

Formulações analíticas e numéricas para caracterização do fenômeno oscilação de potência em linhas de transmissão

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: This paper presents analytical and numerical formulations to characterize the power swing phenomenon in transmission lines. Systemic disturbances that affect the load-generation balance may cause rotor angle acceleration or delay of the synchronous generators in relation to the synchronous frequency, giving rise to power swings. The impact of this phenomenon on the transmission line terminals consists essentially of fluctuations in voltage and current values, which may cause improper actuation of the distance function (ANSI 21) in protective relays. In this work we use the classic two-machine model to obtain the current, voltage, active power, reactive power, impedance, and impedance velocities during oscillations. For such, analytical and numerical methods for the determination of both instantaneous and phasor quantities were implemented in MATLAB[®]. The behavior of the calculated signals and the effect of the power swing on the impedance trajectory in the RX plane of the distance relays are analyzed. To validate the solutions, simulations performed in the Alternative Transient Program (ATP) is used. Through the results it was possible to verify that the impedance speed and active power are the main variables that characterize the phenomenon, given that during a power swing the impedance speed is substantially lower than that of short circuits, and the active power flow varies cyclically in module and direction.

Resumo: Este artigo apresenta formulações analíticas e numéricas para caracterização do fenômeno oscilação de potência em linhas de transmissão. As perturbações sistêmicas que afetam o balanço carga-geração podem ocasionar a aceleração ou o atraso do ângulo do rotor dos geradores síncronos em relação à frequência síncrona, dando origem às oscilações de potência. O impacto deste fenômeno nos terminais das linhas consiste essencialmente em flutuações dos valores de tensão e corrente, podendo ocasionar atuação indevida da função de distância (ANSI 21) em relés de proteção. Neste trabalho é utilizado o modelo clássico de duas máquinas para obtenção das grandezas corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, impedância e velocidade da impedância, durante oscilações. Para isso, foram implementados no MATLAB[®] métodos analíticos e numéricos para a determinação de grandezas instantâneas e fasoriais. O comportamento dos sinais obtidos e o efeito da oscilação de potência na trajetória da impedância no plano RX dos relés de distância são analisados. Para validação das soluções empregadas é utilizado o *Alternative Transients Program* (ATP). Por meio dos resultados constatou-se que a velocidade da impedância e a potência ativa são as principais grandezas que caracterizam o fenômeno, visto que durante uma oscilação de potência a velocidade da impedância é substancialmente inferior à de curtos-circuitos, e o fluxo de potência ativa varia ciclicamente em módulo e direção.

Keywords: Distance relay; Impedance trajectory; Out-of-Step; Power swing; Rate of change of impedance; Transmission lines.

Palavras-chaves: Relé de distância; Trajetória da impedância; Perda de sincronismo; Oscilação de potência; Taxa de variação da impedância; Linhas de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno de oscilação de potência se caracteriza pela variação do fluxo de potência trifásico que ocorre quando o ângulo do rotor de um ou mais geradores do sistema de potência está avançado ou atrasado em relação à velocidade

angular síncrona. Trata-se de um transitório eletromecânico de constante de tempo relativamente elevada, cuja ocorrência se dá mediante a variação da frequência das tensões em uma ou mais barras do sistema. Esse fenômeno é causado por variações de módulo e ângulo da carga, chaveamento de linhas, perdas de geração, curtos-circuitos e outros distúrbios sistêmicos (IEEE PSRC WG D6, 2005).

A oscilação de potência resulta em flutuações de tensão e corrente em linhas de transmissão. Como consequência, verifica-se uma alteração na trajetória da impedância vista por relés de distância, que pode alcançar zonas de atuação da função de distância ANSI 21 e levar a uma atuação indevida. Nestes casos, funções de proteção destinadas ao bloqueio e disparo por oscilação de potência são necessárias, podendo contemplar métodos no domínio da frequência, como os descritos por Moraes (2012) ou no domínio do tempo, como o proposto por Menco (2018).

As simulações de oscilação de potência consistem geralmente na utilização do clássico sistema de duas máquinas, obtendo-se para esse sistema as grandezas instantâneas e fasoriais. A formulação analítica das grandezas fasoriais impedância e velocidade de impedância nesse sistema é apresentada no trabalho da North American Electric Reability Corporation - NERC (2013). Os fasores potência ativa e reativa durante oscilação de potência são apresentados no trabalho de Lin (2008), cuja formulação é utilizada para proposição de algoritmo no domínio do tempo.

Os trabalhos relacionados ao fenômeno oscilação de potência geralmente limitam-se à apresentação apenas das variáveis referente ao algoritmo de proteção utilizado, o que limita a compreensão geral do fenômeno. Dessa forma, o objetivo deste artigo consiste em obter e analisar todas as grandezas elétricas associadas ao fenômeno oscilação de potência, utilizando-se para isso metodologias analíticas e numéricas.

2. OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 Sistema equivalente de duas máquinas

O sistema equivalente para o estudo de oscilações de potência empregado neste trabalho é apresentado na Figura 1. Ele corresponde a um modelo simplificado de dois equivalentes de *Thévenin* separados por uma linha de transmissão (R_{12}, L_{12}). O sistema 1 é constituído pela fonte de tensão $E_1(t)$ e pelos elementos R_1 e L_1 , todos conectados à barra 1. O sistema 2 contempla a fonte de tensão $E_2(t)$ e os elementos R_2 e L_2 conectados à barra 2. A fonte $E_2(t)$ apresenta a velocidade síncrona de referência ($\omega_2 = 2\pi f_2$), enquanto a fonte $E_1(t)$ tem sua velocidade angular ($\omega_1 = 2\pi f_1$) alterada de forma a caracterizar sobrefrequência ou subfrequência. As tensões de fase das fontes, considerando-se a fase "A" como referência, são dadas por:

$$E_1(t) = E_{1\text{máx}} \cos(\omega_1 t + \beta_1) \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_{2\text{máx}} \cos(\omega_2 t + \beta_2) \quad (2)$$

O modelo da Figura 1 simula a linha e os sistemas equivalentes utilizando parâmetros concentrados. Considera-se, portanto, que a linha é eletricamente curta, de forma que o efeito de propagação possa ser desprezado. A condição inicial de fluxo de potência é dada pelos ângulos das tensões, representados por β_1 e β_2 , referentes aos sistemas 1 e 2, respectivamente. Visando à análise nodal de tensões e correntes, todas as tensões

nodais são apresentadas na Figura 1, sendo elas: $E_1(t)$, $E_s(t)$, $V_1(t)$, $E_{12}(t)$, $V_2(t)$, $E_r(t)$ e $E_2(t)$.

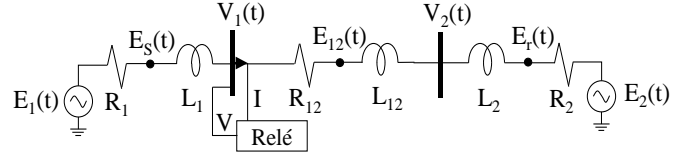


Fig. 1. Modelo utilizado para geração de oscilações de potência.

2.2 Solução analítica

Considerando que a oscilação de potência é um fenômeno equilibrado por natureza, a forma da resposta para todas as fases é semelhante, porém com defasamento angular de 120° . Assim, os cálculos subsequentes são realizados apenas para a fase A. Como as fontes possuem frequências distintas, uma solução possível para o circuito elétrico da Figura 1 é dada pelo teorema da superposição, considerando-se a contribuição da fonte 1, $i_{E1}(t)$, e a contribuição da fonte 2, $i_{E2}(t)$. Assim, a corrente $i_A(t)$ na linha de transmissão pode ser calculada como:

$$i_A(t) = i_{E1}(t) - i_{E2}(t) \quad (3)$$

$$i_{E1}(t) = \frac{E_{1\text{máx}}}{|Z_{T1}|} \left[\cos(\omega_1 t + \beta_1 - \theta_{T1}) - \cos(\beta_1 - \theta_{T1}) e^{-\frac{R_T}{L_T} t} \right] \quad (4)$$

$$i_{E2}(t) = \frac{E_{2\text{máx}}}{|Z_{T2}|} \left[\cos(\omega_2 t + \beta_2 - \theta_{T2}) - \cos(\beta_2 - \theta_{T2}) e^{-\frac{R_T}{L_T} t} \right] \quad (5)$$

$$|Z_{T1}| = \sqrt{(R_T)^2 + (X_{T1})^2} \quad (6)$$

$$|Z_{T2}| = \sqrt{(R_T)^2 + (X_{T2})^2} \quad (7)$$

$$X_{T1} = \omega_1 L_T = \omega_1 (L_1 + L_{12} + L_2) \quad (8)$$

$$X_{T2} = \omega_2 L_T = \omega_2 (L_1 + L_{12} + L_2) \quad (9)$$

$$R_T = R_1 + R_{12} + R_2 \quad (10)$$

$$\theta_{T1} = \tan^{-1} \frac{X_{T1}}{R_T} \quad (11)$$

$$\theta_{T2} = \tan^{-1} \frac{X_{T2}}{R_T} \quad (12)$$

Consequentemente, a tensão de fase na barra 1 pode ser obtida por:

$$V_1(t) = E_1(t) - R_1 i_A(t) - L_1 \frac{di_A(t)}{dt} \quad (13)$$

Em regime permanente, a expressão da corrente pode ser simplificada para:

$$i_A(t) = i_1(t) - i_2(t) \quad (14)$$

$$i_1(t) = I_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1 - \theta_{T1}) \quad (15)$$

$$i_2(t) = I_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2 - \theta_{T2}) \quad (16)$$

$$I_1 = \frac{E_{1\text{máx}}}{|Z_{T1}|} \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{E_{2\text{máx}}}{|Z_{T2}|} \quad (18)$$

De forma similar à formulação realizada no trabalho de Moraes (2012), para o caso particular em que, $I_1 = I_2$, utilizando-se

relações trigonométricas a corrente na fase A pode ser calculada a partir de:

$$i_A(t) = -2I_1 \sin(\alpha) \sin(\gamma) \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{2\pi(f_1 + f_2)t}{2} + \frac{\beta_1 + \beta_2 - \theta_{T1} - \theta_{T2}}{2} \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{2\pi(f_1 - f_2)t}{2} + \frac{\beta_1 - \beta_2 - \theta_{T1} + \theta_{T2}}{2} \quad (21)$$

$$f_{\text{slip}} = f_1 - f_2 \quad (22)$$

Em (19) verifica-se uma modulação em amplitude na qual o sinal fundamental gerado está contido em um envelope formado por outro sinal, cuja frequência é dada por f_{slip} . Portanto, é possível demonstrar que todas as grandezas elétricas instantâneas do circuito, quando da ocorrência do fenômeno, oscilam na frequência de escorregamento (f_{slip}), justificando-se as flutuações de tensão e corrente.

2.3 Solução no domínio do tempo discreto

A solução analítica apresentada no item 2.2 leva em consideração a ausência de não linearidades e que, cessada a componente exponencial, o circuito operará por um tempo relativamente longo. Contudo, para simulações com variação da frequência em um curto intervalo de tempo o método fasorial analítico pode não ser adequado, sendo necessário um método numérico. Neste trabalho, a solução numérica aplicada consiste no método nodal matricial que utiliza a integração trapezoidal para obtenção do modelo de indutor no domínio do tempo discreto (R_{L1}, R_{L12}, R_{L2}), conforme proposto por Dommel (1969), e que atualmente é utilizada no *Alternative Transients Program* (ATP). O circuito equivalente neste domínio é apresentado na Figura 2.

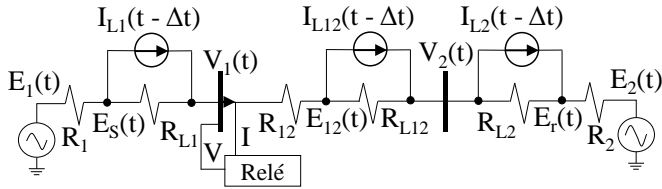


Fig. 2. Modelo no domínio do tempo discreto.

O equacionamento matricial do problema é apresentado em (23). A matriz $[Y]_{5 \times 5}$ constitui-se das admitâncias nodais, neste caso, condutâncias. Os elementos da diagonal principal correspondem às condutâncias conectadas a cada um dos nós, enquanto os demais termos correspondem ao negativo das condutâncias conectadas entre nós, conforme (24).

$$[v(t)]_{5 \times 1} = [Y]_{5 \times 5}^{-1} [i(t)]_{5 \times 1} \quad (23)$$

$$[Y]_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} R_1^{-1} + R_{L1}^{-1} & -(R_{L1}^{-1}) & 0 & 0 & 0 \\ -(R_{L1}^{-1}) & R_{L1}^{-1} + R_{L12}^{-1} & -(R_{L12}^{-1}) & 0 & 0 \\ 0 & -(R_{L12}^{-1}) & R_{L12}^{-1} + R_{L2}^{-1} & -(R_{L2}^{-1}) & 0 \\ 0 & 0 & -(R_{L2}^{-1}) & R_{L2}^{-1} + R_{L2}^{-1} & -(R_{L2}^{-1}) \\ 0 & 0 & 0 & -(R_{L2}^{-1}) & R_{L2}^{-1} + R_2^{-1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} E_S(t) \\ V_1(t) \\ E_{L12}(t) \\ V_2(t) \\ E_r(t) \end{bmatrix}_{5 \times 1} = [Y]_{5 \times 5}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{E_{1\text{max}}(t)}{R_1} - I_{L1}(t - \Delta t) \\ I_{L1}(t - \Delta t) \\ -I_{L12}(t - \Delta t) \\ I_{L12}(t - \Delta t) - I_{L2}(t - \Delta t) \\ I_{L2}(t - \Delta t) + \frac{E_{2\text{max}}(t)}{R_2} \end{bmatrix}_{5 \times 1} \quad (25)$$

O algoritmo atualiza os termos históricos $I_{L1}(t)$, $I_{L12}(t)$ e $I_{L2}(t)$ a cada passo (Δt) da iteração, utilizando para isso as tensões nodais obtidas em (25). Em (26) é apresentada a expressão utilizada para a atualização do termo histórico $I_{L1}(t)$. De forma análoga, as expressões para os demais termos históricos podem ser obtidas.

$$I_{L1}(t) = \frac{2[E_S(t) - V_1(t)]}{R_{L1}} + I_{L1}(t - \Delta t) \quad (26)$$

De posse das tensões nodais, calcula-se $i_A(t)$ como:

$$i_A(t) = \frac{E_1(t) - E_S(t)}{R_1} \quad (27)$$

Implementando-se no MATLAB® a solução analítica do item 2.2 e a solução numérica deste item obtêm-se as respostas de corrente e tensão na barra 1 ilustradas na Figura 3, constatando-se sobreposição de curvas. Os parâmetros arbitrariamente utilizados para fins de exemplificação foram: $R_1 = R_{L12} = R_2 = 1,2 \Omega$, $L_1 = L_{L12} = L_2 = 77,9859 \text{ mH}$, $E_{1\text{máx}} = 144,9 \sqrt{(2/3)} \text{ kV}$, $E_{2\text{máx}} = 138 \sqrt{(2/3)} \text{ kV}$, $\beta_1 = \beta_2 = 0$, $\omega_1 = 2\pi 61 \text{ rad/s}$ e $\omega_2 = 2\pi 60 \text{ rad/s}$.

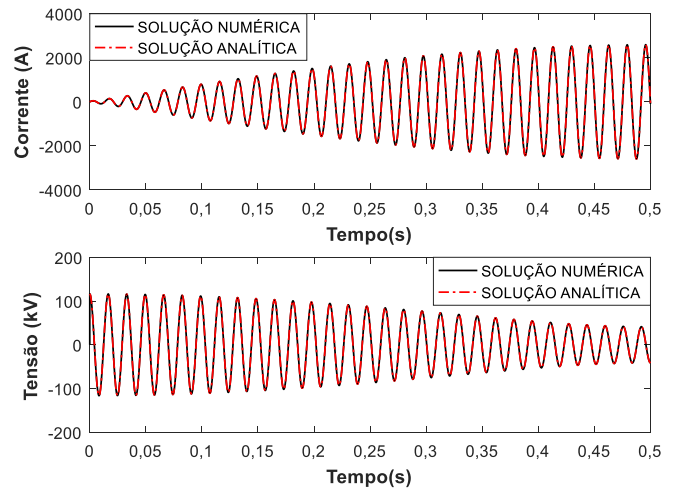


Fig. 3. Sinais instantâneos: Corrente $i_A(t)$ e tensão de fase $V_1(t)$ obtidas para as soluções numérica e analítica.

3. EFEITOS DAS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA NOS RELÉS DE DISTÂNCIA

3.1 Estimação fasorial

As soluções analítica e numérica apresentadas nos itens anteriores possibilitam a obtenção de sinais instantâneos de tensão, corrente e potência. Porém, tipicamente os algoritmos de relés de proteção realizam cálculos com base nos fasores de tensão e corrente, o que é realizado pela técnica de estimação fasorial. Neste trabalho é utilizado o algoritmo “Fourier de um ciclo não-recursivo”, o que é feito tendo em vista a possibilidade de comparação dos resultados com o ATP. Vale ainda destacar que os algoritmos baseados na Transformada Discreta de Fourier (TDF) tem uso mais frequente nos relés de proteção, conforme descrito por Silva (2014). A janela de dados do filtro contempla um ciclo com número de amostras (N_a) fixo de 64 pontos, resultando em uma frequência de amostragem de 3,84 kHz. As expressões utilizadas para obtenção das partes real (X_{ak}) e imaginária (X_{bk}) do fasor estimado, descritas no trabalho de Rocha (2016), são dadas de forma similar por:

$$X_{ak} = \frac{2}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} y_{k-n+1} \sin\left[(N_a - n) \frac{2\pi}{N_a}\right] \quad (28)$$

$$X_{bk} = \frac{2}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} y_{k-n+1} \cos\left[(N_a - n) \frac{2\pi}{N_a}\right] \quad (29)$$

Utilizando-se (28) e (29) obtêm-se os fasores tensão e corrente. Para cada fasor estimado tem-se o respectivo vetor y de amostras do sinal instantâneo, tendo tamanho definido em função do passo de tempo (Δt) adotado e tempo total simulado. Para cada amostra k é realizado um *loop* na janela de dados, com n variando da primeira amostra da janela de dados até a última ($n = 64$). Para uma próxima amostra tem-se o deslocamento da janela de dados, uma nova estimação do fasor e a repetição do processo de forma sucessiva.

3.2 Trajetória da impedância no plano RX

Durante oscilações de potência, a trajetória da impedância é alterada, podendo passar dentro da zona de atuação dos relés de distância. A análise das grandezas medidas pelo relé de distância é feita utilizando-se fasores. As impedâncias do circuito da Figura 1 podem ser escritas como:

$$\dot{Z}_{eq1} = R_1 + j\omega_2 L_1 \quad (30)$$

$$\dot{Z}_{12} = R_{12} + j\omega_2 L_{12} \quad (31)$$

$$\dot{Z}_{eq2} = R_2 + j\omega_2 L_2 \quad (32)$$

Definindo “ δ ” como o ângulo de defasagem angular da tensão \dot{E}_1 em relação à tensão \dot{E}_2 , tem-se que:

$$\delta(t) = (\omega_1 - \omega_2)t \quad (33)$$

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega_1 - \omega_2 \quad (34)$$

A impedância vista ($\dot{Z}_{RELÉ}$) por um relé de distância localizado na Barra 1 é calculada por meio dos fasores tensão da Barra 1 e corrente (\dot{I}_{LT}) que circula da barra 1 para a barra 2. Assim, conforme disposto em (IEEE PSRC WG D6, 2005), tem-se que:

$$\dot{I}_{LT} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\dot{Z}_T} \quad (35)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{Z}_{eq1} \dot{I}_{LT} \quad (36)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_{LT}} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_1 - \dot{E}_2} (\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}) - \dot{Z}_{eq1} \quad (37)$$

Definindo η como a relação entre os fasores de tensão, obtém-se:

$$\eta = \frac{E_1 \angle \delta}{E_2 \angle 0} = \left| \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} \right| \angle \delta \quad (38)$$

$$\dot{Z}_{RELÉ} = \frac{\eta}{\eta - 1} (\dot{Z}_{eq1} + \dot{Z}_{12} + \dot{Z}_{eq2}) - \dot{Z}_{eq1} \quad (39)$$

Por meio de (39) é possível verificar a trajetória da impedância durante uma oscilação de potência. O resultado no plano RX visto pelo relé é formado por trajetórias circulares na parte superior do eixo de reatâncias, quando $|\eta| > 1$, e círculos na parte inferior, quando $|\eta| < 1$, como ilustrado na Figura 4. Percebe-se que, quando $|\eta| = 1$, a trajetória da impedância consiste em um círculo de raio infinito, aproximando-se de uma reta que passa pelo centro elétrico do sistema, definido como o ponto no plano RX quando $\delta = 180^\circ$. Para o caso particular $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2|$, o centro elétrico coincide com o ponto médio da impedância total (\dot{Z}_T) entre as fontes E_1 e E_2 .

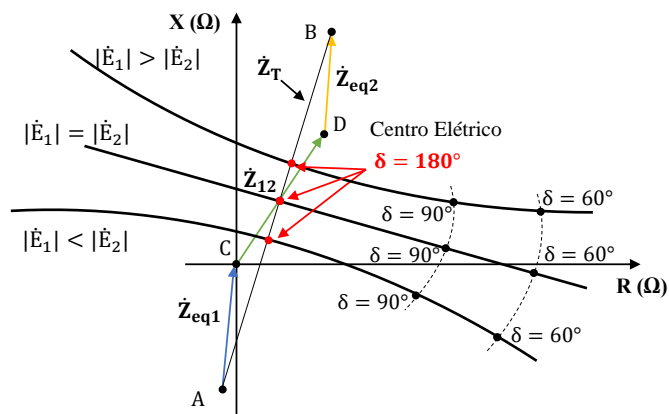


Fig. 4. Trajetórias de impedâncias considerando as tensões \dot{E}_1 e \dot{E}_2 , adaptado de (IEEE PSRC WG D6, 2005).

A Figura 5 apresenta diversas trajetórias de impedâncias obtidas utilizando (39), semelhantes às trajetórias apresentadas por Martuscello et al. (2009). Os parâmetros utilizados são $\dot{Z}_{eq1} = \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{eq2} = 1,2 + j29,4 \Omega$. Cada trajetória representada por uma linha contínua é obtida mantendo-se fixo $|\eta|$ e variando-se δ . Cada trajetória representada por uma linha tracejada é obtida mantendo-se fixo δ e variando-se $|\eta|$. As curvas apresentadas foram obtidas para $|\eta| = 0,4878$ até $|\eta| = 2,05$, e ângulos de 30° a 330° .

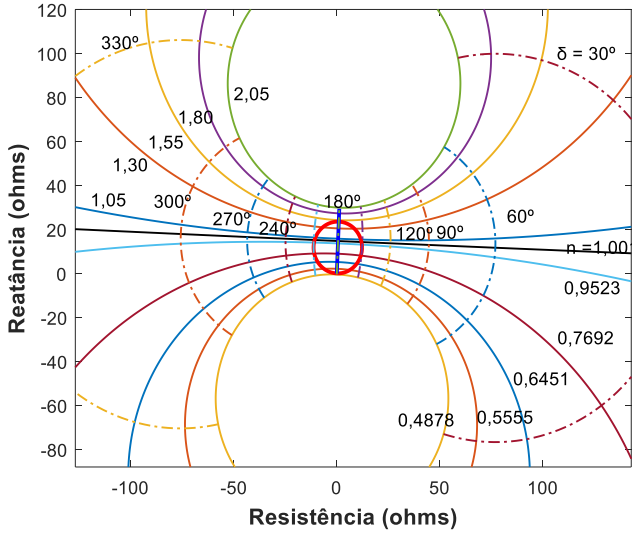


Fig. 5. Trajetórias de impedâncias vista pelo relé na barra 1 obtidas no MATLAB®.

Como pode ser observado, quando $\delta=180^\circ$ a impedância passa pelo centro elétrico. No centro da Figura 5 tem-se um círculo vermelho, o qual representa a Zona 1 ajustada no relé da barra 1, contemplando 80% de \dot{Z}_{12} . Considerando-se que durante uma oscilação de potência a trajetória da impedância pode alcançar as zonas de atuação do relé, esquemas de bloqueio por oscilação são imprescindíveis para inibição dos sinais de *trip* da função 21 em relés de distância. A função ANSI 68 é dedicada a essa tarefa, sendo empregados diversos métodos. Nos casos de oscilação instável, ou seja, quando a trajetória cruza a curva $\delta = 180^\circ$, pode ser necessário o disparo por perda de sincronismo, função ANSI 78.

3.3 Cálculo da velocidade da impedância

Utilizando-se (34) e (22), e as formulações descritas no trabalho de T. Okoń e K. Wilkosz (2011), é possível constatar que:

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta t} = \Delta\omega = 2\pi f_{\text{slip}} \quad (40)$$

Logo, é nítido que a velocidade angular relativa da fonte E_1 em relação à fonte E_2 é constante, dada pela frequência de oscilação (f_{slip}). Assim, o tempo necessário para a trajetória da impedância percorrer uma dada diferença angular (trajetória tracejada da Figura 4) pode ser calculado por:

$$\Delta t = \frac{\Delta\delta}{2\pi f_{\text{slip}}} \quad (41)$$

No caso particular em que $f_{\text{slip}} = 1$ Hz, o tempo necessário para a impedância alcançar o centro elétrico ($\delta = 180^\circ$) é de 0,5 s. Pela Figura 5, constata-se que a distância entre as trajetórias tracejadas (ângulos) não é uniforme, embora o tempo para deslocamento entre elas seja o mesmo, dado por (41). Quando da ocorrência de um curto-circuito, a impedância vista pelo relé salta instantaneamente para a zona de atuação, o que tipicamente permite relés atuarem em menos de 50 ms. Assim, é perceptível que durante a oscilação de potência a velocidade

da impedância é substancialmente inferior à de um transitório de curto-circuito. Conforme discutido por Fisher et al. (2012), derivando-se (39) em relação ao tempo pode-se demonstrar que, para o caso particular $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2|$, obtém-se:

$$\left| \frac{d\dot{Z}_{\text{RELÉ}}}{dt} \right| = \frac{|\dot{Z}_T|}{4 \left[\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right]^2} |2\pi f_{\text{slip}}| \quad (42)$$

Como pode ser observado em (42), a velocidade da impedância durante uma oscilação de potência é função das impedâncias associadas que constituem a impedância total, e do escorregamento de frequência δ entre as fontes, o que deve ser levado em consideração para o desenvolvimento de algoritmos de bloqueio e disparo por oscilação de potência.

3.4 Cálculo das potências ativa e reativa

As potências ativa (P) e reativa (Q) estimadas pelo relé são calculadas utilizando-se estimação fasorial, obtendo-se as grandezas na frequência fundamental da fonte E_2 (referência). As equações analíticas que descrevem estes fasores são demonstradas no trabalho de Xiangning et al. (2018).

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 Metodologia de testes

Para análise das grandezas elétricas equacionadas nos itens anteriores foi realizada implementação no *software* MATLAB® e modelagem do circuito da Figura 6 no ATP. A rotina computacional desenvolvida consiste na solução matricial numérica para obtenção dos sinais instantâneos de corrente, tensão e potência. Na sequência, é realizada estimação fasorial pelo filtro de Fourier e aplicação de um filtro passa baixas Butterworth de 9ª ordem, com frequência de corte de 90 Hz. Obtêm-se então os fasores de corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, impedância e velocidade da impedância.

4.2 Modelo implementado no ATP

Na Figura 6 é apresentado o sistema elétrico utilizado para simulação da oscilação de potência, que é equivalente ao modelo da Figura 1. Todos os sinais instantâneos e fasoriais obtidos foram calculados pelo relé localizado na barra 1.

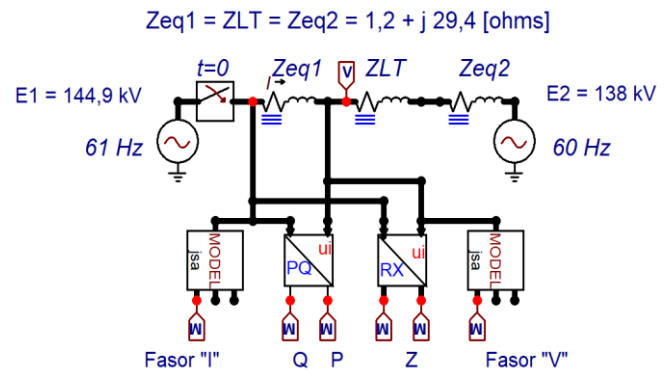


Fig. 6. Sistema Elétrico modelado no ATP.

As grandezas elétricas instantâneas corrente, tensão e potência podem ser obtidas de forma direta no ATP. Já o cálculo de fasores requer a utilização de blocos específicos, disponíveis na plataforma “MODELS”. Os blocos para o cálculo dos fasores corrente e tensão são do tipo “MODEL ABC2PHR”. Como as variáveis de saída são as partes real e imaginária das grandezas, fez-se necessária a modificação do bloco para obtenção do módulo do fasor, gerando um novo bloco intitulado “jsa”. Os fasores de potência ativa e reativa são obtidos utilizando-se o bloco “MODEL UI2PQ3”. Já o plano RX visto pelo relé de proteção é do tipo “MODEL UI2RX”. Em todos os blocos da Figura 6, o algoritmo adotado é o “8-point RADIX-2”, opção “0” na entrada de dados no ATP.

4.3 Sinais instantâneos de corrente, tensão e potência

Na Figura 7 são apresentados os sinais instantâneos de tensão, corrente e potência calculados no MATLAB® e no ATP. Percebe-se que as diferenças entre os resultados obtidos em ambas as plataformas são desprezíveis. É importante destacar que os sinais apresentam envoltória com frequência de 1 Hz, haja vista a diferença de frequência simulada entre as fontes. Em $t=1$ s, tem-se a finalização de um ciclo de oscilação, iniciando-se o próximo ciclo, caracterizando um valor elevado de impedância vista pelo relé.

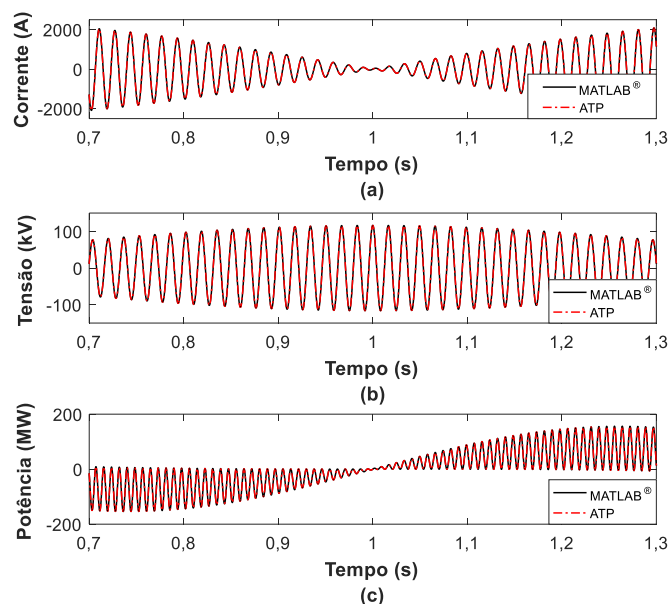


Fig. 7. Sinais instantâneos de corrente (a), tensão (b) e potência monofásica (c) obtidos no MATLAB® (solução numérica) e ATP.

4.4 Fasores corrente, tensão e potência ativa

Na Figura 8 são apresentados os módulos dos fasores corrente, tensão e potência monofásica obtidos no MATLAB®. Como pode ser observado, os valores lidos pelo relé são pulsantes ao longo do tempo. Em $t=0,5$ s, percebe-se a pior situação para a proteção de distância, pois tem-se corrente máxima e tensão mínima, o que gera baixo valor de impedância, fazendo com que a impedância vista pelo relé esteja sobre a linha de transmissão no plano RX, semelhante ao que ocorre em uma falta trifásica.

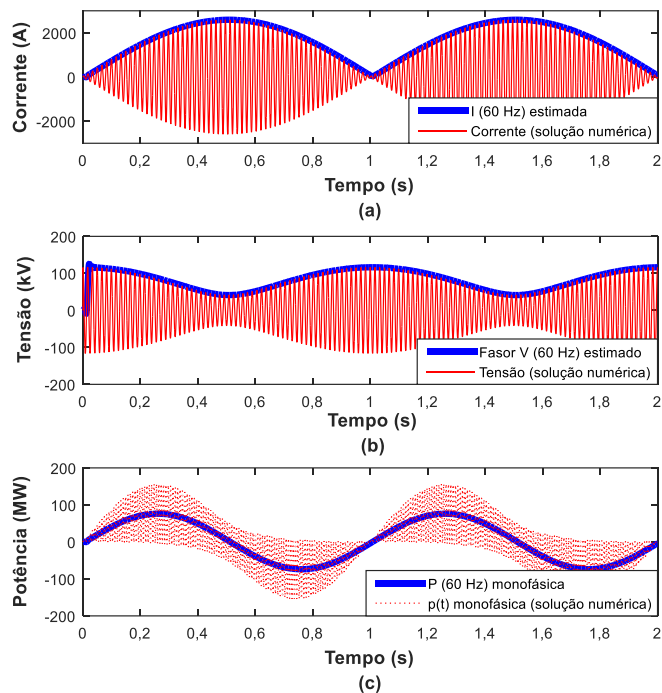


Fig. 8. Fasores de corrente (a), tensão (b) e potência (c) monofásica, juntos com os respectivos sinais instantâneos.

É importante observar que a potência ativa monofásica caracteriza-se como o valor médio da potência instantânea monofásica. Constata-se ainda que no primeiro semiciclo a potência ativa é positiva, demonstrando que a fonte E_1 está enviando potência à fonte E_2 . Após $t = 0,5$ s, o fluxo de potência ativa é invertido, fazendo com que a fonte E_2 envie potência ativa à fonte E_1 . A oscilação em módulo e direção com a frequência f_{slip} dá origem ao nome do fenômeno.

4.5 Plano RX

A impedância vista pelo relé de distância é a principal variável a ser analisada durante o fenômeno. Na Figura 9 são apresentados os planos RX obtidos no MATLAB® e no ATP. Considerando que E_1 é 5% superior a E_2 , a trajetória da impedância localiza-se na parte positiva do eixo de reatâncias.

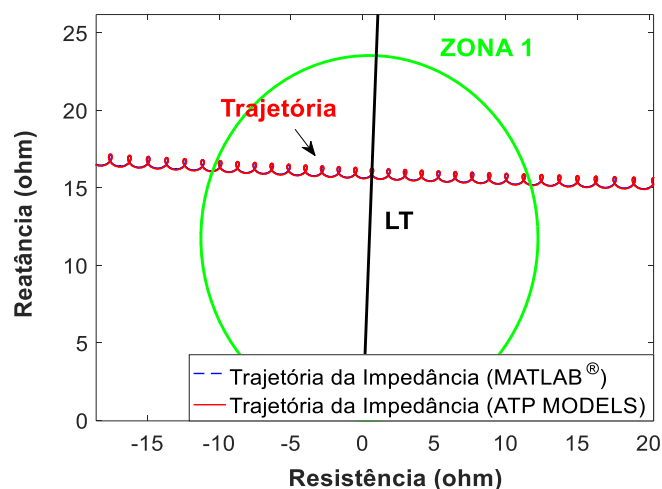


Fig. 9. Plano RX no MATLAB® e ATP.

Como se vê, os planos RX gerados pelos dois *softwares* apresentam o mesmo comportamento. Consta-se que a impedância apresenta um perfil oscilatório na forma de laços, o que se dá em função de erros de estimação fasorial. Na Figura 9 percebe-se a trajetória da impedância passando pela zona 1 do ajuste do relé (tipicamente 80% de Z_{12}). Verifica-se que como as impedâncias dos equivalentes e da linha de transmissão são iguais, a trajetória da impedância cruza a linha de transmissão próximo à metade desta, no centro elétrico do sistema. Na Figura 10 é apresentado o gráfico da velocidade da impedância contemplando as curvas teórica (cálculo analítico) e a curva obtida por meio da estimação fasorial.

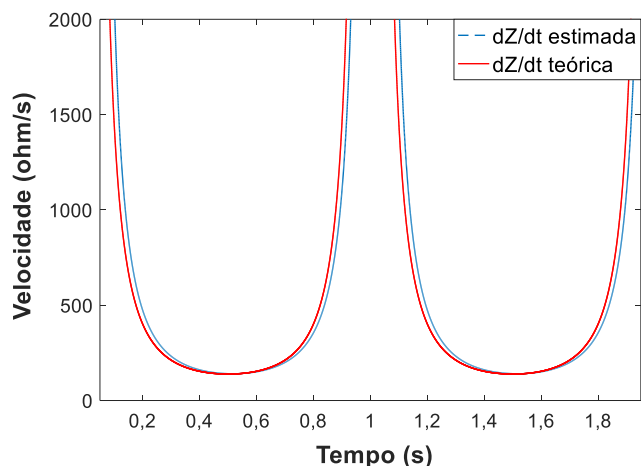


Fig. 10. Velocidade da impedância.

Considerando-se que (42) é obtida para o caso particular $|\vec{E}_1|=|\vec{E}_2|$, apenas nesta simulação foram consideradas ambas tensões como 138 kV. Como já era previsto, em $\delta=180^\circ$, ou seja, $t = 0,5$ s, a menor velocidade é obtida, pois é o instante em que a impedância está cruzando o centro elétrico do sistema.

5. CONCLUSÕES

As técnicas numéricas e analíticas apresentadas neste trabalho possibilitam a análise do comportamento das principais grandezas de interesse durante uma oscilação de potência. Quando uma linha de transmissão é submetida a uma oscilação de potência, os relés instalados em seus terminais identificam flutuações nos fasores tensão e corrente, propiciando alternância cíclica na direcionalidade e no módulo do fluxo de potência ativa. Os sinais instantâneos de corrente, tensão e potência apresentam modulação em amplitude, constituída por uma envoltória pulsante, cuja frequência é dada pelo escorregamento em relação à frequência síncrona.

Verificou-se que embora a trajetória da impedância vista pelo relé possa alcançar as zonas de atuação da função 21 durante o fenômeno, tendo em vista o ângulo máximo de deslizamento alcançado, sua velocidade é substancialmente inferior à de curtos-circuitos, sendo este um critério tradicional para detecção de oscilações de potência. Destaca-se ainda que a ocorrência de oscilações em uma dada linha depende das impedâncias e tensões de seus equivalentes, os quais influenciam na formação do centro elétrico.

Assim, a velocidade da impedância e a potência ativa mostraram-se como as principais grandezas que caracterizam o fenômeno. Estas são, portanto, relevantes para algoritmos para bloqueio e disparo por oscilação de potência. Os resultados possibilitam a caracterização do fenômeno e fomentam o desenvolvimento de novos algoritmos de relés para bloqueio e disparo durante oscilações de potência.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Dommel, H. W. (1969). Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks. IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, pp. 388-399.
- IEEE PSRC WG D6 (2005). Power Swing and Out-Of-Step Considerations on Transmission Lines. Working Group D-6 Report, p. 1-59.
- Fisher, N. et al. (2012). Tutorial on Power Swing Blocking and Out-of-Step Tripping. 39th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington.
- Martuscello, P. E. L. et al. (2009). Tests of Distance Relay Performance on Stable and Unstable Power Swings Reported Using Simulated Data of the August 14th 2003 System Disturbance. Power Systems Conference, March, Clemson, SC, USA.
- Menco, C. A. L (2018). “Método para detecção de oscilação de potência no domínio do tempo”. 2018. 101 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- 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.
- NERC – North American Electric Reliability Corporation (2013). Protection System Response to Power Swings. System Protection and Control Subcommittee. August.
- Rocha, R. V. (2016). “Algoritmos Recursivos e Não-Recursivos Aplicados à Estimação Fasorial em Sistemas Elétricos de Potência”. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Silva, C. D. L da (2014). “Estimação Fasorial aplicada a relés de proteção numéricos utilizando os métodos de ajuste de curvas e redes neurais artificiais”. Dissertação (mestrado) -Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- T. Okoń and K. Wilkosz (2011), "Setting methods of the impedance type power swing blocking functions applied in distance protections," Acta Energetica, vol. 3, no. 8, pp. 61-67, Jul.
- X. Lin, et al. (2008). A novel scheme to identify symmetrical faults occurring during power swings. IEEE Transactions on Power Delivery v.23, n.1, p. 73-78.