Método de Broyden aplicado à Estimação de Impedância da Rede

Jefferson R. P. de Assis * **Andréia da S. Gomes** ** **Carlos A. Urzagasti** ** **Alfeu J. Sguarezi Filho** *** **Fabiano F. Costa** **** **Maurício B. R. Corrêa** † **Darlan A. Fernandes** **

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: jefferson.assis@ee.ufcg.edu.br).*
** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, (e-mail: andreia.gomes@cear.ufpb.br, carlos.urzagasti@estudante.cear.ufpb.br, darlan@cear.ufpb.br)*
*** *CECS, Universidade Federal do ABC, Santo André, (e-mail: alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br)*
**** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, (e-mail: fabiano.costa@ufba.br)*
† *Instituto de Computação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, (e-mail: mauricio@ic.ufal.br)*

Abstract: In this work, it is presented the use of the Broyden method as an alternative to the traditional Newton-Raphson method for online impedance estimation of an electrical grid. The estimation procedure used is based on the variation of active and reactive power injected into the grid by a three-phase inverter. To demonstrate that the Broyden method presents as a satisfactory substitute for the Newton-Raphson method, the performance of these two methods was compared taking into account the percentage error, processing time, and number of iterations during estimation. The analysis of the performance of the methods was carried out through real-time simulations.

Resumo: Neste trabalho, apresenta-se a utilização do método de Broyden como alternativa ao tradicional método de Newton-Raphson para estimação *online* de impedância de uma rede elétrica. O procedimento de estimação utilizado baseia-se na variação de potência ativa e reativa injetada na rede por um inversor trifásico. Para demonstrar que o método de Broyden apresenta-se como um substituto satisfatório ao método de Newton-Raphson, o desempenho destes dois métodos foi comparado levando-se em consideração o erro percentual, tempo de processamento e número de iterações durante a estimação. A análise do desempenhos dos métodos foi realizada através de simulações em tempo real.

Keywords: Online Impedance Estimation; Numerical methods; Broyden.
Palavras-chaves: Estimação *Online* de Impedância ; Métodos Numéricos; Broyden.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve um aumento significativo na conexão de Sistemas de Geração Distribuída (SGD) baseados em fontes renováveis com a rede elétrica das distribuidoras de energia. A proporção de produção de energias renováveis em todo o mundo deve aumentar de 29% em 2022 para 35% em 2025 International Energy Agency - IEA (January 2022).

A qualidade e a estabilidade da energia em sistemas conectados à rede por meio de conversores eletrônicos de potência, como energia fotovoltaica e carregadores de veículos elétricos, têm se tornado um ponto de atenção em todo o mundo Ahmad and Zhang (2020). Portanto, ferramentas e métodos para identificar e mitigar fenômenos relacionados a instabilidade devem ser desenvolvidos Blaabjerg et al. (2006); Ahmad and Zhang (2020).

Uma das causas mais comuns de instabilidade e problemas de qualidade de energia é a interação entre a impedância da rede e a impedância do inversor Sun (2011). Os conversores eletrônicos de potência ainda carecem de ferramentas de diagnóstico necessárias para detectar situações de instabilidade originadas por variações de impedância da rede. As tensões e correntes de saída no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) podem ser monitoradas e registradas para facilitar o diagnóstico Fang et al. (2021).

As fontes de geração distribuídas conectadas à rede de distribuição das concessionárias de energia podem causar instabilidade no sistema se não forem projetadas corretamente Blaabjerg et al. (2004). Mais especificamente, problemas de estabilidade do sistema podem ser causados por uma alta impedância da rede Liserre et al. (2006); Sun (2011). Portanto, métodos para estimar esta impedância são cruciais para garantir a confiabilidade do sistema.

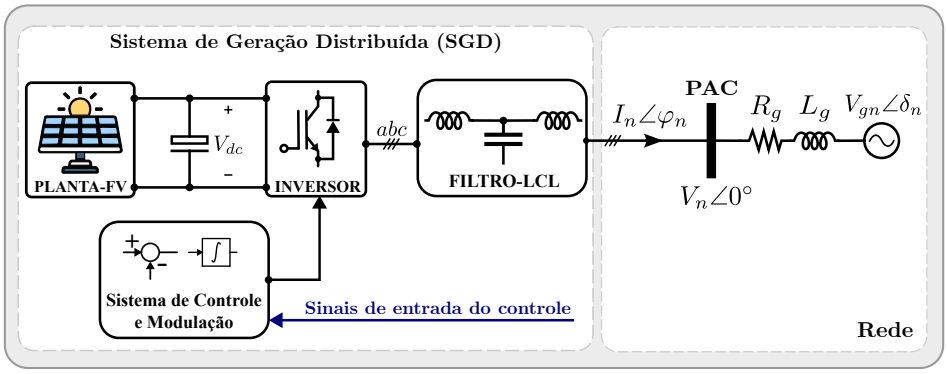


Figura 1. SGD com fonte primária fotovoltaica.

A impedância da rede elétrica à qual um inversor está conectado pode ser utilizada para fazer melhorias no sistema de controle, impactando a estabilidade do sistema Liserre et al. (2006).

Os métodos de estimação da impedância da rede são divididos em dois grupos principais Sun (2022). No primeiro, estão os métodos não invasivos, estes, utilizam apenas correntes e tensões para atingir o objetivo. Porém, vale frisar que a tensão e a corrente observadas mudam sempre que a rede sofre qualquer alteração no carregamento. É imperativo que essas variações não ocorram no intervalo e na taxa de repetição necessários para realizar a estimação de impedância da rede Pedersen et al. (2003).

No segundo grande grupo estão as chamadas técnicas invasivas, que são aquelas onde perturbações controladas são aplicadas à rede ou no sistema de controle Cobreces et al. (2009). Há uma predominância dessas metodologias para SGD, a razão é que estas perturbações podem ser introduzidas pelo próprio inversor. Além disso, esses métodos apresentam maior precisão na estimativa da impedância da rede Pedersen et al. (2003).

Em Timbus et al. (2004) apresenta-se um a aplicação de um método invasivo, no qual a estimação da impedância da rede foi realizada por meio de uma relação entre uma perturbação harmônica injetada e a corrente de saída medida no inversor. Em Sun et al. (2022) um analisador de rede foi utilizado para caracterizar o impedância em frequências entre 20 e 24 Hz.

A técnica adotada neste trabalho foi apresentada em Gomes et al. (2022). Esta, baseia-se em variações consecutivas de potência ativa e reativa, mais precisamente em três níveis de potência diferentes. Mudanças nos fasores de tensão e corrente no PAC são monitoradas através de suas componentes de sequência e então a impedância da rede é estimada através do método de Broyden e Newton-Raphson para fins de comparação entre ambos. Vale ressaltar que as variações de potência que são impostas por este método concentram-se na frequência fundamental, portanto, as distorções harmônicas naturais do sistema são preservados e não acentuadas.

Neste trabalho, o uso do método de Broyden (BD) é proposto como uma alternativa frente ao tradicional método de Newton-Raphson (NR) para realizar o estimação *online* da impedância da rede à qual um sistema fotovoltaico esteja conectado. Quando utilizado no contexto de estimações de impedância, o termo *online* refere-se ao fato de que a estimação é realizada com o sistema em operação.

O desempenho dos métodos numéricos foi avaliado por meio de simulações em tempo real. Para tanto, foram comparados o erro percentual, tempo de execução e o número de iterações de cada um, culminando com uma conclusão sobre a sua viabilidade da utilização do método de Broyden. A metodologia utilizada não exige *hardware* adicional e não afeta a qualidade da energia, pois o algoritmo está embarcado no sistema de controle.

2. ESTIMAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DA REDE

O esquemático de SGD com uma fonte fotovoltaica (FV) é mostrado na Figura 1. Neste esquemático R_g, L_g, $V_n\angle 0°$, $I_n\angle\varphi_n$, and $V_{gn}\angle\delta_n$ são, respectivamente, a resistência da rede, indutância da rede, fasor de tensão no PAC, corrente injetada na rede pelo SGD e o fasor de tensão da rede. O subscrito n refere-se a diferentes níveis de potência que o SGD pode operar. Considerando três possíveis diferentes níveis de potência injetada na rede, pode-se escrever o conjunto de equações (1). Nestas, os subscritos x e y referem-se às partes real e imaginária, respectivamente.

$$\begin{cases} V_{g1x} = V_1 - R_g I_{1x} + X_g I_{1y} \\ V_{g1y} = -R_g I_{1y} - X_g I_{1x} \\ V_{g2x} = V_2 - R_g I_{2x} + X_g I_{2y} \\ V_{g2y} = -R_g I_{2y} - X_g I_{2x} \\ V_{g3x} = V_3 - R_g I_{3x} + X_g I_{3y} \\ V_{g3y} = -R_g I_{3y} - X_g I_{3x} \\ V_{g1x}^2 + V_{g1y}^2 = V_{g2x}^2 + V_{g2y}^2 \\ V_{g2x}^2 + V_{g2y}^2 = V_{g3x}^2 + V_{g3y}^2 \end{cases} \tag{1}$$

O método consiste em fazer com que o sistema experimente três diferentes níveis de potência por meio de mudanças (via sistema de controle) na referência da magnitude da corrente injetada. Durante o período de tempo referente a cada nível de potência, um algoritmo de decomposição instantânea em componentes de sequência (DICSE) Fernandes et al. (2009) captura as amplitudes e ângulos de fase da tensão (V_p) e corrente (I_p) no PAC. Depois disso, esses valores são utilizados como entrada para um método

numérico (Broyden e Newton-Raphson) que resolve o sistema de equações (1), resultando nos valores estimados de R_g e L_g.

O fluxo de tarefas realizadas pelo método de estimação da impedância da rede pode ser resumido da seguinte maneira:

(1) Monitore a tensão e a corrente no PAC
(2) No sistema de controle programe a injeção de três diferentes níveis de potência da rede
(3) Para cada um dos três níveis de potência utilize o algoritmo de DICSE para capturar as amplitudes e ângulos de fase da tensão e da corrente no PAC
(4) Utilize os valores estimados via a DICSE para resolver o sistema de equações (1) via os métodos numéricos de Broyden e Newton-Raphson
(5) Antes do fim da janela de observação escolhida obtêm-se os valores estimados de R_g e L_g.

2.1 Método de Newton-Raphson

Quando uma função $f(x)$ pode ser escrita como uma série polinomial de Taylor no ponto x_1, ou seja, no formato:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n, \tag{2}$$

$$a_n = \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} \tag{3}$$

sendo $f^{(n)}$ a n-ésima derivada de $f(x)$ e n a ordem do polinômio de Taylor de f em x_0. Substituindo (3) em (2) e expandindo $f(x)$ no ponto x_1 até o termo de ordem 2, encontra-se uma série de Taylor:

$$f(x) \approx f(x_1) + f'(x_1)\frac{(x - x_1)^1}{1!} + f''(x_1)\frac{(x - x_1)^2}{2!}. \tag{4}$$

Admitindo que o termo de f'' é muito pequeno e que a $f(x)$ possui dentro de um intervalo $[x_1,x_2]$ uma raiz, ou seja, $f(x) = 0$, pode-se reescrever a equação (4):

$$x \approx x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}. \tag{5}$$

Reescrevendo (5) como um processo recursivo:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}, \tag{6}$$

onde k indica a k-ésima iteração do algoritmo e $f'(x^k)$ é a derivada da função f no ponto x_k.

O erro a cada iteração é dado pela avaliação do novo ponto médio:

$$erro = \left|x_{k+1} - x_k\right| \tag{7}$$

No método de NR para determinar as derivadas do sistema de equações utiliza-se o conceito de Jacobiano, assim:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}. \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Reescrevendo a equação (6) para a forma matricial, onde o vetor **s** armazena a direção do novo conjunto de solução x_{k+1}:

$$x_{k+1} = x_k + s \tag{9}$$

$$s = -J^{-1} \cdot F(x^k) \tag{10}$$

O critério de parada:

$$\frac{\left\|x_{k+1} - x_k\right\|_\infty}{\left\|x_{k+1}\right\|_\infty} \leq tol, \quad tol > 0. \tag{11}$$

onde tem-se a norma máxima da diferença relativa entre as posições do vetor solução x_k.

Abaixo é apresentado o algoritmo utilizado para o método de Newton-Raphson.

Algoritmo 1 Método de Newton-Raphson

Entrada: Função $F(x)$; matriz jacobiana $J(x)$; aproximação inicial x_0; número máximo de iterações N; tolerância tol.
Saída: Solução aproximada do método $x = (x_1, ..., x_n)^t$;
  $erro = tol + 1$; ▷ Definir um erro inicial para entrar no primeiro while.
  $k = 0$;
  enquanto $(tol < erro)$ **faça**
    Calcular $F(x_k)$ e $J(x_k)$;
    Resolver $J(x_k)s = -F(x_k)$ para determinar s;
    $s = -J(x_k)^{-1}F(x_k)$;
    $x_{k+1} = x_k + s$;
    $erro = \left|x_{(k+1)} - x_{(k)}\right|$; ▷ Condição de parada
    $x_k = x_{k+1}$; ▷ Atualização do x_k
    $k = k + 1$;
    se $k \geq N$ **então**
      Parar;
    fim se
  fim enquanto
  Saída (x_{k+1}); ▷ Solução encontrada via Newton-Raphson.

2.2 Método de Broyden

A construção do método de Broyden difere-se do método de Newton-Raphson apenas na utilização da matriz Jacobiana. O algoritmo utilizado para o método de Broyden:

No método de Broyden um sistema de equações não lineares $F(x) = 0$ é resolvido utilizando-se uma fórmula do tipo:

$$x_{k+1} = x_k - B_k^{-1}F(x_k). \tag{12}$$

Este método é uma generalização do método da Secante para sistemas de equações não lineares. O método de Broyden necessita de apenas n avaliações da função por iteração e também reduz o número de cálculos aritméticos. A grande vantagem do uso do método de BD é que a matriz Jacobiana do método de Newton-Raphson é substituída por uma matriz de aproximação B_k que é computacionalmente menos onerosa e é atualizada a cada iteração Burden (2011):

$$B_k = B_{k-1} + (\Delta F - B_{k-1}\Delta x)\frac{\Delta x^T}{\Delta x^T \Delta x} \tag{13}$$

para $k > 0$, sendo $\Delta F = F(x_k) - F(x_{k-1})$, $\Delta x = x_k - x_{k-1}$ e $B_0 = J(x_0)$, onde x_0 é uma aproximação inicial.

Algoritmo 2 Método de Broyden

Entrada: Função $F(x)$; matriz jacobiana $J(x)$; aproximação inicial x_0; número máximo de iterações N; tolerância tol.
Saída: Solução aproximada do método $x = (x_1, ..., x_n)^t$;
$erro = tol + 1$; ▷ Definir um erro inicial para entrar no primeiro while.
$k = 0$;
Calcular $F(x_0)$ e $J(x_0)$;
$B_0 = J(x_0)$;
Resolver $B_0 s_0 = -F(x_0)$ para determinar s_0;
$x_1 = x_0 + s_0$;
enquanto $(tol < erro)$ **faça**
  Calcular $F(x_k)$;
  $\Delta F = F(x_k) - F(x_{k-1})$;
  $\Delta x = x_k - x_{k-1}$;
  $B_k = B_{k-1} + (\Delta F - B_{k-1}\Delta x)\frac{\Delta x^T}{\Delta x^T \Delta x}$;
  Resolver $B_k s_k = -F(x_k)$ para determinar s_k;
  $s_k = -B_k^{-1} F(x_k)$;
  $x_{k+1} = x_k + s_k$;
  $erro = \left| x_{(k+1)} - x_{(k)} \right|$; ▷ Condição de parada.
  $x_k = x_{k+1}$; ▷ Atualização do x_k
  $k = k + 1$;
  se $k \geq N$ **então**
    Parar;
  fim se
fim enquanto
Saída (x_{k+1}); ▷ Solução encontrada via Broyden.

3. RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos através de simulações em tempo real do tipo *Model-In-the-Loop* (MIL) utilizando-se um Simulador OPAL-RT *Technologies* modelo OP5700. A plataforma de simulação em tempo real *host*-simulador utilizada para validação é apresentada na Figura 2.

Para comparar o desempenho dos métodos de Newton-Raphson e Broyden na estimação de impedância da rede foi adotado o sistema apresentado na Figura 3. Todos os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 1. O sistema consiste em um inversor trifásico conectado à rede. Como fonte primária foi utilizada uma fonte de tensão ideal, porém, para o propósito deste trabalho esta simplificação é aceitável. O esquema de modulação utilizado foi uma PWM senoidal. O bloco DICSE executa a captura das amplitudes e ângulos de fase das tensões e correntes do PAC. Essas amplitudes são a entrada do método numérico

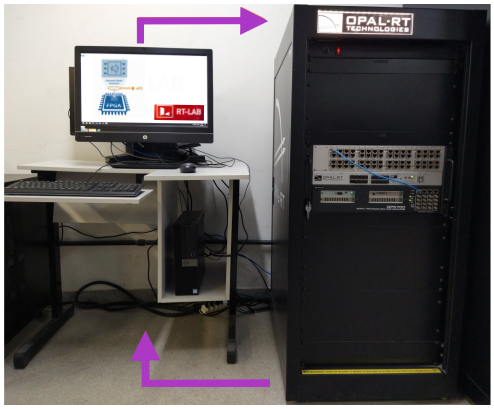


Figura 2. Plataforma de validação em tempo real.

Tabela 1. Parâmetros do sistema

Parâmetro	Valor
Tensão da Rede (L-L)	230 V_{rms}
Frequência da Rede	50 Hz
Resistência da Rede	1 Ω
Indutância da Rede	1 mH
K_p	27
Kr	7000
L_1	20 μH
L_2	0.5 μH
C_f	5 μF
Tensão do barramento c.c.	400 V
Frequência de chaveamento	10 kHz

que resolve o sistema de equações (1). O método numérico avaliado (Newton-Raphson ou Broyden) fornece os valores estimados de R_{g-est} e L_{g-est}, resistência e indutância da rede, respectivamente.

Primeiramente, observou-se o desempenho dos métodos quando $R_g = 1\ \Omega$ e $L_g = 1$ mH, em seguida, R_g foi mantida em 1 Ω e L_g aumentada para 1,5 mH. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4. Para avaliar o desempenho dos métodos numéricos foram adotadas como figuras de mérito o erro percentual registrado para R_g e L_g, o tempo de execução e o número de iterações necessárias.

Na Figura 4(a) é apresentada a tensão no PAC durante a aplicação do método de estimação. Do resultado 4(b) pode-se observar os três diferentes níveis de potência utilizados, o primeiro do instante 0 à 0,05 s com corrente nominal igual a 6 A, o segundo com corrente igual a 4,2 A no trecho que vai do instante 0,05 à 0,1 s e o terceiro com amplitude de corrente de 5,1 A do instante 0,1 à 0,15 s. Na Figura 4(c) nota-se que além da variação no nível de potência injetada na rede também programou-se uma variação no ângulo de fase da corrente injetada.

Os resultados do algoritmo de DICSE são mostrados nas Figuras 4(d), 4(e) e 4(f), que são respectivamente, o valor estimado para a amplitude da tensão do PAC, o valor estimado para a amplitude da corrente injetada na rede e o valor estimado para o ângulo de fase da corrente injetada na rede. Como o resultado dos valores estimados oscila em torno de determinados valores, utilizou-se como entrada para os métodos numéricos o valor médio de cada sinal (para cada um dos 3 níveis de potência) após o fim de cada transitório observado.

Quando L_g foi aumentada para 1,5 mH foram mantidos os mesmos valores de referência para a corrente injetada. Os resultados obtidos para este cenário são análogos aos já apresentados na Figura 4.

Após o sistema experimentar os três níveis de potência programados, as amplitudes e ângulos de fase capturadas pela DICSE do instante 0 à 0,15 s foram entregues aos dois métodos numéricos a serem avaliados. O desempenho de ambos foi registrado para cada uma das figuras de mérito elencadas. Na Tabela 2 são apresentados os resultados registrados para o desempenho de cada método numérico. Desta, pode-se concluir que em relação ao erro percentual na estimação de R_g o método de Broyden foi mais pre-

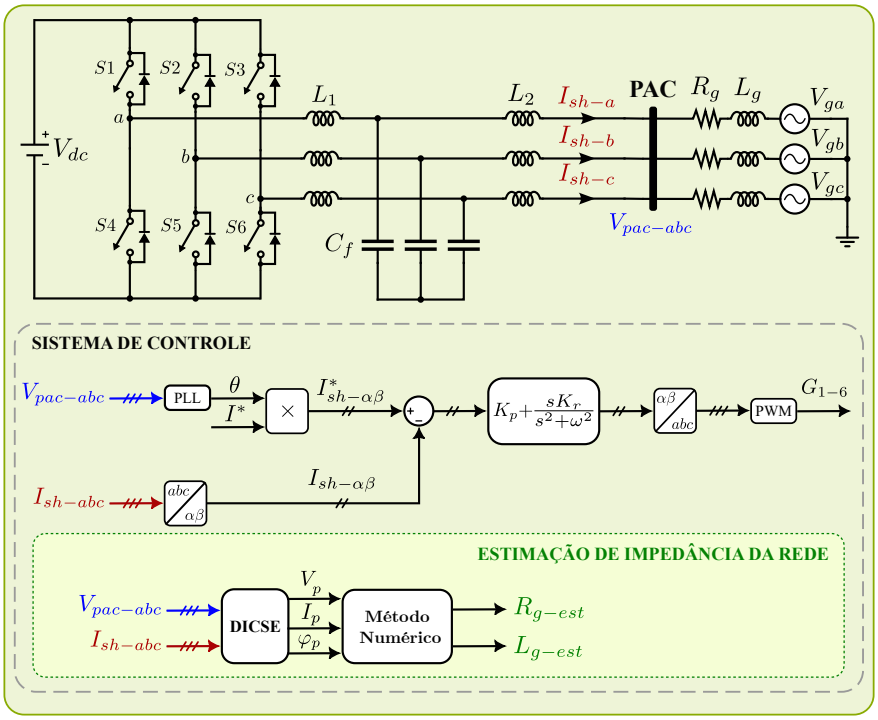
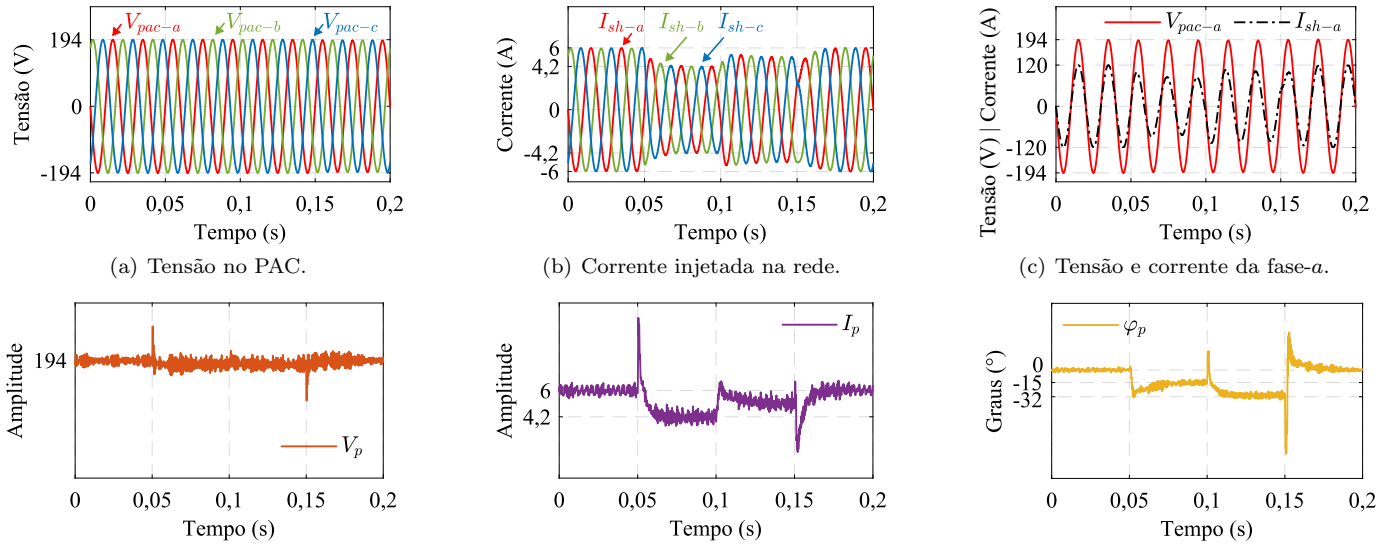


Figura 3. Sistema adotado para avaliação do desempenho dos métodos numéricos.



(a) Tensão no PAC.

(b) Corrente injetada na rede.

(c) Tensão e corrente da fase-a.

(d) Amplitude estimada da tensão no PAC.

(e) Amplitude estimada para a corrente injetada .

(f) Ãngulo de fase estimado para a corrente injetada.

Figura 4. Resultados obtidos para $R_g = 1\ \Omega$ e $L_g = 1$ mH.

Tabela 2. Análise do desempenho dos métodos numéricos.

Figura de Mérito	**Newton-Raphson**		**Broyden**	
	Quando Lg = 1 mH	Quando Lg = 1,5 mH	Quando Lg = 1 mH	Quando Lg = 1,5 mH
Erro para R_{g-est}	0,031602%	0,046243%	0,008145%	0,011797%
Erro para L_{g-est}	0,131378%	0,057208%	0,033859%	0,014595%
Tempo de Execução	7,844 ms	9,263 ms	7,553 ms	8,796 ms
N.º de Iterações	14	14	20	20

ciso nos dois cenários. Para a estimação de L_g também observou-se menor erro percentual quando utilizou-se o método de Broyden. Por fim, notou-se ainda que, apesar do método de Broyden necessitar de seis iterações a mais do que o método de Newton-Raphson, obteve tempo de execução menor, isso é justificado pelo uso de uma aproximação para a matriz Jacobiana.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, o desempenho dos métodos numéricos de Broyden e Newton-Raphson foram comparados quando aplicados à estimação de impedância da rede. O conhecimento destes parâmetros estimados são cruciais para análises de estabilidade de conversores conectados à rede. Sendo assim, é de suma importância que os algoritmos utilizados para este fim sejam o mais eficazes possíveis no que se diz respeito ao erro percentual destas estimativas e do tempo com o qual elas são obtidas. Quanto mais rápido estima-se o parâmetro, mais rápido pode-se por exemplo, tomar uma ação de controle (como alterar um ganho de um controlador) que garanta a estabilidade do sistema.

Quando o desempenho dos métodos numéricos foi analisado, observou-se que o método de Broyden foi superior em todas as figuras de mérito adotadas, possuindo menor erro percentual nos parâmetros estimados. Apesar do método de Broyden necessitar de mais iterações para convergir a um resultado, este apresentou menor tempo de execução para entrega das estimativas, o motivo é que o método de Newton-Raphson precisa a cada iteração determinar uma nova matriz Jacobiana, enquanto que o método de Broyden utiliza apenas uma aproximação desta matriz que não é recalculada a cada iteração, sendo apenas atualizada, tornando o custo computacional menor.

Diante do exposto, conclui-se que o método de Broyden pode substituir com performance superior o método de Newton-Raphson para a aplicação de estimação de impedância da rede, podendo ser embarcado no sistema de controle sem a necessidade de *hardware* adicional. Além disso, quanto mais rápido e mais preciso o método utilizado, garante-se que possíveis ações de controle em situações adversas possam ser tomadas em tempo hábil.

REFERÊNCIAS

Ahmad, T. and Zhang, D. (2020). A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*, 6, 1973–1991. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.020.

Blaabjerg, F., Chen, Z., and Kjaer, S. (2004). Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(5), 1184–1194. doi:10.1109/TPEL.2004.833453.

Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., and Timbus, A. (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), 1398–1409. doi:10.1109/TIE.2006.881997.

Burden, Richard L e Faires, J.D. (2011). *Numerical Analysis*. CENGAGE Learning.

Cobreces, S., Bueno, E.J., Pizarro, D., Rodriguez, F.J., and Huerta, F. (2009). Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(9), 3112–3121. doi:10.1109/TIM.2009.2016883.

Fang, J., Deng, H., and Goetz, S.M. (2021). Grid impedance estimation through grid-forming power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2094–2104. doi:10.1109/TPEL.2020.3010874.

Fernandes, D.A., Naidu, S.R., and Coura, C. (2009). Instantaneous sequence-component resolution of 3-phase variables and its application to dynamic voltage restoration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(8), 2580–2587. doi:10.1109/TIM.2009.2015634.

Gomes, H., Carralero, Suárez, Tahim, Pinheiro, and Costa (2022). Estimativa de impedância para suporte de estabilidadee qualidade de energia em inversores conectados à rede. *Eletrônica de Potência*, 27(2), 165–176. doi: dx.doi.org/10.18618/REP.2022.2.0004.

International Energy Agency - IEA (January 2022). Surging electricity demand is putting power systems under strain around the world. URL `https://www.iea.org/news/surging-electricity-demand-is-putting`.

Liserre, M., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F. (2006). Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(1), 263–272. doi:10.1109/TPEL.2005.861185.

Pedersen, K., Nielsen, A., and Poulsen, N. (2003). Short-circuit impedance measurement. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 150, 169–174(5).

Sun, J. (2011). Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 26(11), 3075–3078.

Sun, J. (2022). Frequency-domain stability criteria for converter-based power systems. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 3, 222–254. doi:10.1109/OJPEL.2022.3155568.

Sun, J., Xu, M., Cespedes, M., and Kauffman, M. (2022). Data center power system stability part i: Power supply impedance modeling. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 8(2), 403–419. doi:10.17775/CSEEJPES.2021.02010.

Timbus, A., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., and Borup, U. (2004). Online grid measurement and ens detection for pv inverter running on highly inductive grid. *IEEE Power Electronics Letters*, 2(3), 77–82. doi:10.1109/LPEL.2004.834921.