

OTIMIZAÇÃO TLBO PARA AJUSTE DE PARÂMETROS DE CONTROLE DE UM PLL BASEADO NA REFERÊNCIA SÍNCRONA

ANDREY GUSTAVO DE SOUZA*, MARIELLE JORDANE DA SILVA*, SÍLVIA COSTA FERREIRA*, WILIAN SOARES LACERDA*, BRUNO HENRIQUE GROENNER BARBOSA*

**Departamento de Engenharia
Universidade Federal de Lavras
Lavras, Minas Gerais, Brasil*

Emails: andreygsouza@hotmail.com, mariellejordane@hotmail.com,
silvia.ferreira@deg.ufla.br, lacerda@dcc.ufla.br, brunohb@deg.ufla.br

Abstract— Synchronous Reference PLL (Phase Locked Loop) is one of the main strategies for voltage synchronization of distributed generation systems (DG) with the grid. Thus, the control parameters that compose the PLL must be perfectly adjusted in order to guarantee the control of the power flow between the GD and the electrical system. Aware of this problem, this paper aims to optimize the values of this PLL control parameters through the meta-heuristic approach TLBO (Teaching-learning-based optimization). The obtained results show that the obtained parameters presented better results in relation to several types of grid disturbances, even when compared to the others in the literature.

Keywords— Synchronous Reference PLL, Optimization, TLBO, PID tuning.

Resumo— O PLL (*Phase Locked Loop*) baseado na Referência Síncrona é uma das principais estratégias para sincronização da tensão de sistemas de geração distribuída (GD) com a rede elétrica. Sendo assim, os parâmetros de controle que compõem o PLL devem ser perfeitamente ajustados de forma a garantir o controle do fluxo de potência entre a GD e o sistema elétrico. Ciente deste problema, o presente trabalho tem como objetivo a otimização dos valores dos parâmetros de controle deste PLL por meio da abordagem meta-heurística TLBO (*Teaching-learning-based optimization*). Os resultados alcançados mostram que os parâmetros obtidos por esta técnica apresentaram melhores resultados frente a diversos tipos de distúrbios na rede, mesmo quando comparados a valores de parâmetros recomendados pela literatura.

Palavras-chave— PLL de referência síncrona, Otimização, TLBO, Sintonia de PID.

1 Introdução

No cenário energético atual, os estudos voltados para a operação de microrredes vêm crescendo significativamente. Visando o menor número possível de interrupções de fornecimento de energia às cargas, as microrredes podem operar de forma isolada ou conectada ao sistema elétrico de potência (Lasseter and Paigi, 2004; Olivares et al., 2014; Lasseter, 2011).

As microrredes possuem fontes de geração distribuídas (GD) que são, em geral, interligadas ao sistema através de conversores eletrônicos. Neste caso, é necessário garantir perfeito sincronismo entre a GD e o sistema elétrico. Para tanto, esses conversores necessitam de um algoritmo de sincronismo robusto e eficiente capaz de fornecer uma estimativa precisa da frequência e da fase da tensão no ponto de interconexão. Este sincronismo é característica essencial para controlar adequadamente o fluxo de potência entre a GD e o sistema elétrico. A perda de sincronismo pode levar a danos severos aos dispositivos eletrônicos do conversor e também à rede elétrica (Yazdani et al., 2010).

Várias técnicas são usadas para realizar este sincronismo, dentre as quais destaca-se a do PLL (*Phase-Locked Loop*). O PLL é uma malha de controle de fase, cujo principal objetivo consiste na sintetização de uma senóide, com ampli-

tude unitária, frequência e fase idênticas às da componente fundamental da tensão (Misra and Nayak, 2016).

Dentre os diversos métodos de PLLs existentes, o PLL baseado na Referência Síncrona é uma topologia tradicional e muito utilizada, por sua robustez e boas respostas dinâmicas e em regime permanente, quando o sinal de tensão não apresenta distúrbios significativos (Golestan and Guerrero, 2015). Entretanto, diversos autores relatam as desvantagens do uso desta técnica, como a forte dependência do ajuste dos ganhos, k_p e k_i , do controlador PI e da frequência de corte do filtro passa-baixa (da Silva et al., 2010; Kulkarni and John, 2015; Subramanian and Kanagaraj, 2015).

Com o objetivo de facilitar esta tarefa, Golestan and Guerrero (2015) apresentam um modelo linearizado do PLL baseado na Referência Síncrona. A partir dessa modelagem são fornecidas orientações para obter os ganhos do controlador PI. Entretanto, os resultados ficam limitados ao uso de um filtro passa-baixa de 2ª ordem e à definição de uma frequência de corte adequada.

Visando encontrar soluções otimizadas, este trabalho propõe a aplicação da meta-heurística TLBO (*Teaching-learning-based optimization*) (Rao et al., 2011) para ajuste dos ganhos do controlador PI e da frequência de corte do filtro passa-baixa de um PLL trifásico baseado na Referência

Síncrona. O objetivo principal é obter o valor desses parâmetros para condições mais genéricas sem a necessidade da função de transferência ou de modelos linearizados. Como resultado é possível fornecer uma faixa de valores adequados desses parâmetros para diferentes condições de distúrbio na tensão, de forma a facilitar futuras implementações.

Na próxima seção é apresentado brevemente o funcionamento do PLL de Referência Síncrona. Na seção 3 é apresentado a meta-heurística TLBO, bem como o seu princípio de funcionamento. A metodologia aplicada, assim como a configuração dos experimentos são detalhados na Seção 4 e as Seções 5 e 6 contêm os resultados obtidos e as conclusões, respectivamente.

2 PLL baseado na Referência Síncrona

No esquema do PLL baseado na Referência Síncrona são utilizadas duas transformadas, sendo elas a Transformada de Park e a Transformada de Clarke. O objetivo é que um sinal trifásico de sequência positiva abc seja representado como um sinal contínuo no sistema de coordenadas dq . A Figura 2 apresenta a malha de controle em questão.

Após a utilização da Transformada de Clarke, o sinal abc passa a ser representado por meio das coordenadas $\alpha\beta$, de acordo com a seguinte matriz de transformação (da Silva et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

onde, v_0 , v_α e v_β representam os sinais de tensão no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ e v_a , v_b e v_c são os sinais de tensão no sistema de coordenadas abc .

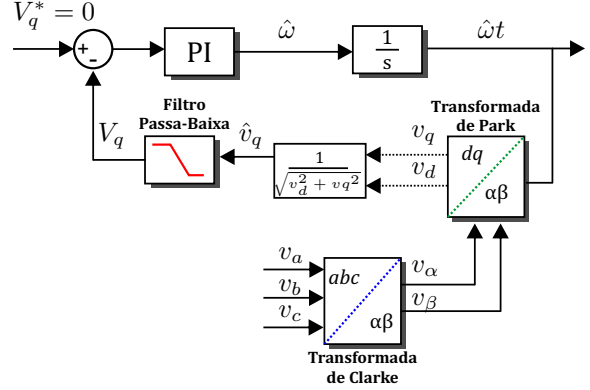
Em seguida, é realizada a Transformada de Park. Assim, o sinal representado pelas coordenadas $\alpha\beta$ é convertido para as coordenadas dq .

A Transformada de Park desloca em $\pm 60\text{Hz}$ a frequência de todas as componentes do sinal. As componentes de sequência positiva são deslocadas em -60Hz . Portanto, a componente fundamental passa a ser representada como um sinal CC. Já as componentes de sequência negativa são deslocadas em $+60\text{Hz}$. Então, caso haja componente de sequência negativa na tensão fundamental, resultante de um desequilíbrio, esta componente será refletida no sistema de coordenadas dq como 120Hz . O mesmo vale para os harmônicos que serão deslocados em frequência de acordo com a sua sequência de fases.

A matriz de conversão de $\alpha\beta$ para dq é denominada matriz da Transformada de Park, conforme apresentado por da Silva et al. (2007):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\omega}t) & -\cos(\hat{\omega}t) \\ \cos(\hat{\omega}t) & \sin(\hat{\omega}t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

onde v_d e v_q são os sinais de tensão no sistema de referência dq e $\hat{\omega}t$ é a fase estimada pela malha de controle do PLL, conforme apresentado na Figura 2.



Na malha de controle do PLL, os sinais são transformados para o sistema de coordenadas síncrono a partir das matrizes definidas anteriormente. Nesta transformação, se a fase $\hat{\omega}t$ coincidir com a fase do sinal de entrada, então a componente v_q converge para zero e a componente v_d irá representar a amplitude do sinal de entrada. Por esse motivo, v_q é utilizada como variável de controle. A componente v_q é normalizada ($\hat{v}_q$) e filtrada (V_q).

Se as tensões de entrada são puramente senoidais e equilibradas, não há a necessidade do uso do filtro passa-baixa. Mas, no sistema elétrico, isso não é uma realidade. Em geral, a componente v_q apresenta componentes em outras frequências, devido à presença de desequilíbrios e harmônicos e precisa ser filtrada.

Após a etapa de filtragem, a variável V_q irá compor a malha de controle do PLL. A diferença entre o sinal V_q e sua referência V_q^* , compõe o erro de entrada do controlador PI. A saída do PI é uma frequência estimada ($\hat{\omega}$), que deve ser integrada para representar a fase ($\hat{\omega}t$) e completar a malha de controle.

Um dos principais desafios relacionados a esta malha de controle é a definição dos ganhos proporcional (k_p) e integral (k_i) e da frequência de corte (f_c) do filtro passa-baixa. Os resultados encontrados neste trabalho para estes parâmetros serão comparados com aqueles propostos por Golestan and Guerrero (2015). Os autores modelam o sistema e os ganhos do controlador PI e a frequência de corte do filtro passa-baixa, denominada k_v , em rad/s, podem ser obtidos da seguinte maneira:

$$k_p = k_v = k, \quad (3)$$

$$k_i = \frac{k^2}{4\zeta}, \quad (4)$$

onde ζ é o fator de amortecimento, definido como 0,707. A frequência de corte do filtro passa-baixa foi definida pelos autores como $k_v = 140$. Os ganhos do PI resultantes foram: $k_p = 140$ e $k_i = 9800$.

3 Teaching-learning-based optimization - TLBO

O algoritmo de otimização utilizado neste trabalho foi o TLBO (Rao et al., 2011). Trata-se de um método de otimização inspirado na natureza que se baseia na relação professor-aluno, onde se considera a influência de um professor sobre seus alunos na classe de aula. O professor é considerado o indivíduo com melhor aptidão e o restante dos indivíduos são os alunos. O algoritmo é dividido em duas fases, a fase *teacher* e a fase *learner*.

Na fase *teacher*, em cada iteração é selecionado um professor (indivíduo mais apto). Em seguida o restante dos indivíduos aprendem com o professor, se movendo em sua direção, obedecendo um fator de aprendizado (*teaching factor*).

Já na fase *learner*, cada indivíduo é comparado a um outro selecionado aleatoriamente e é gerado um novo indivíduo de forma a se mover em direção ao melhor. O pseudocódigo do TLBO é apresentado no Algoritmo 1 (Rao et al., 2011; Garcia et al., 2017). Segundo Garcia et al. (2017), o TLBO tem resultado superiores se comparado a outras técnicas meta-heurísticas tradicionais em diversos problemas de otimização e, como grande vantagem, possui apenas dois parâmetros a serem ajustados pelo usuário: o tamanho da população e o número de iterações.

4 Metodologia

4.1 Modelagem do PLL e distúrbios no Simulink

O modelo do PLL apresentado na Figura 2 foi implementado em diagrama de blocos na plataforma Matlab/Simulink. O tempo de simulação adotado foi de 3 segundos. O erro da malha de controle deve ser minimizado pelo sistema composto pelo controlador PI e filtro passa-baixa cujos parâmetros são otimizados pelo TLBO.

O PLL implementado é então avaliado em sinais de tensão com os seguintes distúrbios:

- **Variação de frequência:** inserção de um aumento na frequência fundamental de 60Hz para 62Hz no instante $t=1,5$ segundos.
- **Desequilíbrio de tensão:** redução para 80% do valor nominal da tensão da fase A. Como as demais fases se mantiveram em sua condição nominal, caracterizou-se o desequilíbrio, gerando componentes de sequência negativa. O distúrbio foi inserido no instante $t=1,5$ segundos.

- **Harmônico:** inserção de um harmônico de 5ª ordem (300Hz) e amplitude de 5% do valor nominal de tensão da rede. Os harmônicos são múltiplos inteiros da frequência fundamental e muito comuns na rede elétrica. Dessa forma, o harmônico de 5ª ordem estará presente em todos os dois casos anteriores, sempre compondo o sinal original (condição nominal) antes e depois dos distúrbios descritos.

4.2 Configuração dos experimentos

Uma vez construído o modelo do PLL no Simulink, é realizada a modelagem da função custo que será otimizada pelo TLBO. Como o objetivo é fazer com que o valor de V_q seja o mais próximo de zero possível, foi adotado ITAE (*Integral Time Absolute Error*) como função custo. O ITAE é um tipo de estratégia eficiente para modelagem de sistemas de controle (Carrasco and Salgado, 2009). A função custo c , baseada no ITAE é dada por:

$$c = \int_{t=0}^{max} t |e(t)| dt + R \quad (5)$$

em que $e(t)$ é o erro entre o valor de referência V_q^* o valor de V_q no instante t e R é uma variável que penaliza a função custo caso o algoritmo apresente valores fora da faixa de operação do PLL, ou seja, representa as restrições.

Desta forma, as seguintes restrições foram utilizadas:

- Frequência de corte: $8 < f_c < 120$. Esta faixa foi definida levando em consideração que a maior frequência que pode aparecer na componente V_q é 120Hz apenas nas condições de desequilíbrio. Frequências menores que 8Hz levam o sistema a ter uma resposta dinâmica muito lenta e não foram consideradas.
- Ganho Proporcional: $0 < k_p < 10f_c$. Com base na malha do PLL, entende-se que o ganho proporcional não deve exceder $10f_c$, então limita-se os valores possíveis de k_p a fim de se reduzir o espaço de busca do TLBO.
- Ganho Integral: $0 < k_i < 10.000$. Já o ganho k_i possui uma ampla faixa de variação, buscando zerar o erro em regime permanente.

Caso o algoritmo apresente valores fora destas faixas, a variável R recebe o valor ∞ , descartando indivíduos do TLBO que violaram as restrições.

Em seguida, define-se os dois parâmetros do TLBO. O algoritmo será executado com uma população de 50 indivíduos e 10 iterações, visto que com esses parâmetros se alcançou o equilíbrio entre custo computacional e iterações necessárias para convergência. Foram efetuados 5 testes considerando que os distúrbios de desequilíbrio de tensão e variação de frequência foram inseridos ao

Algoritmo 1: Teaching-Learning-based Optimization (Rao et al., 2011; Garcia et al., 2017)

Require: $nDimensões \leftarrow$ número de dimensões do problema a ser endereçado

Require: $funçãoCusto \leftarrow$ função que calcula o custo, que direcionará os indivíduos ao longo das iterações

Require: $numeroDeIndividuos \leftarrow$ número de indivíduos da população a ser inicializada

```
1: inicializa população pop aleatoriamente e calcula os custos de cada indivíduo
2:  $MelhorSolução \leftarrow null$ 
3: for  $i \leftarrow 1 : nIteracoes$  do
4:    $media \leftarrow$  media das posições dos indivíduos;
5:   seleciona teacher() {melhor indivíduo}
6:
7:   {início da fase teacher}
8:   for  $j \leftarrow 1 : numeroDeIndividuos$  do
9:     cria novo indivíduo novoIndividuo
10:     $TF \leftarrow round(1 + rand(0, 1))$  {TF = fator de aprendizagem (teaching factor)}
11:     $novoIndividuo.Posição \leftarrow pop(j).Posição + rand() * (teacher.Posição - (TF * media))$ 
12:     $novoIndividuo.Custo = funçãoCusto(novoIndividuo.Posição)$ 
13:
14:    if  $novoIndividuo.Custo < pop(j).Custo$  then
15:       $pop(j) = novoIndividuo$ ;
16:      if  $pop(j).Custo < MelhorSolução.Custo$  then
17:         $MelhorSolução = pop(j)$ 
18:      end if
19:    end if
20:  end for
21:  {fim da fase teacher}
22:
23:  {início da fase learner}
24:  for  $j \leftarrow 1 : numeroDeIndividuos$  do
25:     $k \leftarrow$  número entre 1 e  $numeroDeIndividuos$  diferente de  $j$ 
26:    if  $pop(k).Custo < pop(j).Custo$  then
27:       $passo \leftarrow pop(j).Posição - pop(k).Posição$ 
28:    else
29:       $passo \leftarrow pop(k).Posição - pop(j).Posição$ 
30:    end if
31:
32:    cria novo indivíduo novoIndividuo
33:     $novoIndividuo.Posição \leftarrow pop(j).Posição + rand() * passo$ 
34:     $novoIndividuo.Custo = funçãoCusto(novoIndividuo.Posição)$ 
35:
36:    if  $novoIndividuo.Custo < pop(j).Custo$  then
37:       $pop(j) = novoIndividuo$ ;
38:      if  $pop(j).Custo < MelhorSolução.Custo$  then
39:         $MelhorSolução = pop(j)$ 
40:      end if
41:    end if
42:  end for
43:  {fim da fase learner}
44: end for
```

mesmo tempo, de modo a se obter os parâmetros otimizados que sejam adequados para os três tipos de distúrbios.

Após a convergência dos ganhos, os valores de k_p , k_i e f_c foram testados com os distúrbios de desequilíbrio de tensão e variação de frequência de forma isolada e ambos com a inserção de harmônicos, com o objetivo de comprovar a aptidão dos valores obtidos para cada tipo de distúrbio.

5 Resultados e Discussão

Considerando os distúrbios elétricos supracitados, foram realizados 5 testes para avaliar o desempenho do TLBO em obter os valores dos parâmetros de controle do PLL. Estes resultados, apresentados na Tabela 1, convergiram para valores similares nas 5 execuções do algoritmo, resultando em um erro médio de 758,10 com desvio padrão de 6,27. Isso indica que o algoritmo teve êxito em encontrar valores adequados para cada uma das variáveis de controle.

Tabela 1: Valores de k_p , k_i e f_c otimizados pelo TLBO.

	k_p	k_i	f_c (Hz)	Erro
1	128,20	2985	29,99	769,17
2	120,45	3011	28,87	754,89
3	116,08	3052	29,28	756,81
4	118,63	2974	28,14	754,06
5	128,08	2989	28,57	755,55
Erro Médio				758,10±6,27

A Figura 1 mostra o desempenho do TLBO ao minimizar a função custo para o teste 4, em que foi obtido o menor erro. Observa-se uma rápida convergência do erro, o que evidencia a aptidão do TLBO em desempenhar a tarefa de otimizar os parâmetros de controle do PLL de modo eficiente. Para cada iteração o tempo de execução do TLBO foi em torno de 1975 segundos, considerando um computador com processador Intel®Core i3-2100 com velocidade de 3,10GHz, com 8GB de memória RAM e sistema operacional Windows®10 de 64 bits. O alto tempo de execução se deve ao fato de ser necessário simular os distúrbios elétricos a cada interação.

Para validar o desempenho do TLBO na obtenção dos parâmetros do PLL, a resposta de V_q é apresentada nas Figuras 2, 3 e 4, para as seguintes condições: todos os distúrbios simultâneos, variação de frequência e desequilíbrio de tensão, respectivamente. Os resultados apresentados mostram o V_q^* e a resposta do PLL no rastreamento da fase V_q , para três conjuntos de parâmetros (k_p , k_i e f_c):

- V_q (TLBO): parâmetros otimizados definidos pelo TLBO com o menor custo.

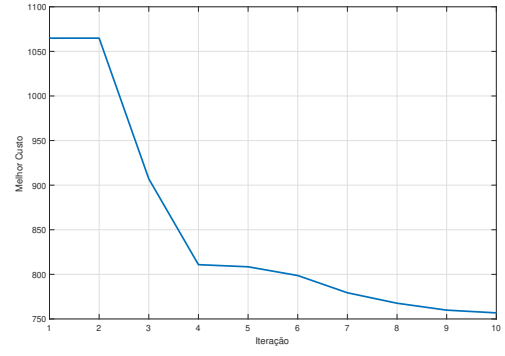


Figura 1: Custo por iteração do experimento com menor erro.

- V_q (FT): parâmetros definidos a partir de um modelo linearizado do PLL, proposto por Golestan and Guerrero (2015).

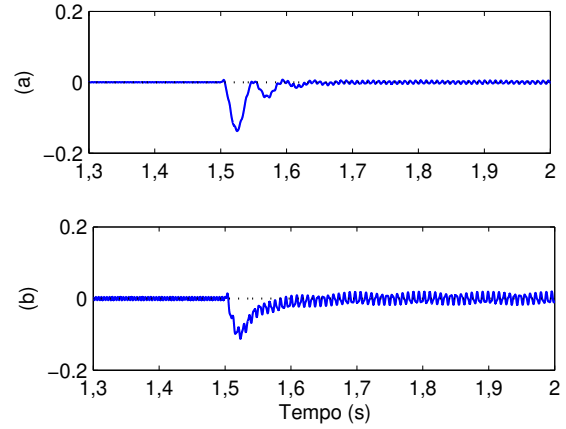


Figura 2: Erro em relação à V_q^* (---) para o caso em que todos os distúrbios são inseridos: (a) V_q (TLBO) e (b) V_q (FT)

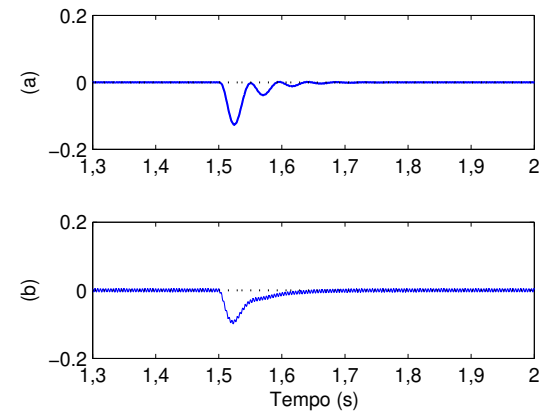


Figura 3: Erro em relação à V_q^* (---) para o caso de variação de frequência e harmônico: (a) V_q (TLBO) e (b) V_q (FT)

Para o caso em que todos os distúrbios são inseridos e os ganhos são definidos por um modelo linearizado do PLL (Figura 2 (b)), o erro em regime permanente de $\approx 0,02$ p.u., antes da inserção do distúrbio. Após a inserção do desequilíbrio e da variação de frequência o erro aumentou para

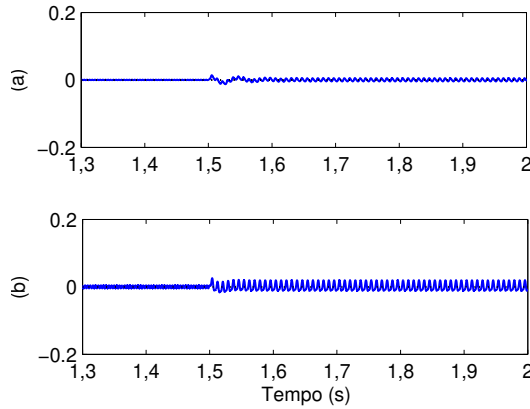


Figura 4: Erro em relação à V_q^* (---) para o caso de desequilíbrio de tensão e harmônico (a) V_q (TLBO) e (b) V_q (FT)

$\approx 0,05$ p.u., evidenciando a dificuldade da malha em rejeitar os distúrbios adequadamente. Já com os valores dos parâmetros obtidos pelo TLBO (Figura 2 (a)), o PLL apresentou erro em regime permanente desprezível nos instantes iniciais e erro de $\approx 0,015$ p.u., após a ocorrência dos distúrbios. Nos dois casos, o tempo de resposta do PLL foi cerca de 100ms.

Para o caso em que o distúrbio foi a variação de frequência juntamente com harmônico (Figura 3), tanto os parâmetros de controle obtidos pelo TLBO, quanto os obtidos pela FT apresentaram erros em regime permanente muito baixos, menores que 0,01 p.u.. Nos dois experimentos, o tempo de resposta do PLL foi ≈ 100 ms.

Como o PLL é trifásico, ou seja, os sinais de tensão das três fases são utilizados como entrada, qualquer desequilíbrio entre a amplitude das fases é extremamente nocivo ao seu desempenho. Sendo assim, a Figura 4 mostra que após a ocorrência do afundamento de tensão na fase A, os valores dos parâmetros de controle obtidos pelo TLBO e pela FT apresentaram erro em regime permanente, de cerca de 0,02 e 0,05 p.u., respectivamente. O tempo de resposta dos dois experimentos foi bastante satisfatório, cerca de 20ms.

6 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo explorar a meta-heurística de otimização TLBO para otimizar os valores de ganho de um controlador PI e a frequência de corte f_c de um filtro passa-baixa, ambos associados a um PLL baseado na Referência Síncrona. A utilização do TLBO se mostrou eficiente para a obtenção destes parâmetros, uma vez que a resposta de V_q convergiu com boa resposta transitória e em regime permanente para os principais tipos de distúrbios elétricos que poderiam comprometer a resposta do PLL, sendo que para a pior condição, todos os distúrbios si-

mulados simultaneamente, o PLL apresentou um erro de 0,02 e um tempo de resposta de 100ms.

Como propostas de trabalhos futuros, espera-se a implementação de um controlador adaptativo que encontre os valores dos parâmetros de controle, de acordo com o tipo de distúrbio tratado. Outro ponto interessante a ser considerado é a implementação de uma meta-heurística multi-objetivo de maneira a realizar uma otimização segmentada da resposta dinâmica do PLL, levando em conta separadamente cada tipo de transitório (inicial ou provocado por distúrbios elétricos).

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e da UFPA - Universidade Federal de Lavras, para a publicação deste artigo.

Referências

- Carrasco, D. S. and Salgado, M. E. (2009). ITSE optimal controller design and achievable performance bounds, *International Journal of Control* **82**(11): 2115–2126.
- da Silva, C. H., Pereira, R. R., da Silva, L. E. B., Lambert-Torres, G., Bose, B. K. and Ahn, S. U. (2010). A digital PLL scheme for three-phase system using modified synchronous reference frame, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **57**(11): 3814–3821.
- da Silva, C. H., Pereira, R. R., da Silva, L. E. B., Lambert-Torres, G. and Silva, V. F. (2007). DSP implementation of three-phase PLL using modified synchronous reference frame, *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, IEEE*, pp. 1697–1701.
- Garcia, C. M., Catalano, M. D., Soares, E. A. and Barbosa, B. H. (2017). Teaching-learning-based optimization no treinamento de redes neurais artificiais para problemas de classificação.
- Golestan, S. and Guerrero, J. M. (2015). Conventional synchronous reference frame phase-locked loop is an adaptive complex filter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **62**(3): 1679–1682.
- Kulkarni, A. and John, V. (2015). Design of synchronous reference frame phase-locked loop with the presence of DC offsets in the input voltage, *IET Power Electronics* **8**(12): 2435–2443.
- Lasseter, R. H. (2011). Smart distribution: Coupled microgrids, *Proceedings of the IEEE* **99**(6): 1074–1082.

- Lasseter, R. H. and Paigi, P. (2004). Microgrid: A conceptual solution, *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, Vol. 6, IEEE, pp. 4285–4290.
- Misra, B. and Nayak, B. (2016). Performance analysis of second order adaptive filter using matlab simulink, *Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 2016 2nd International Conference on*, IEEE, pp. 336–340.
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R. et al. (2014). Trends in microgrid control, *IEEE Transactions on smart grid* **5**(4): 1905–1919.
- Rao, R. V., Savsani, V. J. and Vakharia, D. (2011). Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems, *Computer-Aided Design* **43**(3): 303–315.
- Subramanian, C. and Kanagaraaj, R. (2015). Rapid tracking of grid variables using prefiltered synchronous reference frame PLL, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **64**(7): 1826–1836.
- Yazdani, D., Bakhshai, A. and Jain, P. K. (2010). A three-phase adaptive notch filter-based approach to harmonic/reactive current extraction and harmonic decomposition, *IEEE Transactions on Power electronics* **25**(4): 914–923.