

## SISTEMA REGENERATIVO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIO EM CARGA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Lucas Emmanuel Fernandes Calazans<sup>1</sup> (IC), Guilherme Monteiro de Rezende<sup>1</sup> (PQ)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira.

**Palavras-chave:** Conversor Estático. Sistemas Regenerativos. Transformador de Potência.

### Introdução

Os sistemas regenerativos surgiram com a evolução dos dispositivos semicondutores potência, sendo que os primeiros sistemas regenerativos foram implementados em máquinas elétricas de grande porte, principalmente nos acionamentos regenerativos de motores síncronos e motores de indução industriais. Com a grande evolução dos microcontroladores e DSPs (*Digital Signal Processor*) nas últimas décadas, a implementação de sistemas regenerativos em diferentes áreas utilizando conversores chaveados ganhou grande relevância. Assim a utilização de conversores potência para a resolução de problemas que envolvem equipamentos do setor elétrico como os transformadores, tornou-se uma opção viável. Os transformadores de potência são equipamentos chave no setor elétrico. Esses equipamentos ao longo da sua vida útil, permanecem constantemente energizados, e, sendo assim, durante seu desenvolvimento e comercialização, os transformadores necessitam ser submetidos a ensaios que promovam o levantamento de seus parâmetros para diferentes condições de operação, como a operação em condições nominais de carga, sobrecarga e regime operacional térmico.

Os métodos convencionais de ensaios aplicados em transformadores de potência são divididos em métodos indiretos e métodos diretos [1]. Os métodos indiretos, consistem em realizar o ensaio a vazio e o ensaio em curto-circuito, ambos de acordo com as normas NBR5356-2 (2007) e IEEE-C571290 (2016). Como os métodos convencionais são energeticamente ineficientes e possuem pouca flexibilidade na emulação de certos tipos de cargas, como as não lineares, tem-se a necessidade de realizar ensaios de carregamento, de modo que o transformador seja submetido a condições similares a de um equipamento conectado à rede elétrica. O presente trabalho, aborda a topologia de um sistema regenerativo para ensaios de carregamento em transformadores de potência, em que utiliza uma carga eletrônica ativa (CEA) para realizar a recuperação de energia e permite submeter o transformador a diversos perfis de carregamento. A metodologia a ser

implementada é fundamentada no trabalho de desenvolvido por [4].

O sistema regenerativo desenvolvido, utiliza-se um conversor estático de potência em uma configuração back-to-back (B2B), que possibilita o controle independente das potências ativa e reativa no sistema. Devido ao tipo de conexão do conversor com o transformador sob teste, é possível ensaiar transformadores de elevada potência através de conversores com potência relativamente menor.

### Metodologia

A topologia da bancada de testes desenvolvida, pode ser observada na Figura 1.

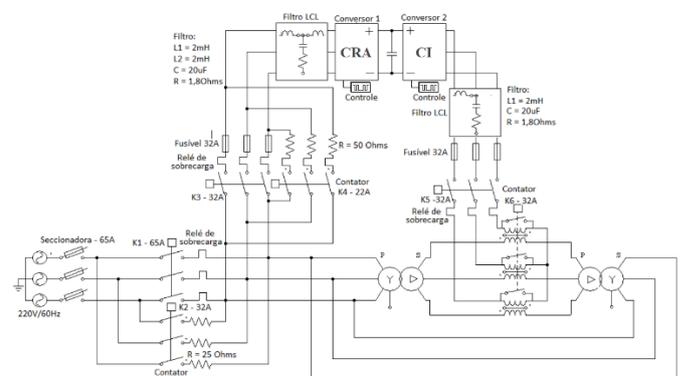


Figura 1 – Diagrama multifilar do sistema regenerativo.

No sistema, cada conversor possui sua função bem definida. O primeiro conversor, denominado conversor retificador ativo (CRA), tem como objetivo realizar o controle da tensão do elo c.c., garantindo o fornecimento de energia para o outro conversor durante a operação, além disso, o CRA realizar a correção do fator de potência no ponto de acoplamento com a rede, de modo que durante a realização dos ensaios de carregamento, a rede não enxergue o sistema como uma carga com um baixo fator de potência. O segundo conversor, denominado conversor inversor (CI), é responsável por controlar as variáveis do ensaio, de maneira a impor os perfis de carregamento no transformador sob teste. Além

dos conversores, o sistema conta com filtros na saída de cada conversor, com o objetivo de mitigar os harmônicos produzidos pelo chaveamento. E por último, o sistema conta com os transformadores, dois trifásicos, sendo eles, o transformador sob teste e o transformador de isolamento e três transformadores monofásicos que são utilizados para realizar o acoplamento do CI com os outros transformadores.

A montagem final da bancada é ilustrada na Figura 2, na qual a maioria dos componentes estão dentro de um painel de aço capaz de resistir a esforços mecânicos, elétricos e térmicos.

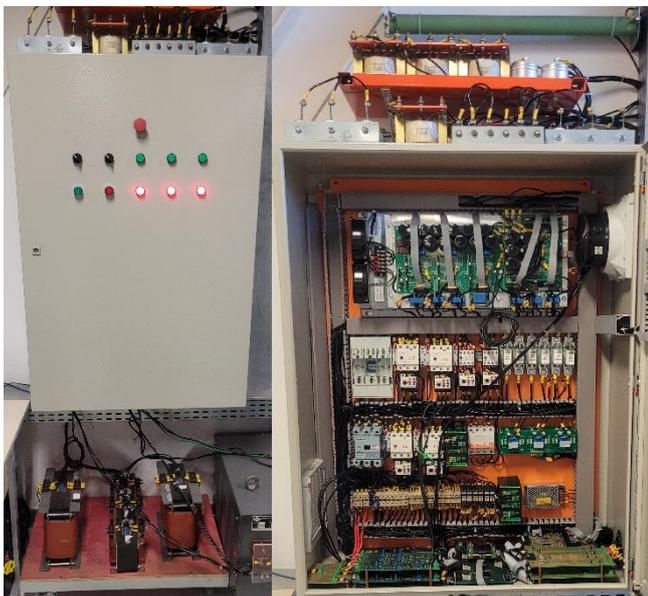


Figura 2 – Montagem final da bancada regenerativa.

Inicialmente para a validação da topologia, foi realizada uma simulação do sistema na plataforma Matlab/Simulink. O controle do sistema foi realizado no referencial síncrono ( $dq$ ). Assim, foram utilizadas as transformadas de Clarke e Park para obter as variáveis neste referencial.

O sistema de controle do CRA é composto por duas malhas, sendo uma interna responsável pelo controle de corrente e duas malhas externas, responsáveis pelo controle de tensão do barramento c.c. e controle da potência reativa.

A malha de controle de corrente do conversor deverá ser capaz de responder às referências de forma relativamente rápida e segura, já que esta malha será a responsável direta por controlar a corrente injetada/consumida da rede. Para isso, sua frequência de corte necessita ser elevada em relação às outras malhas, mas também, é necessário que ela seja mais lenta que a frequência de chaveamento do conversor. Portanto, para a malha de controle de corrente determinou-se uma frequência de corte uma década menor que a frequência de chaveamento. A malha

de controle de tensão deverá ser mais lenta que a malha de corrente, já que estas operam em cascata. Portanto, a frequência de corte desta malha de controle foi definida como sendo uma década menor que a frequência de corte da malha de corrente. Por fim, a malha de controle de potência reativa implementada, por critério de projeto, terá de ser mais lenta que a malha de controle de tensão do barramento c.c., pois assim fica garantido o total desacoplamento que uma malha possa interferir na outra em momentos de transitórios.

## Resultados e discussão

Para validar a estratégia de controle de corrente implementada no CI, foi aplicado um degrau de 5 A de corrente de eixo direto no seu valor de referência. Através deste degrau foi possível verificar o comportamento da malha de controle de corrente, na qual teve uma atuação bem rápida por se tratar da malha interna, e o *overshoot* ficou conforme projetado. Na Figura 3 é ilustrado o gráfico obtido da resposta ao degrau.

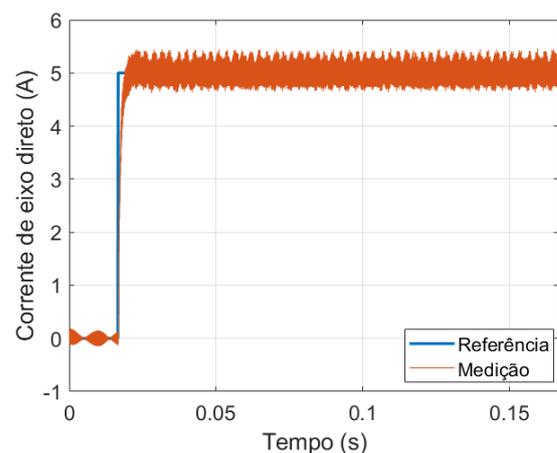


Figura 3 – Resposta a um degrau de 5 A de eixo direto no valor de referência de corrente do CI.

A resposta da malha externa referente ao controlador de tensão do barramento c.c. do CRA é ilustrada na Figura 4. Para validar a estratégia utilizada, obteve-se a resposta dinâmica do sistema de controle a um degrau de tensão de 50 V. No gráfico é possível observar o comportamento da tensão do barramento c.c. e o degrau da tensão de referência. Foi considerado um valor inicial de tensão de 350 V para o capacitor, deste modo com o degrau de tensão o elo c.c. deve atingir uma tensão de 400 V após o degrau. Pelo fato do controle ser realizado pela a malha externa de tensão, em que fornece um valor de referência de corrente para a malha interna, percebe-se que a resposta ao distúrbio é mais lenta quando comparada com a malha interna, porém estando de acordo com o projetado.

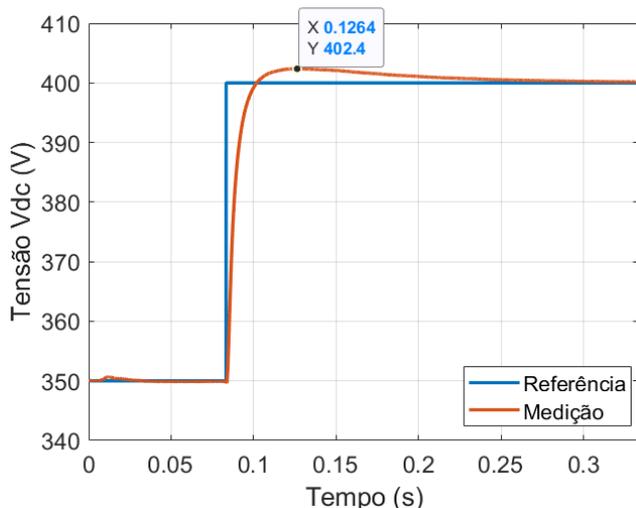


Figura 4 – Resposta a um degrau de 50 V no valor de referência da malha de tensão do CRA.

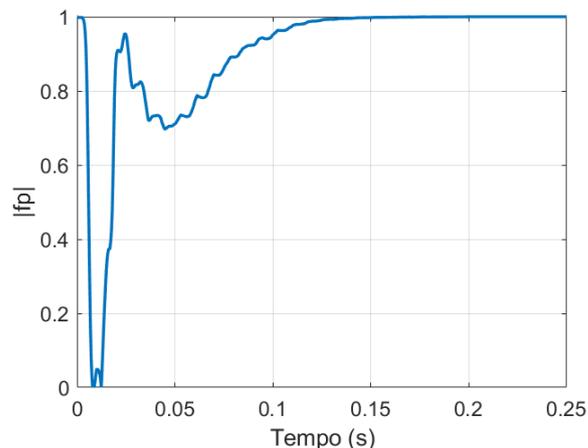


Figura 6 – Módulo do fator de potência da rede com o controle de potência reativa do CRA.

Além da análise da corrente injetada pelo conversor e do controle da tensão do barramento c.c. é necessário observar a potência injetada na rede pelo CRA. Nas Figuras 5 e 6 é possível observar a potência ativa, reativa e o módulo do fator de potência no ponto de acoplamento do sistema com à rede com a atuação do controle de potência reativa. Vale ressaltar que durante este teste o CI não sintetizava nenhuma tensão, ou seja, não estava consumindo uma potência do barramento c.c..

Para validar a capacidade de realizar ensaios de carregamento no transformador com o controle das variáveis, realizou-se um ensaio considerando o transformador operando em potência nominal (1 pu) e um fator de potência de 0,85 indutivo. Como o transformador sob teste instalado na bancada é de 3 kVA, significa aplicar correntes de referência de eixo direto de 9,47 A e de eixo em quadratura de -5,87 A. Para isso, aplicou-se um degrau nos valores de referência após 5 ciclos de rede (83,33 ms). A Figura 7 mostra a potência ativa e reativa medida na entrada do transformador sob teste. Em regime, a potência ativa possui um valor de 2550 W e a reativa de 1581 VAR, estando de acordo com o carregamento esperado para o primeiro cenário. Já na Figura 8 é possível observar o módulo do fator de potência e o fator de potência no transformador sob teste, verifica-se que o fator de potência em regime é de aproximadamente 0,85 indutivo, mostrando que o controle de carregamento foi realizado o planejado.

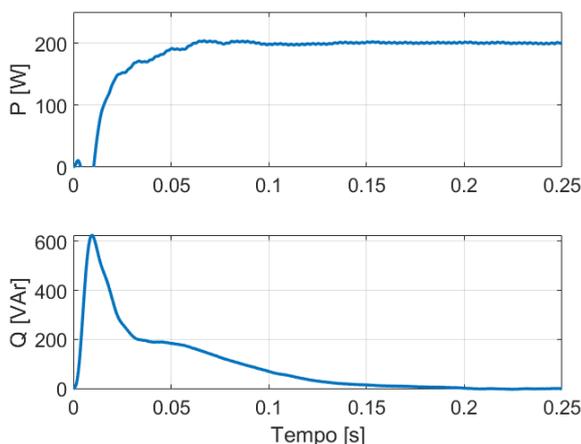


Figura 5 – Potência ativa e reativa consumida da rede com o controle de potência reativa do CRA.

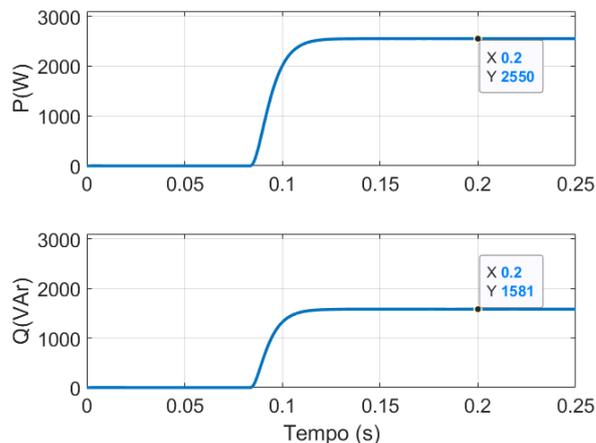


Figura 7 – Potência ativa e reativa no transformador sob teste (1 pu de carregamento e fp = 0,85 indutivo).

Realizando uma análise da potência reativa consumida da rede, percebe-se que o sistema de controle atuou de modo a injetar reativo, fazendo com que a potência reativa consumida da rede seja igual zero. Dessa maneira, como pode ser observado na Figura 6, o fator de potência passou a ser unitário, assim a rede elétrica enxerga o sistema regenerativo como sendo uma carga puramente resistiva.

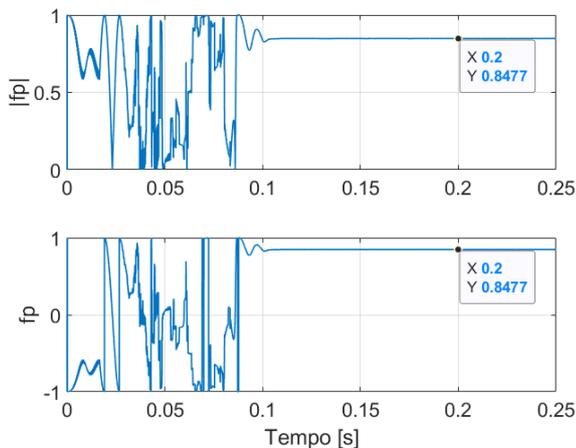


Figura 8 – Módulo e fator de potência no transformador sob teste (1 pu de carregamento e  $fp = 0,85$  indutivo).

Uma das vantagens da topologia abordada é a capacidade de recuperação de energia, para verificar essa característica, realizou-se um ensaio de carregamento considerando a potência nominal do transformadora e um fator de potência unitário. O início do teste foi após 5 ciclos de rede (83,33 ms). Na Figura 9 é possível observar a potência ativa e reativa consumida da rede e na Figura 10 no transformador sob teste. Analisando-as é possível verificar que a potência ativa consumida pelo transformador é próxima de 3000 W e a reativa é igual a zero, pois o fator de potência imposto para o teste é unitário. Já a potência ativa consumida da rede é aproximadamente 1156 W. Assim, apenas uma parcela da energia utilizada no ensaio é consumida da rede, para este teste em específico, tem-se uma redução no consumo energético de 61,48 %, quando comparado a testes que utilizam metodologias convencionais, em que toda a energia utilizada durante o teste é desperdiçada.

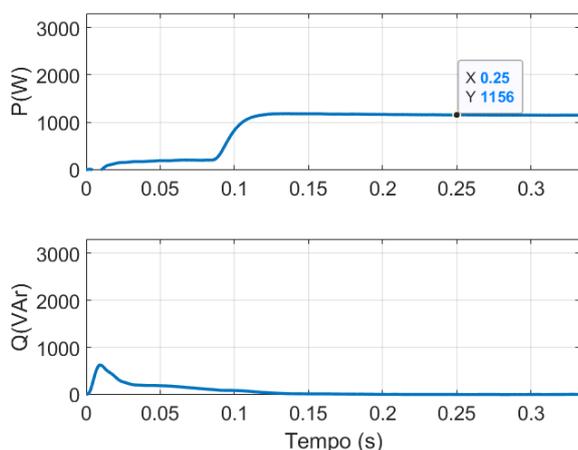


Figura 9 – Potência ativa e reativa consumida da rede. (1 pu de carregamento e  $fp = 1$ ).

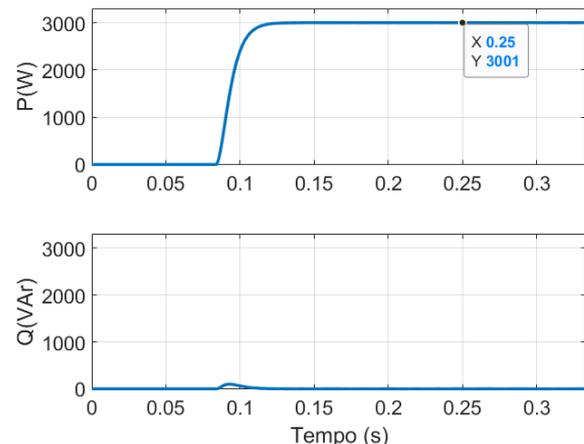


Figura 10 – Potência ativa e reativa no transformador sob teste (1 pu de carregamento e  $fp = 1$ ).

## Conclusões

Os resultados obtidos, confirmaram que através da imposição dos valores de corrente de eixo direto e eixo em quadratura, é possível realizar ensaios de carregamento com o total controle da potência ativa e reativa no transformador. Outra característica do sistema comprovada é a correção do fator de potência no ponto de acoplamento com a rede, realizada pelo CRA. Dessa maneira é possível realizar diversos tipos de carregamento com a variação do tipo de carga e garantir que no ponto de vista da rede há apenas uma carga puramente resistiva.

## Agradecimento

Agradeço primeiramente o professor Guilherme Monteiro de Rezende pela oportunidade de participar do projeto e ao órgão financiador PIBIC – UNIFEI.

## Referências

- [1] C. V. de Sousa, F. F. Matos, V. F. Mendes, I. J. da Silva Lopes, S. R. Silva, and S. I. Seleme, “Regenerative pwm source for power transformer loading tests”. In 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology. IEEE, 2010, pp. 961–966.
- [2] NBR536-2 (2007). Transformadores de Potência Parte 1 – Generalidade, Parte 2 – Aquecimento, Parte 3 – Níveis de Isolamento. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.
- [3] IEEE PES, “Transformers Committee”, IEEE Std. C57.12.90, 2016.
- [4] T. Galvão and D. Simonetti, “A low-power setup proposal for power transformer loading tests”. Energies, vol. 12, no. 21, p. 4133, 2019.