

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**MONTAGEM DE BANCADA PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE CONVERSORES ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA**Breno Paiola Zanarelli¹ (IC), Wilson Cesar Sant’Ana (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá.**Palavras-chave:** Acionamentos Controlados. Conversores Eletrônicos. DSP. Eficiência Energética. Eletrônica de Potência.**Introdução**

Dada a escassez prevista de combustíveis fósseis e seu impacto negativo no meio ambiente, fontes de energias renováveis (e limpas) vêm sendo pesquisadas. Entretanto, essas fontes são intermitentes (só produzem energia quando há, por exemplo, sol ou vento) - o que pode resultar em diferença entre a energia gerada pelas fontes e a energia consumida pelas cargas. Essa diferença pode causar sérios problemas ao sistema elétrico. Dentre as soluções para evitar esses problemas, destacam-se as microrredes com armazenamento de energia. Tanto as microrredes quanto os sistemas de armazenamento de energia modernos são baseados em conversores eletrônicos de potência. A eficiência energética nesses conversores eletrônicos é crucial para o aproveitamento de fontes de energia renovável. Dado que a geração de energia é intermitente, perder parte dessa energia nos conversores (por baixa eficiência) diminui o retorno do investimento e reduz o impacto positivo da geração limpa.

Outro tipo de aplicação, da qual depende toda a indústria, são os acionamentos controlados de motores elétricos. Esses acionamentos são necessários para o controle de velocidade, posição e torque nos processos industriais. A eficiência energética nos conversores eletrônicos usados em acionamentos controlados é essencial para a indústria, pois tem impacto direto no consumo de energia desses motores. Além disso, conversores e motores quando operados fora de seus pontos ótimos podem sofrer estresses térmicos, que acarreta em perda de vida útil.

Dessa forma, foi proposta uma bancada de testes de eficiência de conversores. Em um primeiro momento, essa pesquisa focaria apenas nos requisitos para a implementação destes testes (quais equipamentos seriam necessários). Posteriormente, o grupo de pesquisas poderia vender serviços de certificação para fabricantes de equipamentos ou clientes industriais. Entretanto, ao

se analisar as opções de equipamentos para medição de eficiência energética, observou-se que os custos associados a esse tipo de equipamento seriam proibitivos.

Foram feitas cotações de 2 equipamentos da Yokogawa: o DL950 e o WT5000. Ambos são modulares e necessitam de vários acessórios. Em ambos os casos, um conjunto funcional de equipamento mais acessórios custaria várias centenas de milhares de reais.

Uma outra alternativa, seriam os equipamentos da Fluke - entretanto, a Fluke descontinuou um modelo antigo que realizava teste de eficiência (Fluke 435-II) - restando apenas os analisadores de qualidade de energia nos modelos mais novos. Foi feita uma cotação do Fluke 1775, que custaria por volta de uma centena de milhares de reais (mais em conta que o Yokogawa), porém a solução (analisador de qualidade de energia) precisaria ser adaptada para medição de eficiência energética.

Uma terceira alternativa, de custos bem mais baixos (e talvez até mais apropriada do que a adaptação dos analisadores de qualidade de energia) seria o uso de wattímetros. O Minipa ET-4091 apresenta custo na faixa de poucos milhares de reais e permite comunicação serial.

Dessa forma, esse trabalho de IC voluntário se propõe a analisar as alternativas acima: uso do Minipa ET-4091 ou do Fluke. Esse trabalho, entretanto, se iniciou com um discente que, por problemas pessoais, precisou deixar a IC e foi substituído por outro discente (realizando as atividades dos últimos 3 meses, relatadas nesse resumo).

Metodologia

Inicialmente, o discente voluntário original estudou as normas técnicas IEC 61683 (IEC, 1999) e ABNT NBR 16150 (ABNT, 2013). Essas normas apresentam os requisitos necessários para a certificação dos conversores (especificação dos ensaios, das fontes de

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

alimentação, das cargas e dos equipamentos de medidas). Em seguida, estudou os manuais dos equipamentos Fluke 435-II (Fluke, 2012) e Minipa ET-4091 (Minipa, 2010). O equipamento Fluke 435-II é um analisador de qualidade de energia elétrica (próprio para detecção de eventos de afundamentos de tensão, distorções harmônicas e flicker). Especificamente, essa versão II do Fluke 435 (já descontinuada) apresenta um recurso para medição de rendimento de inversores. Inicialmente, imaginava-se que esse recurso iria satisfazer todas as necessidades da bancada. Entretanto, conforme constatado nos testes com um retificador trifásico, se percebeu que a falta de entradas isoladas poderia limitar a aplicação desse equipamento. Já os wattímetros Minipa ET-4091 estavam sendo cogitados apenas por serem uma alternativa de baixo custo. Após os testes de bancada, percebeu-se que essa alternativa seria muito mais atrativa do que a hipótese inicial. Infelizmente, o discente original, por problemas pessoais, acabou sendo substituído.

O discente voluntário substituído (em 3 meses de trabalho) estudou material elaborado pelo orientador sobre DSP TMS320F28379D (Sant’Ana, 2020), visando o controle de um inversor trifásico. Ele estudou os GPIOs, timers e interrupções e configuração dos PWMs. Em seguida, estudou o manual de um inversor trifásico (Supplier, 2022), visando o acionamento de um motor de indução trifásico. Como os I/Os do DSP trabalham em 3,3V e o comando do inversor é feito em 15V, um circuito de interface (para conversão dos pulsos de gate de 3,3V para 15V) precisou ser montado. Com base no material estudado sobre o DSP, o discente conseguiu controlar o inversor trifásico (consequentemente o motor). Como as indutâncias do motor funcionam como um filtro para a corrente, a tensão AC do inversor pode ser aplicada diretamente sobre o motor. Isso não seria um problema para o motor - entretanto, o wattímetro ET-4091 não foi capaz de calcular a potência de saída do inversor, dado que a tensão de saída (não filtrada) é um trem de pulsos, variando de +VDC a 0V e de 0V a -VDC (considerando fase-fase).

Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta a montagem e teste do circuito de conversão dos pulsos de gate, de TTL 3,3V (DSP) para 15V (inversor). Observa-se no detalhe inferior a montagem no protoboard, com o CI 7417 e os conectores de entrada (Gates@3,3V) e saída

(Gates@15V). Como o 7417 é um buffer coletor aberto, resistores pullup para uma alimentação de 15V são utilizados (um para cada um dos seis canais: topA/botA, topB/botB e topC/botC). Nota-se, também, um conector para alimentação de 15V e um outro conector de alimentação com 5V (para o pino 14 do CI). Esse circuito foi testado com um gerador de funções (onda quadrada, 1kHz) em cada um dos seis pinos da entrada Gates@3,3V. O detalhe superior esquerdo mostra um ciclo da onda quadrada com amplitude configurada como 3,3V. Observa-se que, para entrada em nível alto 3,3V (sinal amarelo - 3,2 divisões na escala 1V/div) a saída atinge valor 15V (sinal verde - 3 divisões na escala 5V/div). Observa-se, também, que para entrada nível baixo a saída permanece em nível baixo. Um sinal TTL padrão 3,3V, entretanto, não possui tensão garantida em 3,3V para nível alto - existe uma faixa admissível para essa saída (que pode ser tão baixa quanto $VOH=2,4V$, ainda assim sendo entendida como nível alto por um circuito de entrada com $VIH=2,0V$). Dessa forma, o detalhe superior direito mostra um teste com o gerador de funções configurado para amplitude 2,0V (que seria o valor crítico de nível alto para uma entrada TTL). Observa-se que, para entrada em nível alto 2,0V (sinal amarelo - 2 divisões na escala 1V/div) a saída contínua com valor 15V (sinal verde - 3 divisões na escala 5V/div), demonstrando que o circuito está imune a variações no nível de saída dos pinos do DSP.

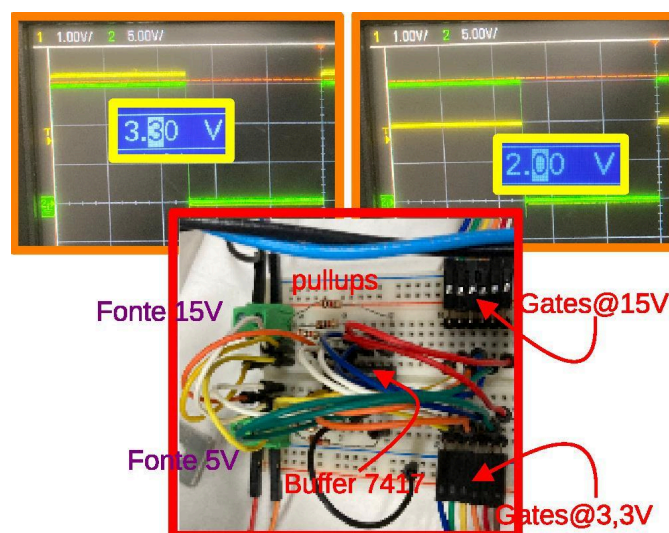


Figura 1 – Montagem e testes do conversor 3,3V para 15V dos pulsos de gate

A Figura 2 apresenta a montagem do inversor trifásico (modelo SPCIT 1000-80-20, do fabricante nacional

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Supplier, para 10 kVA, 800 V, 20 kHz). Este equipamento recebe uma tensão DC e através de chaveamento PWM produz três tensões AC. Tem-se no detalhe à esquerda o retificador a diodos, utilizado para alimentar a entrada DC do inversor. O chaveamento PWM é produzido no DSP (TMS320F28379D). Como os I/Os do DSP são padrão TTL 3,3V e a entrada dos pulsos de gate no inversor operam em 15V, foi utilizado o conversor 3,3V para 15V (apresentado na Figura 1).

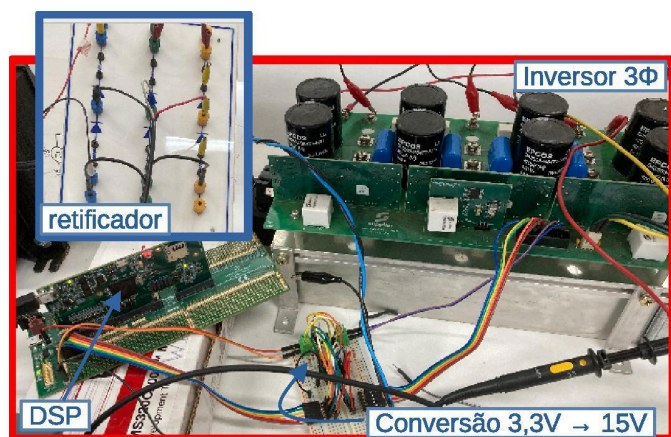


Figura 2 – Montagem do inversor trifásico, controlado por DSP e alimentado por retificador a diodos

O detalhe da esquerda da Figura 3 apresenta o motor de indução trifásico (1,5 CV) cujos enrolamentos são alimentados pelo inversor da Figura 2. Observam-se três pontas de provas do tipo Hall (na escala 100 mV/A, ou seja 10 A/V) para conexão ao osciloscópio e se realizar as medições das correntes de linha i_A , i_B e i_C . Observa-se, também, a conexão do wattímetro Minipa para medição da potência trifásica de saída (utilizando a configuração 3~Bal, onde se mede a corrente de uma das fases e a tensão fase-fase das outras duas fases - na figura, o alicate está medindo a corrente i_A , as pontas de tensão estão medindo a tensão v_{BC}).

O detalhe da direita da Figura 3 apresenta o variômetro da entrada AC do retificador trifásico. Através desse variômetro, pode-se ajustar a tensão DC da saída do retificador, que alimenta o inversor trifásico. Observa-se, a conexão do wattímetro Minipa para medição da potência trifásica de entrada (na figura, o alicate está medindo a corrente i_{Ain} , as pontas de tensão estão medindo a tensão v_{BCin}).

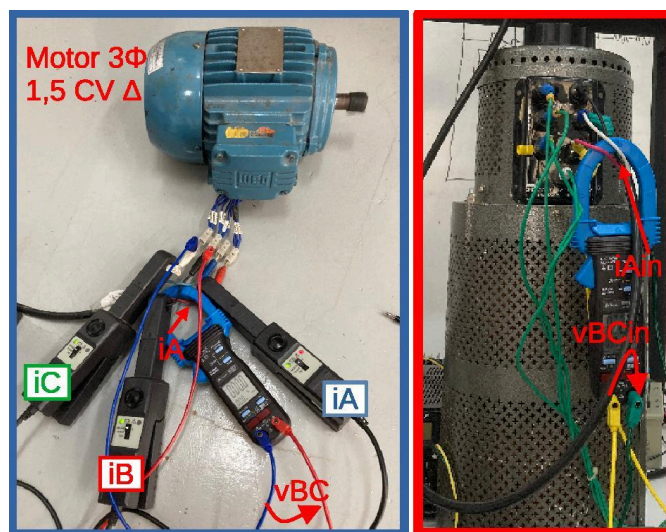


Figura 3 – Conexão dos wattímetros para medição da potência de entrada AC (no variômetro) e potência de saída AC (no motor)

Não houve tempo de se implementar um softstart - ao invés disso, o DSP gerou os pulsos PWM para três referências senoidais (defasadas de 120 graus) com amplitude e frequência constantes. De forma a se realizar uma partida suave no motor, a tensão do variômetro (que é retificada e alimenta o link DC do inversor) foi incrementada lentamente. Como o inversor estava sem ventilação forçada (utilizando apenas dissipador de alumínio), a tensão do variômetro não foi aumentada para a potência nominal do motor. Ao invés disso, foram monitoradas as correntes de linha do motor para até 1A de pico e registrou-se a Figura 4.

Tem-se na Figura 4 em amarelo a tensão fase-fase v_{AB} aplicada ao motor. Observa-se que essa tensão é apenas a tensão do link DC chaveada em 3 níveis (de +VDC a 0V e de 0V a -VDC), ocupando 2 divisões na escala 50V/div - totalizando, portanto, 100V de pico).

Tem-se na Figura 4 (em azul, vermelho e verde) as correntes de linha i_A , i_B e i_C do motor. Observam-se valores de 1A de pico para cada uma dessas correntes (1 divisão nas escalas 1A/div).

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

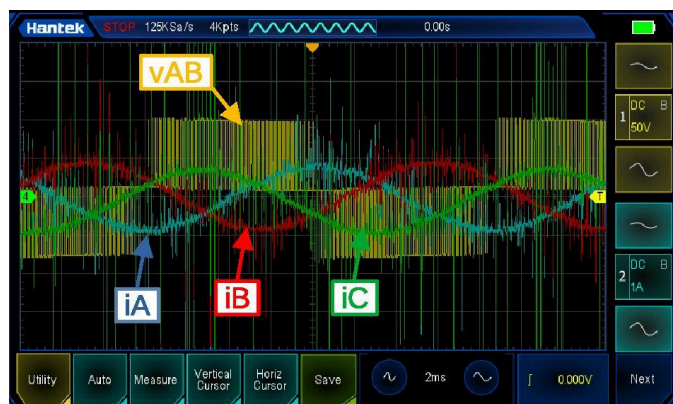


Figura 4 – Tensão fase-fase (gerada no inversor trifásico) e correntes de linha do motor

Esperava-se conseguir medir as potências trifásicas na entrada (entrada do retificador, que é a saída do varivolt) e na saída (entrada do motor, que é a saída AC do inversor) e calcular o rendimento do conversor. Entretanto, o wattímetro de saída não conseguiu calcular a potência. Uma suposição para isso é que o wattímetro digital Minipa não tenha conseguido processar a tensão fase-fase (que não é uma senoide filtrada, mas um sinal DC chaveado em largura de pulso).

Conclusões

Este trabalho apresentou os desenvolvimentos realizados por um IC voluntário que assumiu os 3 últimos meses (junho, julho e agosto) do trabalho. A proposta inicial desse trabalho seria o desenvolvimento de uma bancada para teste de eficiência de conversores eletrônicos de potência. A proposta seria avaliar o uso de wattímetros de baixo custo nessa bancada, em oposição ao uso de equipamentos de custos proibitivos para um laboratório universitário. Percebeu-se que, ao menos o modelo ET-4091 (do fabricante Minipa) não desempenhou bem com tensões chaveadas, típicas de inversores não filtrados. Essa limitação poderia ser corrigida com um filtro - mas o filtro seria uma fonte de perdas. Outros modelos de wattímetros digitais poderiam ser avaliados (frente a este problema das tensões chaveadas). Mas houve uma perda de tempo na substituição dos discentes e o discente substituído teve apenas 3 meses para realizar o trabalho. Como ponto positivo da IC, tem-se que o discente voluntário substituído aprendeu sobre DSP (TMS320F28379D, do fabricante Texas Instruments) e acionamentos de motores elétricos. As conclusões sobre os requisitos da bancada apontam

que:

- 1- Os equipamentos Yokogawa seriam a alternativa ideal - mas, para essa aquisição seriam necessários recursos de agências de fomento;
- 2- Os equipamentos Fluke (embora seja excelentes analisadores de qualidade de energia) ficam muito limitados para aplicações de eficiência energética e ainda apresentam custo elevado (pensando em aquisição pelo próprio grupo de pesquisas, sem recursos externos);
- 3- O wattímetro digital Minipa seria uma excelente alternativa (de baixo custo) para conversores com saídas filtradas. Para conversores com saídas chaveadas outros modelos precisariam ser verificados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Itajubá.

Referências

- (ABNT, 2013) ABNT NBR 16150: Sistemas fotovoltaicos (FV)–Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade. Rio de Janeiro. 2013.
- (Fluke, 2012) Fluke 434-II/435-II/437-II Three Phase Energy and Power Quality Analyzer - Users Manual. 2012
- (IEC, 1999) International Electrotechnical Commission. IEC 61863: Photovoltaic systems – Power conditioners – Procedure for measuring efficiency. 1999
- (Minipa, 2010) ALICATE WATTÍMETRO DIGITAL - Digital Clamp-on Power Meter - Pinza de Potencia Digital - ET-4091. 2010.
- (Sant’Ana, 2020) Wilson C. Sant’Ana, “Blog Doing Tech Myself, label F28379D” <https://doingtechmyself.blogspot.com/search/label/F28379D> , de maio/2020 a junho/2020.
- (Supplier, 2022) Supplier Indústria e Comércio de Eletroeletrônicos Ltda. MANUAL DO USUÁRIO - CONJUNTO INVERSOR TRIFÁSICO SPCIT 1000-80-20-FH00 Especial. 2022.