

ESTUDO E FAMILIARIZAÇÃO COM DISPOSITIVOS DSP C2000 VISANDO IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES PARA CONVERSORES BASEADOS EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Davydson Luiz da Silva¹ (IC), Wilson Cesar Sant'Ana (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: DSP C2000. Eletrônica de Potência. Microcontroladores. Ponte H. PWM.

Introdução

Este trabalho de Iniciação Científica Voluntária se insere no contexto de um projeto maior, que visa a implementação de balanceamento sensorless das tensões de capacitores em topologias multiníveis de conversores baseados em eletrônica de potência. A teoria básica de conversores multiníveis é apresentada em Rodriguez et al. (2002). Este tipo de conversor visa aplicações em altas tensões e isto é obtido através do uso de semicondutores/submódulos em série. Entretanto, por apresentarem submódulos em série, caso todos os submódulos não sejam exatamente iguais, existe uma tendência ao desbalanço das tensões nos capacitores desses submódulos. Esse trabalho não se propõe a resolver o problema do desbalanço, mas apenas a treinar o discente voluntário na implementação (em bancada) dos conversores.

Esses conversores, normalmente, precisam de algum tipo de “inteligência”, visando resolver algum tipo de problema prático (seja um acionamento de motor, ou um retificador com alto fator de potência e baixa distorção harmônica, ou um sistema de conversão de energia para fontes renováveis, dentre muitas outras aplicações). Essa “inteligência” normalmente é conseguida com um microprocessador. Um microprocessador, em si, apenas realiza operações sequenciais. Quando esse microprocessador necessita realizar cálculos (como os exigidos pelas aplicações exemplificadas acima), muitos “ciclos de máquina” (o tempo que o processador gasta para executar uma instrução) são necessários, o que pode inviabilizar aplicações mais complexas. Dessa forma, foram desenvolvidos processadores especiais, cuja especialidade é, justamente, a execução de operações matemáticas outrora complexas para os microprocessadores comuns. Esses processadores são conhecidos como DSPs (Processadores Digitais de Sinais, do inglês Digital Signal Processors).

Um dos líderes mundiais na fabricação de dispositivos DSPs é a Texas Instruments. Esse fabricante possui diversas famílias de DSPs, voltadas para aplicações específicas. Uma dessas famílias, a C2000, é voltada para aplicações de controle de digital (no qual os conversores baseados em eletrônica de potência se inserem). Essa família possui diversos periféricos apropriados para as aplicações de controle digital. Dentre esses periféricos, o mais importante para os conversores baseados em eletrônica de potência é o módulo PWM (que irá controlar o chaveamento dos semicondutores do conversor). Sant'Ana et al. (2018) apresenta o básico da configuração dos módulos PWM para os DSPs C2000 e também apresenta como utilizá-los em conversores multiníveis. Essa referência, entretanto, trata apenas dos conversores multiníveis e do módulo PWM - assumindo conhecimento prévio do leitor sobre o ferramental necessário para a configuração dos DSPs C2000. Dessa forma, o orientador do discente voluntário foi produzindo uma série de postagens em blogs com todo o material introdutório necessário. O discente voluntário, então, parte desse material. É importante ressaltar que esse discente partiu absolutamente do zero em termos de conhecimentos nessa ferramenta e foi capaz de implementar o controle de um inversor PWM de 3 níveis.

Metodologia

Inicialmente, foi feita a familiarização com o ambiente Code Composer Studio (CCS), com base em Sant'Ana (2020a). O CCS é uma IDE (Integrated Development Environment) baseada no popular Eclipse, porém adaptada para os microcontroladores da Texas Instruments (o que inclui a família C2000 de DSPs). Aprendeu-se a criar um projeto simples e fazer o monitoramento de variáveis através do watch window e de gráficos das variáveis no tempo (recurso que é muito

útil para debug de algoritmos de processamento de sinais analógicos).

Em seguida, aprendeu-se o controle dos pinos de GPIO (General Purpose Input Output), com base em Sant'Ana (2020b). Os pinos de GPIO são a interface digital de um microcontrolador qualquer com o mundo exterior. Esses pinos podem ser pinos de entrada ou de saída. Aprendeu-se a configurar um pino como entrada ou como saída e como habilitar os resistores pull-up internos (resistores ligados à fonte de alimentação 3,3V, visando oferecer um referencial lógico ao pino). No caso de pino configurado como entrada, é importante garantir que ruídos não façam o processador interpretar o sinal de forma errônea - desta forma, aprendeu-se a configurar o debounce dos pinos de entrada. Pequenos exemplos foram realizados, com leitura de pinos e escrita em LEDs. Os GPIOs da família C2000 são sempre multiplexados com outros periféricos (por exemplo, PWM, portas seriais, etc) - dessa forma, aprendeu-se a selecionar GPIO ou o periférico multiplexado.

Foi estudado sobre o básico do sistema de interrupções do DSP, com base em Sant'Ana (2020c). Aprendeu-se sobre os conceitos de interrupções mascaráveis e não mascaráveis. Também aprendeu-se sobre as interrupções multiplexadas (que podem ser geradas por vários periféricos). Um exemplo de aplicação foi realizado, com base na interrupção gerada por um dos timers do DSP (fazendo um pisca-pisca com um dos LEDs). Aplicações de controle digital necessitam de uma taxa de amostragem constante - essa taxa pode ser conseguida com esse timer, sendo que as operações a tempo discreto são executadas dentro de uma subrotina desviada do programa principal a cada interrupção. A família C2000 permite que vários periféricos (tais como os ADCs ou os PWMs) gerem interrupções.

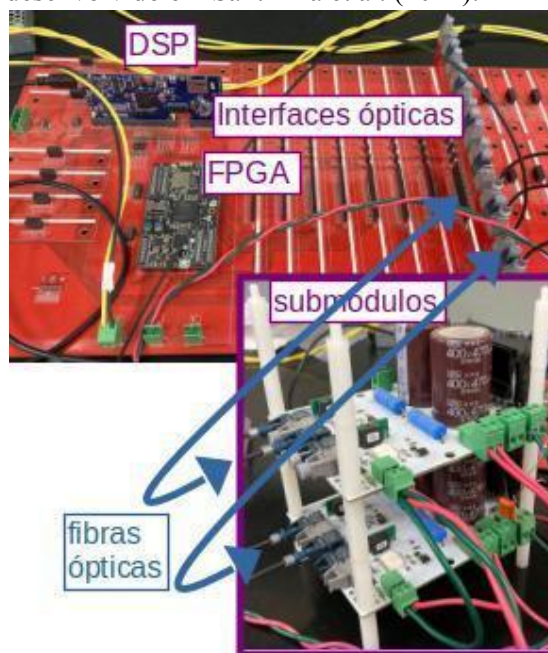
Dado que já se havia aprendido a selecionar periféricos multiplexados e a programar as interrupções, o próximo passo foi aprender a utilizar o periférico responsável pelo PWM, com base em Sant'Ana (2019). Estudou-se o básico da modulação PWM, com modulação bipolar (dois níveis) e modulação unipolar (três níveis). Exemplos foram realizados, inicialmente controlando a luminosidade de um LED (luminosidade variando de acordo com o duty-cycle especificado como referência). Em seguida, montou-se um inversor em ponte H, com base em um conjunto de placas isoladas por fibras ópticas, desenvolvidas em Sant'Ana et al. (2021). Foi necessário aprender a programar o dead-time no módulo PWM. O dead-time é um atraso inserido de forma proposital no chaveamento de forma a

se evitar que dois semicondutores complementares em uma mesma perna da ponte H produzam um curto-circuito momentâneo. Nesse inversor em ponte H, aplicou-se um sinal modulante senoidal como referência e verificou-se (com o PWM unipolar) a saída do conversor, com a largura dos pulsos de saída variando senoidalmente de +VDC a zero no semiciclo positivo e variando senoidalmente de -VDC a zero no semiciclo negativo. Uma carga RC foi utilizada, de forma a se obter a componente senoidal filtrada do sinal de saída.

Resultados e discussão

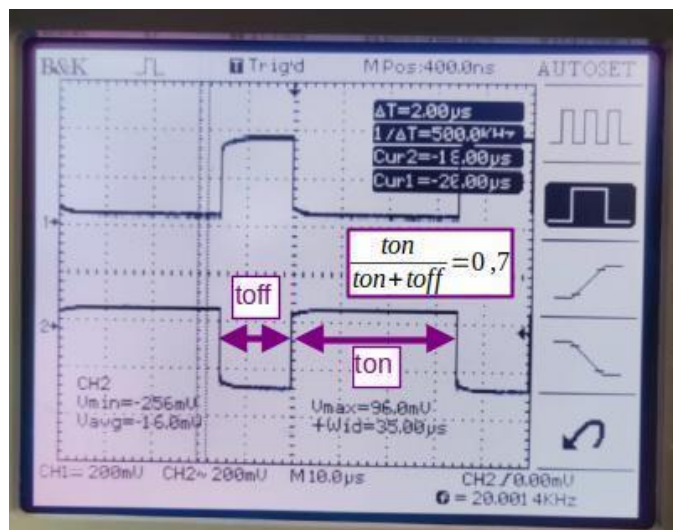
A Figura 1 apresenta o conjunto de placas (isoladas por fibras ópticas) desenvolvido em Sant'Ana et al. (2021). Esse conjunto é parte de um projeto maior. Nessa IC, apenas está sendo utilizado o DSP, uma das placas de interface óptica e dois submódulos em meia ponte (com IGBTs), formando uma ponte H.

Figura 1 – Kit educacional para pesquisa e ensino em eletrônica de potência e conversores multiníveis desenvolvido em Sant'Ana et al. (2021).



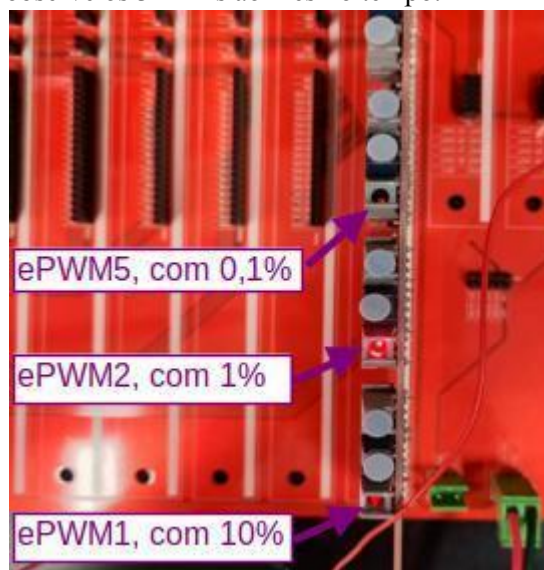
A Figura 2 apresenta uma oscilografia dos pinos de saída de dois PWMs complementares, para um duty-cycle fixo em 70%. Observa-se que o sinal do canal 2 fica em nível alto (ton) 70% do período completo (ton+toff). O sinal do canal 1 apresenta o pulso complementar (tal qual necessário para uma meia ponte), em nível alto por 30% do período completo.

Figura 2 – Teste do módulo PWM para duty-cycle 70%.



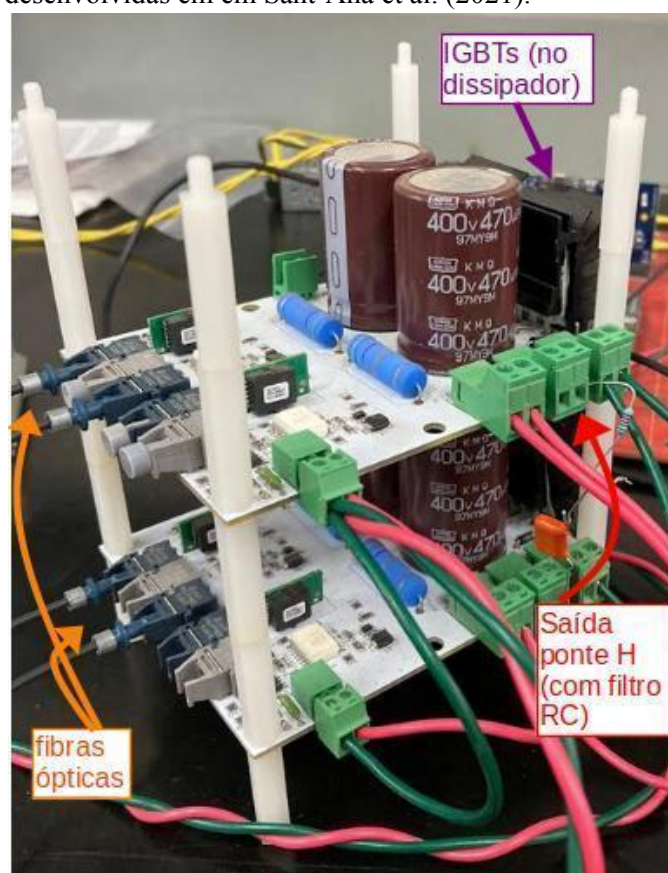
A Figura 3 apresenta uma fotografia fechada na placa de interface óptica, mostrando 3 saídas para fibras ópticas (que são LEDs). Cada uma dessas saídas foi configurada para um duty-cycle diferente (visando luminosidades diferentes). É interessante notar que a variação de duty-cycles inserida é logarítmica - isto é necessário de forma que o efeito visual da luminosidade seja linear - do contrário, nossos olhos não conseguiriam ver muita diferença entre o brilho dos LEDs.

Figura 3 – Teste dos LEDs da placa de interface óptica para duty-cycles 10%, 1% e 0,1%. Infelizmente, pela foto fica um pouco difícil achar um ângulo em que se observe os 3 LEDs ao mesmo tempo.



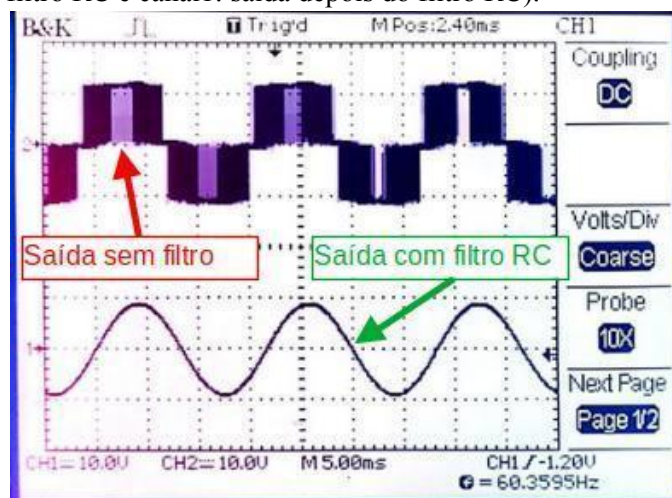
A Figura 4 apresenta uma fotografia com 2 placas de submódulo em meia ponte formando uma ponte H. Esses submódulos são isolados da placa mãe por fibras ópticas, de forma que possam trabalhar dentro de uma subestação em média/alta tensão sem que algum evento transitório se propague (por fios metálicos) da média/alta tensão para a placa mãe (danificando-a e oferecendo risco aos trabalhadores). Na saída da ponte H, foi utilizada uma carga RC, formando um filtro passa-baixas.

Figura 4 – Inversor em ponte, montado com as placas desenvolvidas em Sant'Ana et al. (2021).



A Figura 5 apresenta uma oscilografia da saída da ponte H (com modulação PWM unipolar em 3 níveis e referência modulante senoidal). Tem-se no canal 2 a saída da ponte (antes do filtro RC). Observa-se que o sinal apresenta 3 níveis (+12V, zero e -12V, com fonte DC de 12V na ponte). Tem-se no canal 1, a saída depois do filtro RC. Observa-se um sinal senoidal com amplitude pouco menor que 10V (a amplitude da senóide é controlável pelo watch-window do CCS).

Figura 5 – Saída da ponte H (canal 2: saída antes do filtro RC e canal1: saída depois do filtro RC).



Conclusões

Este trabalho de iniciação científica voluntária documentou o desenvolvimento (em bancada) de uma aplicação utilizando um DSP C2000 (do fabricante Texas Instruments). A aplicação escolhida foi um inversor monofásico em ponte H, topologia similar aos utilizados em inversores fotovoltaicos residenciais. O objetivo principal dessa IC voluntária foi treinar o discente no uso das ferramentas de desenvolvimento. Inicialmente, o discente aprendeu as funcionalidades do ambiente de desenvolvimento Code Composer Studio; aprendeu a ler e escrever em pinos de GPIO; aprendeu a configurar interrupções (necessárias para estabelecer bases de tempo precisas) e aprendeu a configurar os módulos PWM do DSP. O módulo PWM, em si, já é bastante complexo e o discente foi capaz de programar o módulo para inversores em ponte H em 2 níveis (+VDC e -VDC) e em 3 níveis (+VDC, 0V e -VDC), já considerando a necessidade de geração de um “dead-time” entre os IGBTs de uma mesma “perna” do inversor. É muito importante ressaltar que discente voluntário partiu do zero em termos de conhecimentos (tanto de eletrônica de potência quanto dos DSPs C2000) e conseguiu implementar o controle de um inversor PWM de 3 níveis, com resultados experimentais.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos à Universidade Federal de Itajubá e ao meu orientador, que me guiou e apoiou durante todo o

processo de desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço também a todos os órgãos de fomento à pesquisa neste país. Embora não tenham me apoiado diretamente, contribuíram indiretamente por meio do suporte oferecido aos meus colegas, cujas pequenas contribuições e compartilhamento de conhecimento também me beneficiaram.

Referências

Rodriguez et al. (2002) Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai e Fang Z. Peng. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on industrial electronics, 49(4):724–738. doi: 10.1109/TIE.2002.801052.

Sant’Ana et al. (2018) Sant’Ana, Wilson, Robson Gonzatti, Bruno Guimaraes, Germano Lambert-Torres, Erik Bonaldi, Rondineli Pereira, Luiz Eduardo Borges-da-Silva, "Development of a multilevel converter for power systems applications based on DSP," 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), Niteroi, Brazil, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395608.

Sant’Ana (2019) Wilson C. Sant’Ana, “3.1 - Modulação PWM,” <http://doingtechmyself.blogspot.com/2019/04/PWM-deadtime-C2000.html>, abril 2019.

Sant’Ana (2020a) Wilson C. Sant’Ana, “TMS320F28379D - 1.1 - Introdução ao Code Composer Studio,” <http://doingtechmyself.blogspot.com/2020/05/tms320f28379d-introCCS.html>, maio 2020.

Sant’Ana (2020b) Wilson C. Sant’Ana, “TMS320F28379D - 1.2 - Utilização do ControlSuite e GPIO,” <http://doingtechmyself.blogspot.com/2020/05/tms320f28379d-GPIO.html>, maio 2020.

Sant’Ana (2020c) Wilson C. Sant’Ana, “TMS320F28379D - 1.3 - Interrupções e Timers,” <http://doingtechmyself.blogspot.com/2020/05/tms320f28379d-interruptoes-e-timers.html>, maio 2020.

Sant’Ana et al. (2021) Wilson C. Sant’Ana, Bruno R. Gama, Germano Lambert-Torres, Erik L. Bonaldi, Levy E. L. Oliveira, Frederico O. Assuncao, Daniel A. Arantes, Isac A. S. Areias, Luiz E. Borges-Da-Silva e Fabio M. Steiner. Development of a modular educational kit for research and teaching on power electronics and multilevel converters. IEEE Access, 9:127496–127514. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112531.