

## SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COMBINADO COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA OPERANDO COMO FORMADOR DE REDE OU SUPRIDOR DE REDE

Maurício Lage Almeida Dias<sup>1</sup> (IC), Clodualdo Venicio De Sousa (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Conversor c.c – c.c *Interleaved*. *LaunchPad* TMS320F28379D. PWM with *phase-shifting*.

### Introdução

O estudo apresentado neste trabalho, no geral, visa contribuir com a produção científica acerca das técnicas de conversão eletrônica da energia em sistemas de armazenamento de energia combinado com geração fotovoltaica, haja vista a crescente demanda desta modalidade de energia na matriz energética de diversos países, inclusive o Brasil.

O objetivo principal do trabalho é analisar, comissionar e tornar operacional, o protótipo de um Conversor c.c- c.c *Interleaved*. O conversor *Interleaved* possui vantagens como por exemplo a baixa ondulação de corrente de saída. A ondulação de corrente de saída do conversor *Interleaved* é o parâmetro chave para a otimização geral do conversor.

Para tal propósito, os métodos empregados durante a pesquisa consistiram em estudos desenvolvidos em simulações computacionais, baseados principalmente em produções científicas, recentes, realizadas por pesquisadores e estudantes de pós-graduação, em consonância com o planejamento das atividades práticas previstas para a bancada experimental desenvolvida no Laboratório de Geração de Energia da Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira/MG.

### Metodologia

Durante o trabalho, com o objetivo de otimizar o tempo de execução, foram empregados os métodos:

- Pesquisa: Revisão teórica sobre eletrônica de potência aplicada ao projeto.
- Simulações: Estudo da topologia e das técnicas necessárias para sintetizar o funcionamento do Conversor c.c – c.c *Interleaved*, partido da topologia simplificada até o entrelaçamento final de 6 células.
- Protótipo: Revisão teórica sobre Instalações Elétricas Industriais e Acionamentos Elétricos. Projeto e montagem do protótipo.
- Experimentos: Parametrizar e programar o DSP TMS320F28379D para verificar o PWM defasado.

### Protótipo de 10kVA

#### Apresentação do Protótipo

Na Figura 1 observa-se componentes que formam o protótipo que tem por finalidade os experimentos ligados ao projeto. Em suma, para implementar o conversor multicelular foi utilizado um módulo de potência da Semikron. Para a aquisição dos sinais elétricos estão instalados no protótipo os sensores de tensão e corrente da LEM. Para comissionamento de sinais elétricos são usadas as placas de circuito impresso, isto é, placas de entradas digitais, placa de entradas analógicas, placa de saída para os relés, placa do PWM e a placa mãe onde é instalado o DSP. Por fim, os elementos de proteção, comando, filtro, alimentação e ventilação. A bancada possui um terminal para programação e instrumentos para análise de resultados.



Figura 1 - Bancada desenvolvida para estudos de sistema de armazenamento de energia combinado com geração fotovoltaica.

## Resultados e Discussão

### Resultados Simulados

Acerca do princípio de funcionamento do conversor multicelular: as leituras dos sensores de tensão e corrente são passadas para o DSP(F28379D) onde o código elaborado processa essas leituras aplicando controle proporcional-integral e gera como saída um duty cycle. Cada um dos duty cycle gerados para cada célula é por sua vez comparado no módulo de ePWM com portadoras triangulares defasadas entre si em  $60^\circ$ , por fim, o resultado dessa comparação são os pulsos de disparo dos IGBT's. O esquemático do conversor estudado pode ser observado na Figura 2.

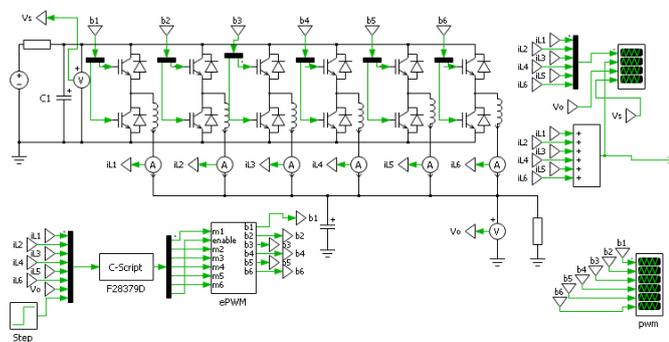


Figura 2 - Simulação da estrutura e controle do conversor Interleaved.

A Figura 3 mostra a estratégia de amostragem utilizada.

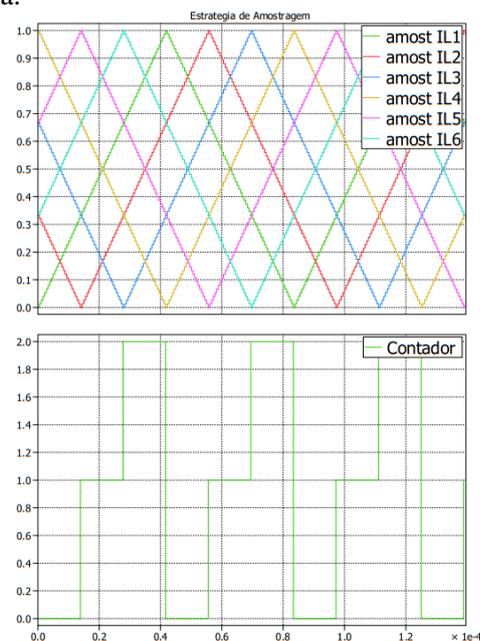


Figura 3 – Portadoras defasadas e método de amostragem.

O que foi implementado no código um contador de 0 à 2, semelhante a uma máquina de estados, para amostrar os pontos onde os sinais das portadoras coincidem no tempo os seus máximos e mínimos, pois assim a combinação dos valores de correntes amostrados resulta no valor médio. Dessa forma, IL1 coincide com IL4, quando o contador é igual a 0; IL2 coincide com IL5, quando o contador é igual a 1; IL3 coincide com IL6, quando o contador é igual a 2.

A Figura 4 mostra o PWM *with phase-shifting* obtido na simulação.

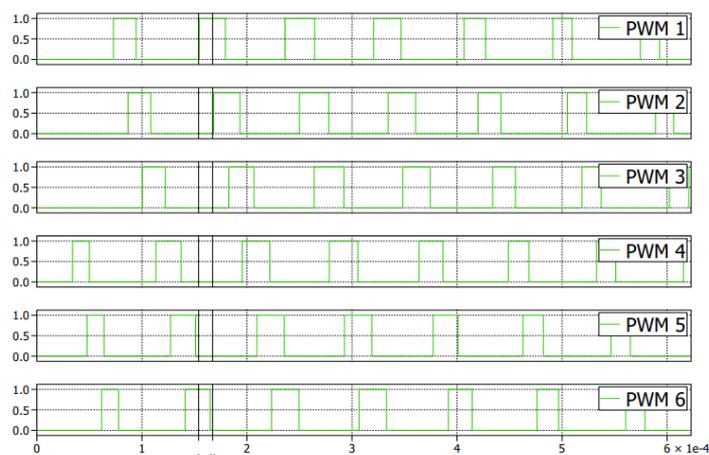


Figura 4 – Simulação PWM *with phase-shifting*.

Na Figura 5 são mostradas a corrente na carga (Sum1), tensão de saída sobre a carga ( $V_o$ ) numa carga de  $8\Omega$  para os parâmetros de simulação: *step time*=0.1s; Initial output=12/6; e Final output=36/6.

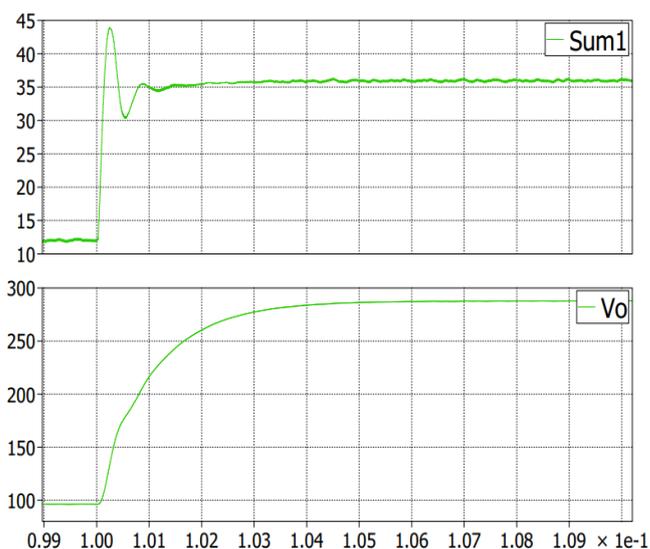


Figura 5 – Tensão e corrente de saída.

Figura 6, evidência uma característica importante do conversor entrelaçado, isto é, a análise do gráfico de Sum1, valida a equação para o cálculo da ondulação da corrente na saída do conversor q é dada por:

$$\Delta I_o = \left(\frac{V_{in} \cdot d \cdot T_s}{L}\right) \left(\frac{1 - \text{floor}(n \cdot d)}{n \cdot d}\right) (1 + \text{floor}(n \cdot d) - n \cdot d)$$

onde  $V_{in}$  é a tensão de entrada,  $d$  é o duty cycle,  $n$  é o número de células,  $T_s$  é o período de comutação de cada chave. A função piso floor( $n \cdot d$ ), que retorna o maior valor inteiro menor que o argumento.

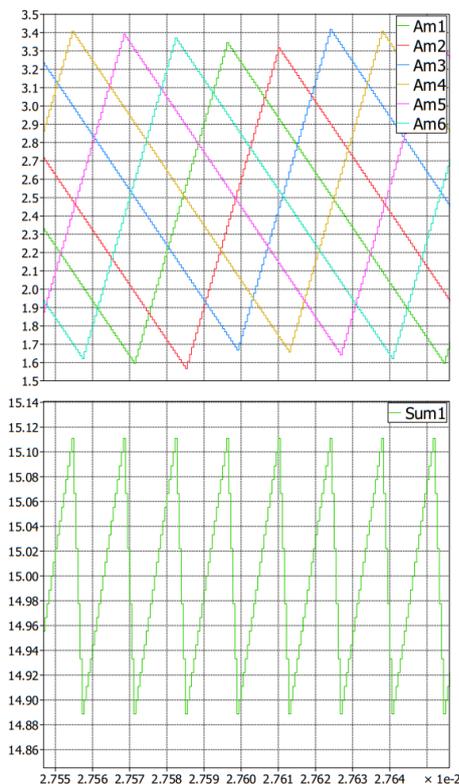


Figura 6 - Ondulação da corrente de saída.

Com o interesse em verificar de forma simplificada a equação proposta, o código implementado para o controlador P-I foi comentado e foi prefixado o duty cycle de cada uma das chaves em 1/3. Dessa forma, aplicando a equação acima foi calculado o valor de 220mA de ondulação de corrente na saída. Observando (Sum1) na Figura 6, é possível notar que o valor de ondulação calculado é exatamente o mesmo valor de ondulação medido na simulação.

### Resultados Experimentais

Na Figura 7 são apresentados o kit de DSP utilizado para implementação do sistema de controle do

conversor e a placa mãe de interface.

A Figura 8 e 9 correspondem a gravação da tela do osciloscópio enquanto estava sendo realizado a leitura do Testes do PWM with phase-shifting. PWM1 na cor laranja, PWM2 na cor azul, PWM3 na cor roxa e PWM4 na cor verde, PWM5 na cor laranja e PWM6 na cor azul.

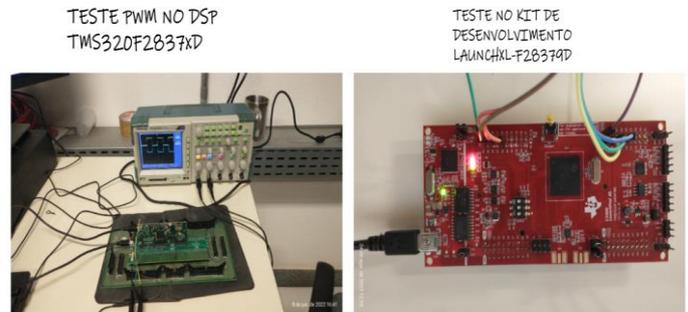


Figura 7 - Testes do PWM with phase-shifting

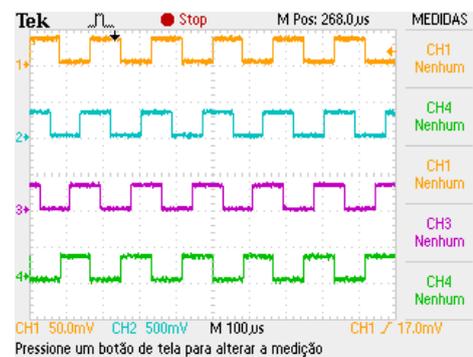


Figura 8 - PWM1, PWM2, PWM3 e PWM4.

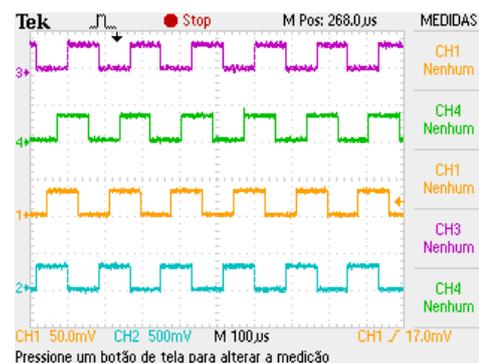


Figura 9 - PWM3, PWM4, PWM5 e PWM6.

### Conclusões

Com base nos resultados simulados apresentados, comprovou-se que o estudo computacional proposto como plano de trabalho para etapa do programa Iniciação Científica, foi bem sucedido.

Acerca dos objetivos práticos ligados as atividades previstas para a bancada experimental os

seguintes objetivos foram concluídos: projeto e montagem do protótipo; checagem e descrição do diagrama do projeto da bancada; teste das placas de condicionamentos de sinais; e verificação as saídas de PWM's *with phase-shifting*.

Atualmente a pesquisa se concentra na realização de experimentos práticos no protótipo visando testar as placas de condicionamentos de sinais e calibrar as entradas analógico-digitais de corrente e tensão e, portanto, iniciar o comissionamento da bancada.

## Agradecimento

Agradeço o orientador, professor Clodualdo Venicio de Sousa, que além do apoio técnico, foi quem me concedeu a oportunidade de participar do programa de Iniciação Científica. Agradeço em especial ao professor Waner Wodoson pelas valiosas videoaulas, de domínio público, acerca do principal dispositivo usado durante a pesquisa. A contribuição do professor Waner foi fundamental desde os primeiros passos da pesquisa até o presente relatório.

Por fim, agradeço à UNIFEI pela qualidade dos recursos disponíveis e à FAPEMIG que concedeu apoio financeiro à minha pesquisa.

## Referências

Erickson, R. W.; Maksimovic, D. *Fundamentals of Power Electronics*. : Springer Science & Business Media, 2001.

F28379D LaunchPad. Direção: Waner Wodson. Produção: Waner Wodson. Roteiro: Waner Wodson. Fotografia de Waner Wodson. Gravação de Waner Wodson. [S. l.]: YOUTUBE, 2022. Disponível em: <https://youtube.com/playlist?list=PLzihEyW-5V70NVsqZDdUhWH5QojwOrLrZ>. Acesso em: 6 set. 2022.

Thierry Meynard, Tiago Sa Ferreira, Guilherme Monteiro Rezende, Lenin Martins Ferreira Morais, Victor Flores Mendes, et al.. Novel Multirate Modulator for High Bandwidth Multicell Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, pp.1- 1. [ff10.1109/TPEL.2020.3032118](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3032118). [ffhal-02999716f](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3032118)

XAVIER, L.S. *A Comprehensive Analysis of Design and Performance of Power Converters for Battery Energy Storage Systems*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://ppgee.ufmg.br/defesas/1562D.PDF>. Acesso em: 6 set. 2022.

Yang, X.; Zong, S.; Fan, G. Analysis and validation of the output current ripple in interleaved buck converter. In: *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017.