sistema de uma máquina para trajetória editável.

3.2 Parametrização da trajetória da impedância

A ideia central deste modelo consiste em se definir trajetórias formadas por segmentos de retas (Figura 9), especificando-se os pontos de início e fim, além da velocidade da impedância $\left| \frac{dZ}{dt} \right|$ constante (nomeada como ψ) em cada segmento, conforme descrito a seguir.

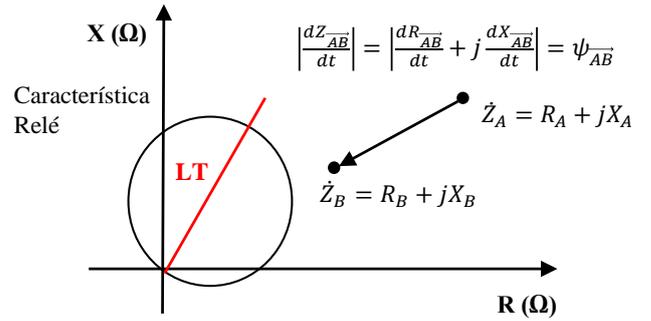


Fig. 9. Trajetória editável no plano RX.

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

$$t_{dz_{AB}} = \frac{|\dot{Z}_B - \dot{Z}_A|}{\left| \frac{dZ_{AB}}{dt} \right|} = \frac{\sqrt{(R_B - R_A)^2 + (X_B - X_A)^2}}{\psi_{AB}} \quad (17)$$

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

$$\frac{dR_{AB}}{dt} = \frac{R_B - R_A}{t_{dz_{AB}}} \quad (18)$$

$$\frac{dX_{AB}}{dt} = \frac{X_B - X_A}{t_{dz_{AB}}} \quad (19)$$

Assim, impedância vista pelo relé ($\dot{Z}_{relé}$) para um dado instante de tempo t é calculada como:

$$\dot{Z}_{relé}(t) = R_{relé}(t) + jX_{relé}(t) \quad (20)$$

$$\dot{Z}_{relé}(R, X, t) = \left(R_A + \frac{dR_{AB}}{dt} t \right) + j \left(X_A + \frac{dX_{AB}}{dt} t \right) \quad (21)$$

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

3.3 Solução numérica

No método descrito nesta seção, no instante em que a impedância cruza os eixos, os valores de R ou X tendem a valores próximos de zero, o que pode ocasionar erros numéricos caso seja utilizada solução baseada em correntes históricas. De forma a evitar tais situações, utiliza-se neste trabalho a solução fasorial em cada instante t , que fornece uma solução aproximada para o problema utilizando-se (22)-(25) para obtenção da corrente e da tensão vistas pelo relé.

$$i_a(t) = \frac{E_{s\text{máx}} \text{sen}(\omega_0 t - \varphi_{Z_t})}{|\dot{Z}_t|} \quad (22)$$

$$|\dot{Z}_t| = \sqrt{(R_s + R_{relé})^2 + (\omega_0 L_s + X_{relé})^2} \quad (23)$$

$$\varphi_{Z_t} = \cos^{-1} \left(\frac{R_s + R_{relé}}{|\dot{Z}_t|} \right), \text{ se } (\omega_0 L_s + X_{relé}) > 0 \quad (24)$$

$$\varphi_{Z_t} = 2\pi - \cos^{-1} \left(\frac{R_s + R_{relé}}{|\dot{Z}_t|} \right), \text{ se } (\omega_0 L_s + X_{relé}) < 0 \quad (25)$$

A validação da solução fasorial a cada instante de tempo foi realizada por meio de comparações com sinais gerados pelo MATLAB considerando a resposta completa da solução, para R e X diferentes de zero. Os resultados obtidos confirmaram a validade da solução aproximada, o que era esperado tendo em vista a variação lenta dos sinais testados e a constante de tempo do sistema.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 Metodologia de testes

Para interpretação das oscilografias geradas pelos modelos apresentados realizou-se a implementação computacional do Método das Características Concêntricas (MCC), descrito por Moraes (2012). Este método consiste na medição do tempo que a impedância demora para se deslocar de um *blinder* interno (BI) a outro externo (BE), ambos concêntricos às zonas de atuação. São utilizados os temporizadores OSBT (*Out-of-Step Blocking Time Delay*) e OST (*Out-of-Step Trip Delay*), os quais possibilitam a decisão de bloqueio ou *trip* por oscilação de potência, conforme descrito por Alves (2018). De posse dos sinais gerados utilizando-se $\Delta t = \frac{1}{3840}$ s são estimados os fasores corrente, tensão, trajetória da impedância e velocidade da impedância, com amostragem de 64 pontos por ciclo. Os parâmetros considerados nas simulações dos itens 4.2 e 4.3 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nas simulações.

Ajustes das zonas (pu)	$Z1 = 0,8, Z2 = 1,4, \text{ e } Z3 = 2,6$
Ajustes dos blinders (pu)	$BI = 1,5 \times Z2 \text{ e } BE = 2,2 \times Z3$
Parâmetros da LT	$Z_{LT}^{(1)} = 11,227959 + j27 \Omega$ $Z_{LT}^{(0)} = 27,733058 + j80,46 \Omega$
Parâmetros dos Equivalentes	$Z_{eq}^{(1)} = 0,1 \times Z_{LT}^{(1)}$ $Z_{eq}^{(0)} = 0,1 \times Z_{LT}^{(0)}$

4.2 Oscilação estável sem falta: trajetória editável

Uma trajetória típica de oscilação de potência estável consiste na entrada da impedância vista pelo relé nas zonas 2 e 3 com velocidade reduzida, obtida por meio de estudos de estabilidade eletromecânica. Na Figura 10 é apresentada uma trajetória parametrizada, no qual deseja-se avaliar a atuação do bloqueio por oscilação de potência.

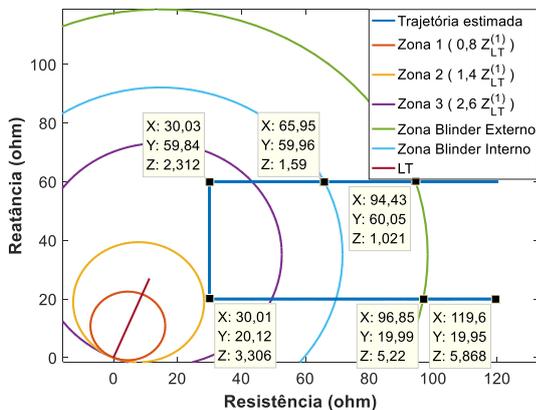


Fig. 10. Trajetória da impedância simulada.

O circuito elétrico para geração dos sinais é o da Figura 8, com $E_s = 144,9$ kV (tensão de linha eficaz), $R_s = 1,12 \Omega$ e $X_s = 2,7 \Omega$. Os valores de $R_{relé}$ e $X_{relé}$ são calculados em função dos pontos definidos para a trajetória. Os sinais instantâneos de corrente e tensão da Fase A que possibilitaram a geração da trajetória da Figura 10 são apresentados na Figura 11.

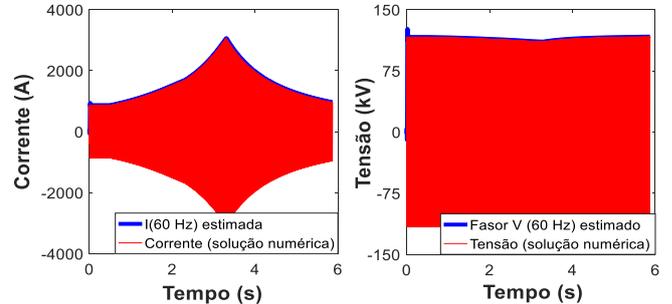


Fig. 11. Sinais instantâneos gerados para a trajetória simulada

Como pode ser observado na Figura 12, após $t_0 = 0,5$ s a velocidade da impedância estimada (50, 40 e 35 Ω/s) permanece constante durante cada trajetória linear definida, sendo detectadas somente pequenas alterações nas transições.

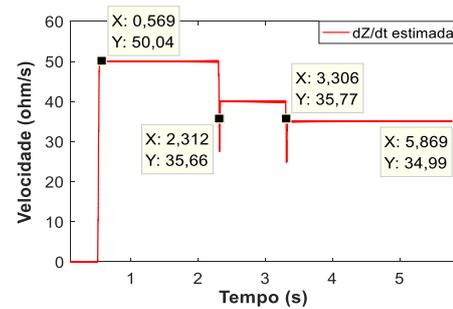


Fig. 12. Velocidade da impedância estimada.

O comportamento das funções de proteção 68-78 é resumido na Figura 13. O sinal “timer” contempla a medição de tempo em que a impedância está situada entre os *blindings*, iniciando-se junto com o sinal “pickup” após atravessar o BE. Considerando-se o tempo medido “ $t=569$ ms” e o ajuste “OSBD=500 ms”, constata-se a ocorrência de uma oscilação estável, possibilitando a decisão de bloqueio da função 21.

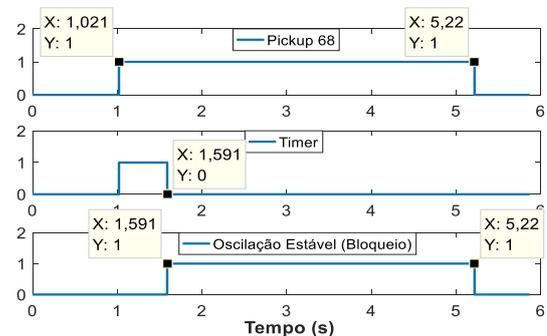


Fig. 13. Log de eventos das funções 68-78.

A obtenção dos fasores trajetória e velocidade de impedância similares à parametrização desejada, juntamente com a correta detecção do fenômeno pela função 68, reforça a validade do modelo para geração de oscilografias de oscilações de potência.

4.3 Oscilação estável com falta: Sistema equivalente de duas máquinas

Neste item é realizada a simulação de uma oscilação de potência estável com ocorrência de falta “AT” durante o período de oscilação, utilizando-se o sistema de duas máquinas do item 2.1 deste artigo, tendo $E_1 = 144,9$ kV e $E_2 = 138$ kV. A fonte 1 permanece com ângulo de 10° durante 1 s, iniciando uma oscilação de 2 s e ângulo máximo de 120° . Entretanto, antes do término da oscilação, na trajetória de retorno ocorre, no instante $t=2,5$ s, uma falta AT a 50% da LT, com 166,66 ms de duração. A corrente gerada para a fase A é apresentada na Figura 14.

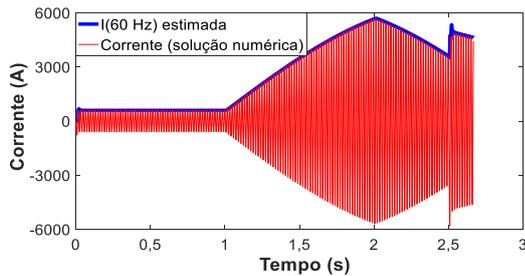


Fig. 14. Falta “AT” durante oscilação de potência.

A ocorrência da falta é detectada apenas pelo *loop* Z_{AT} em zona 1, como mostra a Figura 15. Pela trajetória estimada, percebe-se que quando o sistema passava por uma oscilação, todos os *loops* indicavam a mesma trajetória. No instante de falta as trajetórias são alteradas, e o algoritmo detecta falta no *loop* AT, desbloqueando a função 21.

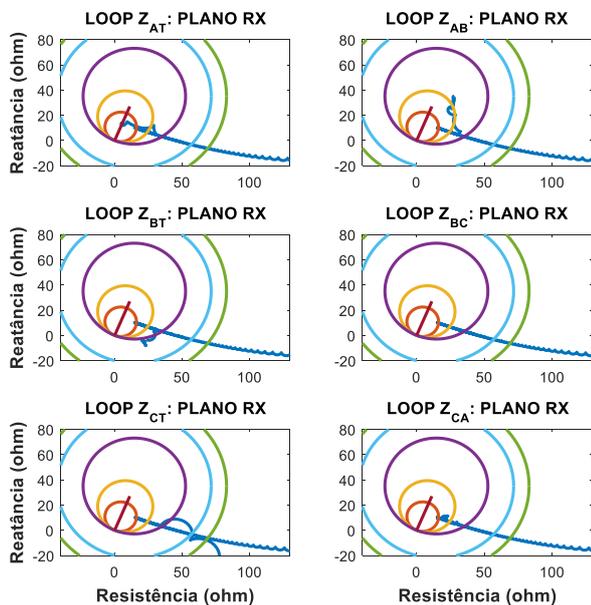


Fig. 15. Trajetória da impedância vista pelos *loops*.

4.4 Oscilação instável

A oscilação de potência instável simulada neste trabalho consistiu na utilização da frequência de 61 Hz na fonte E_1 e de 60 Hz na fonte E_2 , usando o modelo clássico de duas máquinas. A parametrização de tempo adotada foi de 2 s, o que possibilita identificação de dois ciclos, como visto na onda de corrente da Figura 16. Neste caso, a trajetória da

impedância passa pelo centro elétrico duas vezes, o que leva à instabilidade do sistema e atuação da função 78 por perda por sincronismo.

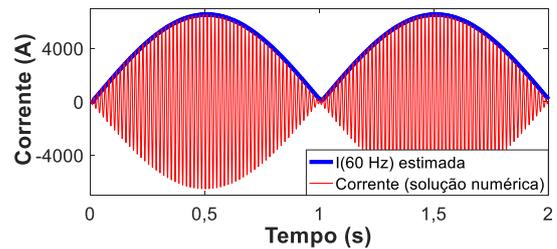


Fig. 16. Corrente durante oscilação instável.

5. CONCLUSÕES

A utilização do modelo numérico de um circuito RL trifásico acoplado, juntamente com a variação temporal dos parâmetros de uma das fontes de um sistema de duas barras, possibilitou a geração de oscilações de potência estáveis e instáveis parametrizáveis no MATLAB. A formulação apresentada permite a simulação de faltas durante a oscilação, o que é essencial para testes de relés de proteção e/ou de algoritmos em plataforma computacional. Destaca-se a descrição do modelo de uma máquina para a geração de trajetórias editáveis no plano RX, caracterizado pelo controle e total parametrização da oscilação. Neste modelo, oscilações estáveis e instáveis podem ser realizadas, desde que utilizadas velocidades de impedância compatíveis com a oscilação desejada.

Como proposta de trabalhos futuros, pretende-se implementar os modelos desenvolvidos na plataforma MODELS do ATP, contemplando a geração de oscilografias e algoritmos destinados ao bloqueio e disparo por oscilação de potência.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES – Brasil.

REFERÊNCIAS

- Alves, T. M. T. de. et al. (2018). Avaliação do desempenho de diferentes metodologias de bloqueio e disparo por oscilação de potência e perda de sincronismo utilizando um simulador digital de tempo real (RTDS). *XIV SPTC - Seminário Técnico de Proteção e Controle*, Foz do Iguaçu, PR.
- Morais, A. P. de. (2012). Algoritmo de alto desempenho para Proteção numérica de linhas de transmissão imune a oscilações de potência. 182 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- Salge, G. S. et al. (2011). Análise das metodologias de detecção de oscilações de potência e verificação do desempenho dos IEDs. *XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Florianópolis, SC.
- Verzosa, Q. Jr. (2013). Realistic Testing of Power Swing Blocking and Out-of-Step Tripping Functions. *66th Annual Conference for Protective Relay Engineers*.