

Otimização de um Controlador PI Adaptativo para Conversores Conectados à Rede com Filtro LCL usando o Algoritmo de Otimização das Baleias

MATEUS SANTOS DA SILVA¹; JOSÉ EDUARDO DAS NEVES DA FONSECA²,
ELMER ALEXIS GAMBOA PEÑALOZA³; PAULO JEFFERSON DIAS DE
OLIVEIRA EVALD⁴

¹Universidade Federal de Pelotas – mssilva@ufpel.edu.br

²Universidade Federal de Pelotas – fONSECA.jose@ufpel.edu.br

³Universidade Federal de Pelotas – eagpenaloza@ufpel.edu.br

⁴Universidade Federal de Pelotas – paulo.evald@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de geração de energia renovável (SGER) estão se expandindo globalmente, impulsionados pela necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa (KHURSHUD et al, 2022). Os conversores desempenham um papel fundamental na produção de energia elétrica a partir de fontes, tais como eólica, solar, das marés e bioenergia. No entanto, a comutação dos conversores gera harmônicos que prejudicam a qualidade da energia (ŞEHIRLI, 2022), exigindo o uso de filtros passivos, sendo o filtro LCL uma opção vastamente utilizada devido ao seu tamanho reduzido, baixo custo e peso, além de fácil instalação (HAN et al, 2019).

O controle das correntes injetadas na rede com conversores interfaceados com filtro LCL é essencial para garantir a estabilidade e a qualidade da energia. Várias abordagens de controle foram propostas na literatura, tais como *model predictive controller* (ROSSI; KARAMANAKOS; CASTELLI-DEZZA, 2022), *super-twisting sliding mode controller* (SUFYAN et al, 2022), entre outras. Porém, grande parte dos algoritmos de controle possuem ganhos fixos, o que torna os sistemas controlados suscetíveis a instabilidade quando o sistema controlado está sujeito à dinâmicas não modeladas.

Por outro lado, controladores adaptativos ajustam seus ganhos em resposta às mudanças no sistema (HOLLWEG et al, 2022), tornando-os adequados para conversores com filtro LCL, onde a indutância da rede é desconhecida. Neste viés, este trabalho propõe o uso do algoritmo de otimização das baleias (*Whale Optimization Algorithm*) (MIRJALILI; LEWIS, 2016) para parametrizar um controlador PI adaptativo (EVALD et al, 2022). O uso do otimizador torna o processo menos dependente da experiência do engenheiro de controle, acelerando esta etapa fundamental do projeto de controladores.

2. METODOLOGIA

Este estudo aborda a parametrização de um controlador PI adaptativo utilizando um otimizador bioinspirado baseado no comportamento de caça das baleias jubartes, conhecido como *Whale Optimization Algorithm*. O otimizador leva em consideração erros de rastreamento da corrente de referência, sobressinal, magnitude da ação de controle e critérios de estabilidade do controlador na sua função de penalização, que é dada pelo erro absoluto.

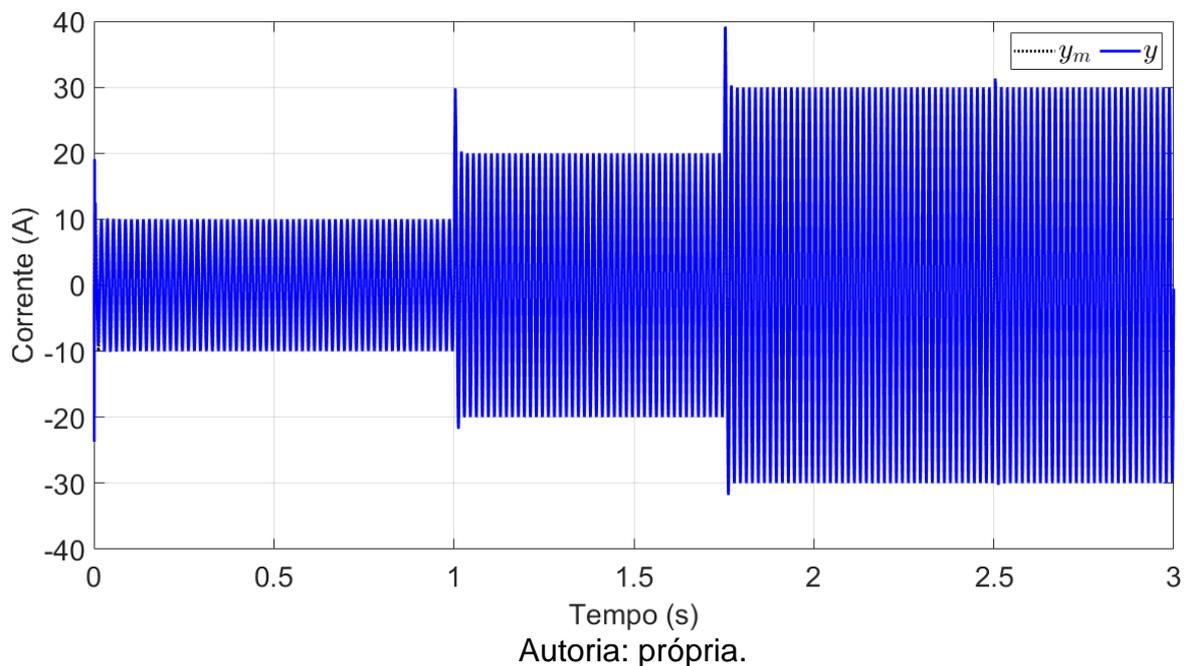
Os cenários considerados para otimização do controlador inclui variações de carga, variações paramétricas (aumentando a indutância da rede para torná-la mais fraca). Dessa forma, obtém-se conjuntos de parâmetros do controlador que

garantiram robustez e estabilidade ao sistema, o que o tornará viável para aplicações práticas. O otimizador recebe como parâmetros de entrada o número de baleias (agentes de busca) e a quantidade de iterações que deve ser executado. Suas saídas são os parâmetros de convergência do controlador adaptativo e todos os ganhos iniciais do controlador. Ressalta-se que esse procedimento é realizado offline, com objetivo de obter a configuração inicial do controlador. Devido a sua natureza, após fechar a malha, os ganhos serão continuamente modificados por um algoritmo gradiente, modificado com um sinal majorante para garantir a limitação de todos os sinais em malha fechada, em resposta a quaisquer perturbações do sistema. Isto garantirá que o erro de rastreamento tenderá para um conjunto residual em regime permanente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

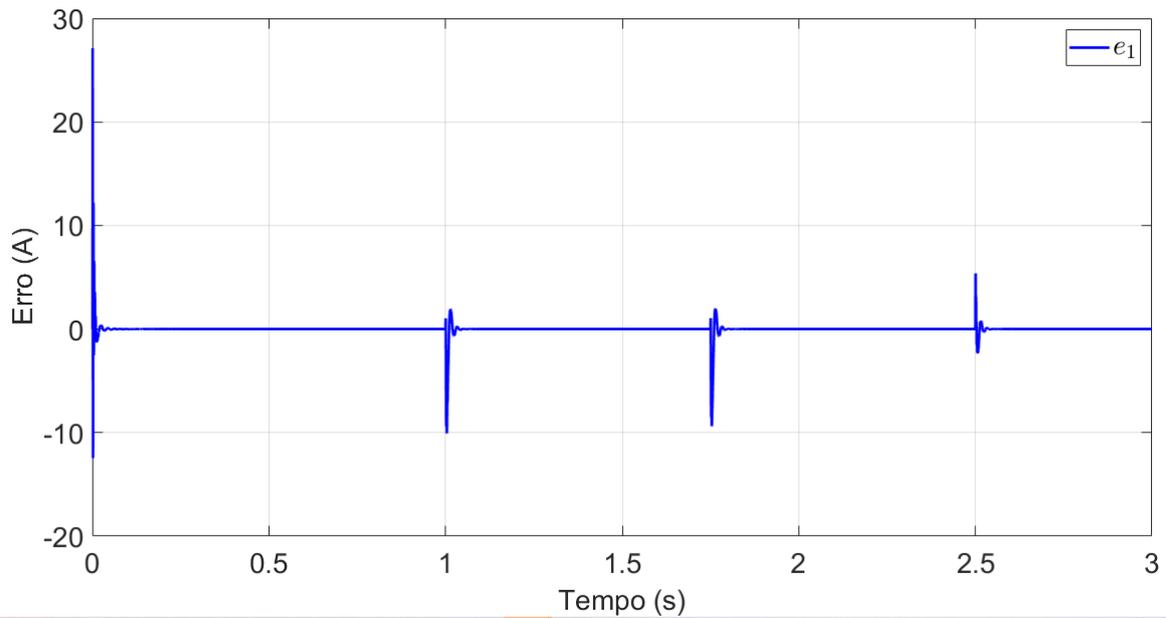
As simulações realizadas neste estudo avaliaram várias configurações do otimizador, resultando em conjuntos de parâmetros viáveis para sua aplicação prática. A Figura 1 mostra o rastreamento de corrente, onde y_m é a referência e y é a corrente controlada. Como pode ser notado, embora hajam sobressinais, esses valores não tornam a técnica inviável. Ademais, em regime permanente, a corrente controlada rastreia muito proximamente a sua referência, o que garante a qualidade da energia.

Figura 1 – Rastreamento de corrente.



Para melhor visualização dos resultados, na Figura 2 é apresentado o erro de rastreamento. Neste gráfico, é possível ver de forma clara que o erro de rastreamento tende a zero em regime permanente.

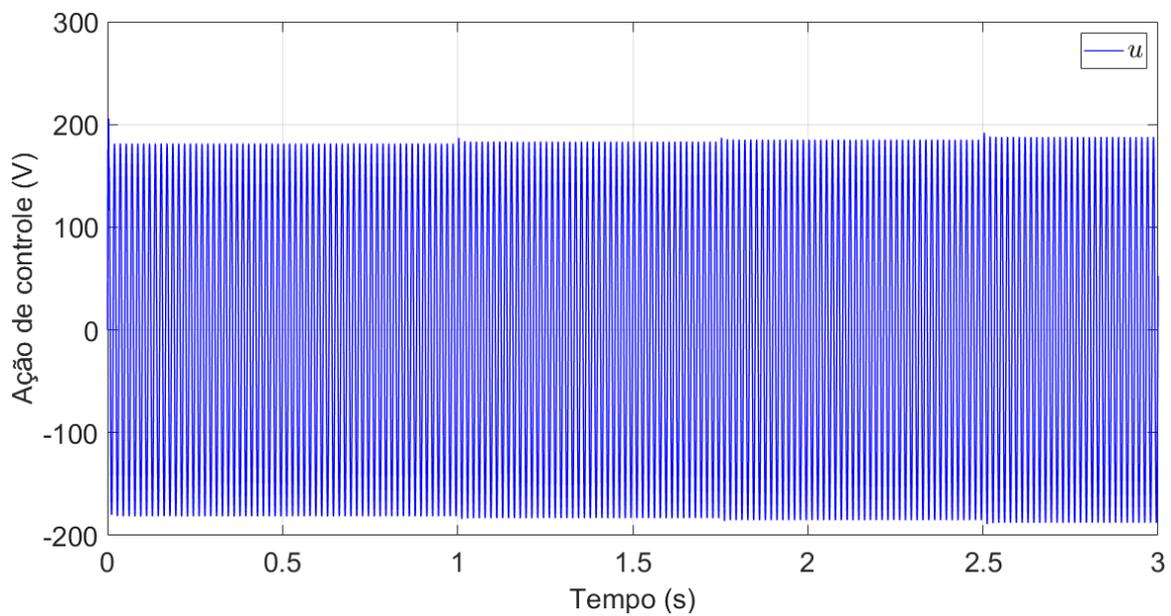
Figura 2 – Erro de rastreamento.



Autoria: própria.

A ação de controle é apresentada na Figura 3, onde pode-se notar que o sistema em malha fechada se mantém estável, requerendo ações finitas do controlador, durante todos os testes.

Figura 3 – Ação de controle.



Autor: própria.

Os resultados deste estudo mostraram a utilidade do procedimento de parametrização automática para controladores adaptativos diretos em sistemas de geração de energia conectados à rede com filtro LCL. O otimizador auxiliou no projeto dos parâmetros do controlador, considerando as características da resposta desejada ao sistema controlado, bem como as restrições de estabilidade do controlador.

4. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma abordagem dinâmica para a parametrização de controladores adaptativos diretos em conversores de energia conectados à rede com filtro LCL, fazendo uso do algoritmo de otimização das baleias. Os resultados destacam que o procedimento automático reduziu significativamente a dependência da experiência do projetista de controle, proporcionando conjuntos de parâmetros viáveis para aplicação prática. Destaca-se que essa metodologia pode ser aplicada a diversas aplicações de geração de energia renovável e pode servir como uma importante ferramenta tanto para projetistas experientes quanto para iniciantes na área de controle de sistemas. Além disso, a aplicação de algoritmos de otimização para parametrização de controladores aplicados em sistemas de energia renovável resulta em um aumento da eficiência dos sistemas de conversão de energia, o que contribui para o avanço da transição energética global.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EVALD, Paulo Jefferson Dias de Oliveira et al. Lyapunov stability analysis of a robust model reference adaptive PI controller for systems with matched and unmatched dynamics. **Journal of the Franklin Institute**, v. 359, n. 13, p. 6659-6689, 2022.

HAN, Yang et al. Modeling and stability analysis of LCL-type grid-connected inverters: A comprehensive overview. **IEEE Access**, v. 7, p. 114975-115001, 2019.

HOLLWEG, Guilherme Vieira et al. A robust adaptive super-twisting sliding mode controller applied on grid-tied power converter with an LCL filter. **Control Engineering Practice**, v. 122, p. 105104, 2022.

KHURSHID, Adnan et al. The role of pricing strategies, clean technologies, and ecological regulation on the objectives of the UN 2030 Agenda. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-14, 2022.

MIRJALILI, Seyedali; LEWIS, Andrew. The whale optimization algorithm. **Advances in Engineering Software**, v. 95, p. 51-67, 2016.

ROSSI, Mattia; KARAMANAKOS, Petros; CASTELLI-DEZZA, Francesco. An Indirect Model Predictive Control Method for Grid-Connected Three-Level Neutral Point Clamped Converters With LCL Filters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 58, n. 3, p. 3750-3768, 2022.

ŞEHIRLI, Erdal. Analysis of LCL filter topologies for DC-DC isolated Cuk converter at CCM operation. **IEEE Access**, v. 10, p. 113741-113755, 2022.

SUFYAN, Abu et al. A Robust Nonlinear Sliding Mode Controller for a Three-Phase Grid-Connected Inverter with an LCL Filter. **Energies**, v. 15, n. 24, p. 9428, 2022.