

ATIVIDADES DIDÁTICAS EXPERIMENTAIS EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA: CONVERGINDO CONHECIMENTOS E TECNOLOGIAS

José Antenor Pomilio

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas – SP, Brasil
antenor@fee.unicamp.br

Resumo — O artigo apresenta algumas das atividades da disciplina Eletrônica de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Simulações computacionais, muito utilizadas no curso, são ferramenta poderosa para a análise de circuitos desde que tenham forte correlação com resultados experimentais. A parte experimental do curso propõe aplicações, abrangendo os conversores básicos: CA-CC, CA-CA, CC-CC e CC-CA. Juntamente com a análise de topologias, são exploradas aplicações típicas: controle de velocidade de motores CC e CA, controle de temperatura, UPS, etc. Tal contexto implica uma estreita colaboração com outras disciplinas: controle, eletrônica analógica, máquinas elétricas, etc. A título de exemplo, alguns dos experimentos são discutidos para ilustrar os aspectos básicos do curso, integrando simulação a circuitos práticos e aplicações.

Palavras-chave — Educação eletrônica de potência, inversores, conversores CC-CC, Simulação, Fonte de alimentação Ininterrupta

EXPERIMENTAL ACTIVITIES IN POWER ELECTRONICS COURSE: MERGING KNOWLEDGE AND APPLICATION

Abstract — This paper presents some of the experimental activities of the Power Electronics discipline of the School of Electrical and Computer Engineering of the University of Campinas, in Brazil. Simulation is a powerful tool to help the analysis of real circuits since the simulation and experimental results have a strong correlation. The course proposes experimental setups, covering the four basic converters: AC-DC, AC-AC, DC-DC and DC-AC. Together with the topologies analysis, typical applications are explored: DC and AC motor speed control, temperature control, UPS, etc. This scenario implies a close collaboration among other disciplines, as control, analog electronics, electric machines, etc. Some of the experiments are discussed to show the basis of the course, integrating simulation and practical circuits and applications.

Keywords — Power Electronics Education, Inverters, DC-DC converters, Simulation, Uninterruptible power supply

Manuscript received 04/17/2020; first revision 05/11/2020; accepted for publication 06/03/2020, by recommendation of Editor Demercil de Souza Oliveira Jr.. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2020.2.0023>

I. INTRODUÇÃO

O conceito de que a Eletrônica de Potência é um campo de atuação para o qual as mais variadas áreas da Engenharia Elétrica contribuem é generalizado [1,2]. A Eletrônica de Potência possui uma forte interface com as áreas de Eletrônica, Conversão de Energia Elétrica e Controle.

À medida que os avanços ocorrem em cada um desses campos, a Eletrônica de Potência se beneficia e incorpora tais conhecimentos e soluções. Isso se dá desde o início, com o desenvolvimento de tiristores, seguido pela evolução dos transistores de potência e hoje com o desenvolvimento de novos materiais, como o carboneto de silício. Da mesma forma, a constante evolução das técnicas de modelagem dinâmica e de controle de sistemas é de grande importância para a realização dos conversores de energia e o consequente cumprimento dos requisitos de cada aplicação específica. O mesmo pode ser dito sobre a evolução de materiais magnéticos, bem como das máquinas elétricas modernas.

Possivelmente o maior mérito da Eletrônica de Potência seja sua capacidade de realizar o processamento ou condicionamento de energia elétrica com perdas mínimas. Esse aspecto é essencial para o desenvolvimento de muitas aplicações; além disso, tal característica está em perfeito alinhamento com conceitos modernos de eficiência energética e preservação ambiental.

A evolução da Eletrônica de Potência levanta novos desafios não só nos citados campos pesquisa, mas também na área regulatória. Questões como distorções harmônicas em redes CA ou problemas de compatibilidade eletromagnética estão intimamente relacionados com o funcionamento dos conversores de energia que estão na interface entre os equipamentos e as redes de energia.

Nesse contexto amplo, ao lado de seu conteúdo específico, a disciplina Eletrônica de Potência tem desafios adicionais: realizar as conexões e a integração de áreas tecnologicamente adjacentes; aplicar conceitos de circuitos, sinais e sistemas (como a equivalência entre análises no domínio de tempo e no domínio de frequência); discutir a pertinência (ou obsolescência) de normas e conceitos; introduzir aplicações industriais típicas, como controle de velocidade de motores elétricos, controle de temperatura, etc.

Este artigo não objetiva quantificar resultados de aprendizagem. O que se pretende é explicitar maneiras de propiciar aos estudantes situações em que possam identificar a interdisciplinaridade que potencializa a importância da Eletrônica de Potência nas modernas aplicações da energia elétrica, bem como valorizar o uso de ferramentas de modelagem e simulação para o projeto e análise dos conversores em suas aplicações.

Uma versão preliminar deste artigo foi apresentada no COBEP-SPEC 2019 [3]. A versão ora apresentada, com discussões ampliadas, novos conteúdos e redigida em português, almeja uma mais efetiva difusão entre estudantes

e, principalmente, docentes de Eletrônica de Potência. O interesse pela difusão e discussão de aspectos educacionais é tradicional na comunidade brasileira de Eletrônica de Potência, como se pode verificar pela expressiva quantidade de artigos nos congressos e na própria revista [4-6].

O artigo se organiza da seguinte maneira: a Seção II apresenta a visão conceitual da disciplina Eletrônica de Potência em seus aspectos teóricos e experimentais. São discutidos o papel e a importância do uso de ferramentas de simulação e a necessária visão crítica dos resultados numéricos. As seções III, IV e V apresentam, a título de exemplos, algumas das atividades realizadas.

II. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA NA UNICAMP – TEORIA E EXPERIMENTAÇÃO

O curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas é do tipo generalista, o que significa que os alunos têm uma visão ampla das diferentes áreas de atuação, incluindo eletrônica, sistemas de energia, telecomunicações, controle e computação. Um aprofundamento em áreas específicas é possível ao final do curso, quando um conjunto de créditos eletivos permite uma especialização temática [7].

A disciplina Eletrônica de Potência possui carga horária de 60 horas, incluindo atividades teóricas e em laboratório.

A disciplina Princípios da Eletrônica é pré-requisito para a Eletrônica de Potência. Embora os alunos tenham uma liberdade relativamente grande para escolher quando fazer a disciplina, a sugestão do catálogo do curso é que seja realizada após as disciplinas de Princípios de Controle e de Princípios de Conversão de Energia. Nestes termos, há uma maior liberdade de abordagem, mesmo que de forma básica, de conceitos de controle por realimentação, projeto de controladores, características de elementos magnéticos, máquinas elétricas, propriedades internas de dispositivos semicondutores, etc.

O objetivo focal da disciplina Eletrônica de Potência é familiarizar o estudante com as estruturas básicas de conversores eletrônicos de potência, identificando aplicações industriais típicas. Busca-se também desenvolver a capacidade de interpretar circuitos e formas de onda, permitindo a análise dos conversores. Conversores CA-CC (retificadores), CA-CA (reguladores CA e cicloconversores); CC-CC (fontes de alimentação), CC-CA (inversores) são estudados. Cada uma dessas estruturas considera o dispositivo semicondutor de energia mais indicado: diodo, tiristor, MOSFET ou IGBT. Nos experimentos também são estudados sensores, circuitos integrados dedicados e estratégias de controle. Os experimentos são organizados de forma a solicitar do aluno a análise dos fenômenos observados nos circuitos e nas cargas.

As atividades laboratoriais são realizadas em equipes de até três alunos e cada turma comporta até 30 alunos. As atividades experimentais, 12 sessões de duas horas, essencialmente requerem análise de circuito, embora existam alguns itens de projeto. Circuitos estão disponíveis para testes, bem como equipamentos de suporte (fontes, osciloscópios digitais, medidores, cargas, etc.).

A. Análise x Projeto

Uma questão importante relativa ao direcionamento didático das atividades didáticas em Eletrônica de Potência diz respeito à ênfase em atividades orientadas ao projeto ou à análise. O projeto e a construção de conversores apresentam

importantes desafios, muitos dos quais são difíceis de prever por meio de simulações. Pode-se citar, principalmente, aspectos de compatibilidade eletro-magnética, os quais dependem fortemente do “layout” dos circuitos e da seleção de componentes. O dimensionamento e construção de elementos magnéticos também é um item que requer muita atenção, assim como o projeto térmico. A experiência do projetista é determinante para o sucesso da realização de um conversor de potência.

Em experiências letivas anteriores, com ênfase no projeto dos conversores foi verificada uma grande dificuldade ou mesmo impossibilidade de finalizar com sucesso as montagens dos conversores, gerando grande frustração nos estudantes. Dada a limitação de carga horária, migrou-se para a estrutura atual que prioriza a análise de circuitos. A importância e os desafios de projetar conversores de energia são enfatizadas durante o curso, mesmo que não se tenha oportunidade de praticá-la nas atividades letivas. Em outras instituições, o projeto de conversores é realizado em uma segunda disciplina de Eletrônica de Potência [8,9]. Na UNICAMP, sendo uma única disciplina, o que inviabiliza o desenvolvimento de projetos específicos, o que ocorre é que os estudantes com maior interesse na área buscam desenvolver seu projeto de graduação neste assunto, tendo então a possibilidade de experimentar os desafios de todo o ciclo, incluindo modelagem, dimensionamento, implementação de protótipo e ensaios de desempenho.

Alguns tópicos de projeto foram mantidos nos experimentos, não diretamente nas topologias, mas em aspectos complementares, como cálculo de perdas, dimensionamento de controladores, caracterização de sensores, circuitos amaciadores, etc.

B. Sobre o Uso de Simulações

A menos que ocorram erros de sintaxe, um algoritmo numérico sempre dará algum resultado. É importante que os alunos desenvolvam sensibilidade e antecipação sobre o que esperar de uma simulação.

Por exemplo, se o circuito simulado tem fontes CA de centenas de Volts e as cargas são da ordem de centenas de Ohms, as correntes esperadas são da ordem de Amperes. Ou seja, a simples inspeção da topologia fornece indicações gerais dos resultados. Quando os resultados do cálculo numérico se distanciam dessa expectativa, deve-se prestar atenção à correta descrição do circuito simulado, bem como à própria programação.

No primeiro caso, trata-se de analisar o circuito para refinar a compreensão de sua operação, com o objetivo de aceitar ou não o resultado da simulação como possível. Na segunda situação a questão é se a programação realizada corresponde ao circuito a ser simulado. Em ambos os casos há uma reflexão sobre o resultado, não apenas a simples aceitação de uma solução numérica que pode não estar relacionada ao sistema real.

Os diferentes níveis de complexidade do modelo permitem o uso do simulador de acordo com o foco de cada experimento [10]. Quando o comportamento interno do interruptor não é relevante, um modelo de interruptor simples pode ser adotado, ou mesmo um bloco funcional para representar parte do circuito. No entanto, se a dinâmica da comutação é importante (por exemplo, para a estimativa de perdas do componente e dos tempos de transição), um modelo mais completo é necessário.

Antes da realização de cada atividade experimental é proposto um exercício de simulação em PSpice. Tal simulação está sempre muito próxima da experiência real e os resultados esperados são muito semelhantes aos obtidos experimentalmente. Disponibiliza-se aos alunos uma versão gratuita do PSpice, que inclui todos os dispositivos e ferramentas de análise necessários.

Qualquer outro simulador, desde que possua modelagem detalhada de dispositivos pode ser usado. Um aspecto importante é a disponibilidade de modelos completos de dispositivos como tiristor, TRIAC, MOSFET e diodos. Particularidades dos dispositivos como, por exemplo, a corrente de manutenção (*holding*) dos tiristores, as capacitâncias dos transistores, a recuperação reversa dos diodos, dentre outros, são explorados nas simulações e, na sequência, verificados nas atividades de laboratório.

Tal ligação entre simulação e verificação prática é importante para que os alunos amadureçam o conceito de que a simulação precisa ser validada, e o que a valida, em última instância, é a realização de um experimento.

As simulações buscam explorar diferentes características do simulador, principalmente análise transitória, análise de frequência (varredura de CA) mudanças de parâmetros dos modelos e importação de modelos.

Os resultados de simulação no domínio de tempo podem ser imediatamente relacionados com as observações durante as atividades experimentais. Já análises no domínio da frequência, que são utilizadas para o dimensionamento de controladores e na identificação de possíveis instabilidades dinâmicas, são de verificação de aderência com a prática menos imediata.

Mudanças nos parâmetros dos modelos disponíveis na versão livre do simulador permitem expandir o conjunto limitado de dispositivos disponíveis nessa versão [11].

C. Os Experimentos

Como as aulas teóricas e as práticas se alternam, o tema do experimento está em sincronia com a teoria.

São programados sete experimentos. Cinco dos quais são executados em duas sessões, enquanto dois experimentos são concluídos em uma sessão cada. Os experimentos e principais tópicos abordados são:

- Retificador não controlado I: circuito monofásico; filtros CC capacitivo e indutivo; harmônicos e fator de potência.
- Retificador não controlado II: topologia trifásica; filtros CC capacitivo e indutivo; corrente CA, harmônicos, fator de potência, corrente de “inrush”; comutação.
- Retificador controlado I: Retificador semicontrolado usando tiristores; controle de fase utilizando TCA785; comportamento de carga resistiva e característica estática.
- Retificador controlado II: Retificador totalmente controlado; acionamento de motor CC; controle de velocidade; resposta às variações de carga.
- Conversor CA-CA: Conversor com TRIAC e comando por ciclos inteiros utilizando circuito integrado CA3059; controle de temperatura com regulador PI; caracterização de diferentes sensores de temperatura.
- Dispositivos de potência para aplicações chaveadas I: diodos; análise comparativa de diodos Schottky, rápido e lento; transitórios de entrada em condução e desligamento, capacitância de junção.
- Dispositivos de potência para aplicações chaveadas II: transistores; análise comparativa de transistores bipolar, MOSFET e IGBT; circuitos de comando; transitórios de

entrada em condução e desligamento; acionamento de cargas resistiva e indutiva.

- Conversão CC-CC com MOSFET I: fonte de alimentação abaixadora de tensão; Modulação da Largura de Pulso usando LM3524/25, perdas de comutação.
- Conversão CC-CC com MOSFET II: dimensionamento de amaciador de desligamento; eficiência do conversor; característica estática nos modos de condução contínua e descontínua; regulação de tensão de saída com controlador PI.
- Conversão CC-CA com IGBT I: inversor monofásico; modulação PWM de três níveis com circuitos analógicos; filtro de saída LC e carga resistiva; análise espectral.
- Conversão CC-CA com IGBT II: síntese de diferentes formas de onda; caracterização do filtro LC; efeito de carga não linear; operação em malha fechada com regulação da saída.
- Conversão CC-CA III: inversor trifásico com controlador digital; saturação magnética de carga indutiva por redução de frequência; acionamento de motor de indução com controle escalar V/f.

Todos os experimentos contam com montagens prontas, projetadas especificamente para a disciplina. A exceção do experimento de análise dos componentes de potência, apresentado na próxima seção, os ensaios dos conversores utilizam tensões adequadas a aplicações reais. Nos conversores com entrada CA, a alimentação é 127/220 V. No experimento de conversores CC-CC a tensão de entrada é de 20 V. Nos experimentos de inversores as tensões também são compatíveis com aplicações práticas, como UPS e acionamento de motores.

Na sequência são discutidos, a título de ilustração dos princípios que regem o curso, alguns dos experimentos, enfatizando a correlação entre simulação e resultados experimentais. Nem todos os experimentos são apresentados, pois isso estenderia em demasia o artigo.

III. CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DE DISPOSITIVOS DE COMUTAÇÃO RÁPIDA

As cinco atividades práticas iniciais exploram conversores com comutação pela rede, com entrada CA, utilizando diodos tiristores. As cinco sessões experimentais finais tratam de conversores com entrada CC e fazem uso de transistores e diodos rápidos. Entre um e outro grupo de atividades há duas sessões que fazem experimentações comparativas dos dispositivos rápidos.

Inicialmente são analisados três diodos, sendo um retificador lento (o mesmo usado nas experiências iniciais), um retificador rápido (a ser utilizado nos experimentos vindouros) e um diodo Schottky. O objetivo é verificar, principalmente, os distintos comportamentos durante o processo de desligamento, caracterizando os atrasos e a carga de recuperação reversa. São ensaiados diodos para 1 A, encapsulados em epóxi e tensão similar (exceto o Schottky). Os ensaios ocorrem com tensão de 15 V.

Na sessão seguinte são estudados comparativamente transistor bipolar de potência, MOSFET e IGBT, focalizando aspectos de acionamento (*drivers*) e características de comutação com diferentes cargas (resistiva e indutiva). Os ensaios são feitos em baixa tensão e corrente, dando ênfase à importância do circuito de acionamento para o melhor funcionamento dos dispositivos nas comutações. Os

transistores possuem características similares de tensão e de corrente, com encapsulamentos TO-220 ou similar.

Como um dos objetivos do curso é vincular a simulação com a experimentação, previamente os estudantes realizaram um estudo baseado no PSpice com situações que se ocorrerão no experimento. Um dos casos analisados é o comportamento no desligamento do diodo Schottky na presença de uma indutância em série.

A Figura 1 mostra o resultado da simulação e a Figura 2, o resultado experimental. Ambos são muito consistentes e permitem discutir qualitativamente o comportamento capacitivo de uma junção reversamente polarizada.

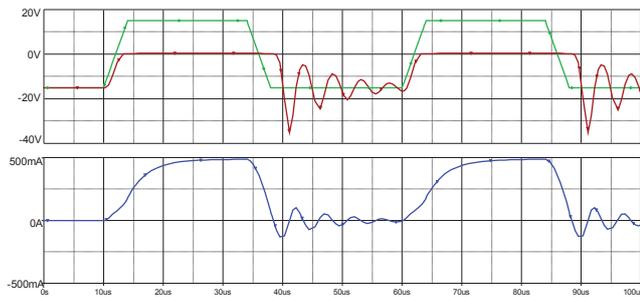


Fig. 1. Simulação: Diodo Schottky com indutância em série. Acima: Tensão de alimentação (verde) e tensão Vak (vermelho). Abaixo: corrente de anodo.

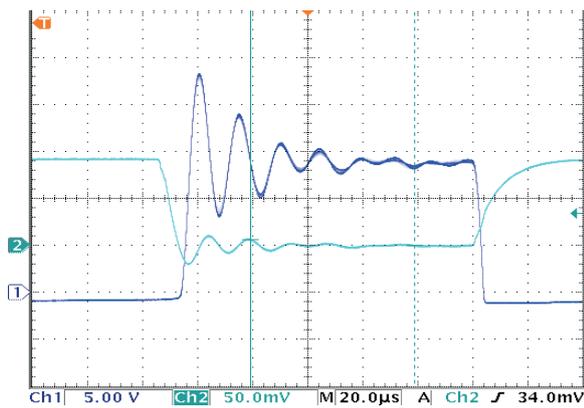


Fig. 2. Resultado experimental de diodo Schottky com indutância em série. Tensão Vka (canal 1, 5 V/div.) e corrente de anodo (canal 2, 50 mA/div.).

IV. CONVERSOR ABAIXADOR DE TENSÃO

Este experimento apresenta o conversor abaixador de tensão (*buck*) utilizando MOSFET. A modulação PWM e as características do circuito integrado controlador LM3524/25 são verificadas. As diferenças entre os modos de condução contínua e descontínua são testadas e o efeito de um circuito amaciador de desligamento é verificado. Discute-se o comportamento dinâmico do conversor, investiga-se o projeto do controlador e as instabilidades na operação.

Em relação à modelagem dinâmica, que explora um modelo linearizado do conversor no modo de condução contínua, uma das tarefas de simulação é obter os diagramas de Bode tendo como variável controlada a tensão de saída, fazendo uso de um compensador PI. A Figura 3 mostra o circuito equivalente usado para a análise em frequência, enquanto os diagramas de Bode estão na Figura 4. Na simulação, dois casos são analisados variando apenas a parte proporcional do compensador. Um dos casos é estável

(diagramas superiores na Figura 4) e o outro, com ganho proporcional reduzido, (parte inferior da Figura 4) é instável.

O amplificador de erro do LM3524/25 (bloco G) é de transcondutância, ou seja, tem uma saída em corrente para um erro de tensão em sua entrada. Assim, a tensão V_c (tensão de controle na Figura 3) realiza a característica PI do controlador. O resistor de 10 M Ω em paralelo com o capacitor C_i é necessário para permitir a determinação do ponto de partida (*bias*) da simulação. Os blocos de ganho que seguem representam a portadora do modulador PWM com amplitude V_p e a tensão de CC de entrada, V_i . A tensão de saída é realimentada através do atenuador com ganho at . A opção por uma simulação que preserve a topologia circuital, ao invés de recorrer à modelagem algébrica é feita para aproximar a simulação do experimento.

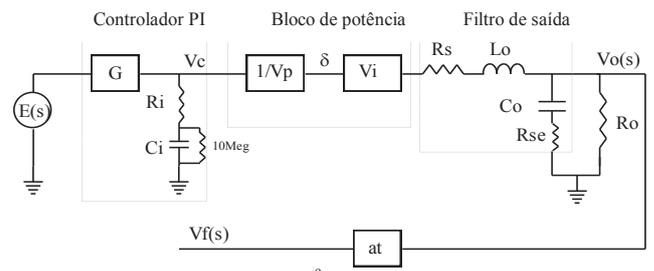


Fig. 3. Circuito equivalente do conversor para estudos dinâmicos (resposta de malha aberta no modo de condução contínua).

Os resultados experimentais são consistentes com a simulação. Na situação estável a margem de fase (Figura 4) é reduzida, de modo que se espera uma resposta pouco amortecida a um degrau de carga, como mostra a Figura 5.

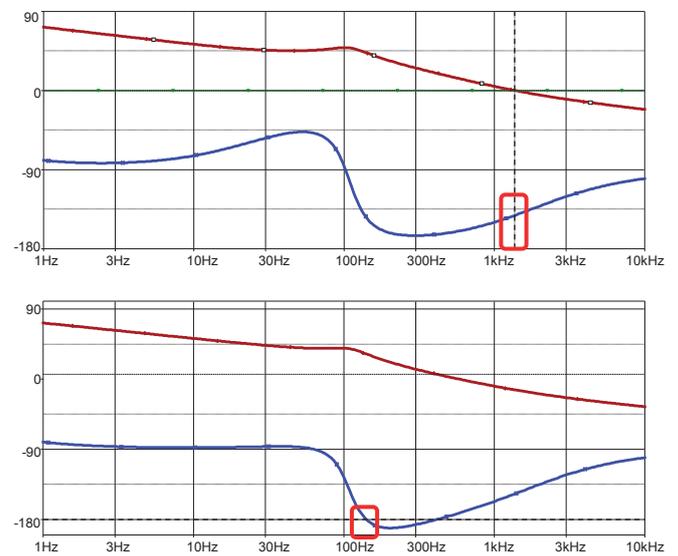


Fig. 4. Ganho de malha aberta (vermelho) [dB] e fase (azul) [graus]. Acima, sistema estável, $R_i = 50 \text{ k}\Omega$. Abaixo, sistema instável, $R_i = 10 \text{ k}\Omega$.

O sinal de controle é a entrada do modulador PWM, o que significa que é a saída do controlador. Aplicando carga a tensão de saída inicialmente diminui, ampliando o erro na entrada do compensador PI, fazendo com que aumente sua saída a fim de incrementar a razão cíclica. O regulador PI leva à sobre compensação, seguida de uma oscilação na

variável controlada, como antecipado pela estreita margem de fase vista na simulação.

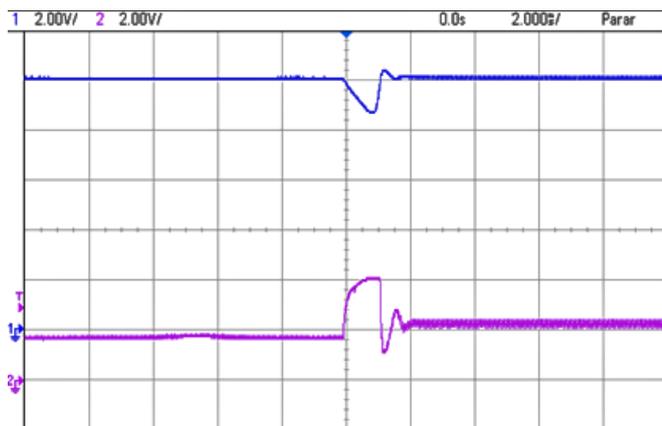


Fig. 5. Regulação da tensão de saída após aplicação de carga. Tensão de saída (azul) 2 V/div.; Tensão de controle (magenta) 2 V/div. Horiz.: 2 ms/div.

A Figura 6 mostra o circuito completo do conversor abaixador de tensão. As medições de corrente são feitas em resistores de 1 Ω . O acionador do transistor utiliza uma alimentação isolada (V_{gg}). Uma chave permite escolher operar em malha aberta ou fechada.

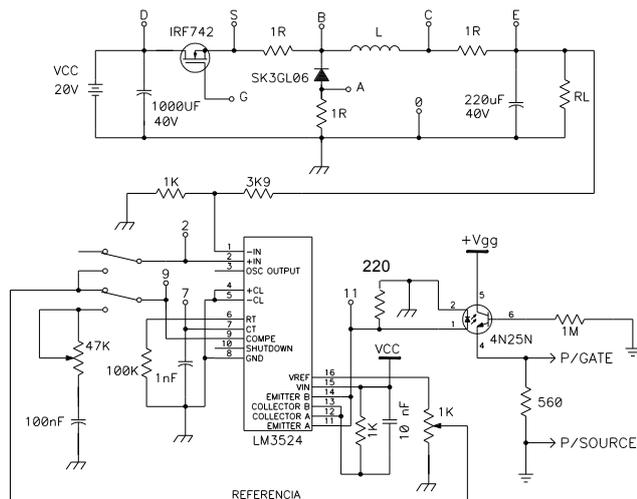


Fig. 6. Circuito experimental do conversor abaixador de tensão.

Também prevista pela simulação, a situação instável é alcançada reduzindo o ganho proporcional (há um trimpot no circuito para variar o ganho proporcional).

A Figura 7 mostra a transição da operação estável para a instável que ocorre ao se reduzir o ganho proporcional, como previsto pela simulação. Após se tornar instável, o controlador oscila entre valores extremos e a frequência oscilatória diminui, uma vez que a não linearidade do circuito define um ciclo limite e a efetiva frequência de oscilação, não sendo mais válidas as considerações de linearização do modelo.

A Figura 8 mostra detalhes do desligamento do transistor MOSFET, incluindo a potência instantânea, obtida pela multiplicação da corrente de dreno (medida em um resistor de 1 Ω em série com o dreno) e a tensão V_{DS} entre dreno e fonte. Usando este resultado e a folha de dados do MOSFET, os alunos projetam um circuito amaciador de desligamento

do tipo RCD e o inserem no circuito. A mesma figura mostra o efeito do “snubber”, reduzindo drasticamente a perda de energia na transição de desligamento.

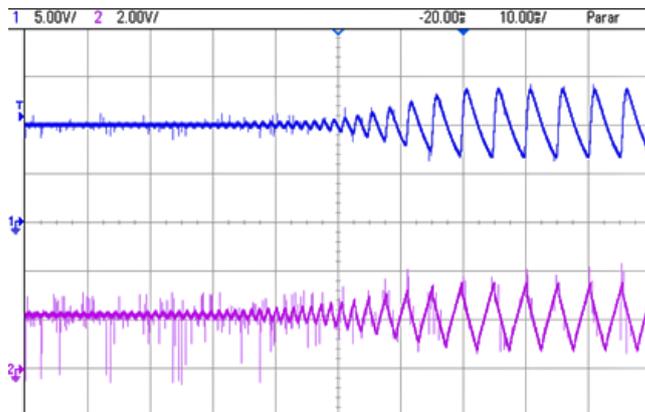


Fig. 7. Instabilidade devida a alteração no controlador. Tensão de saída (azul) 5 V/div.; Sinal de controle (magenta) 2 V/div. Horiz.: 10 ms/div.

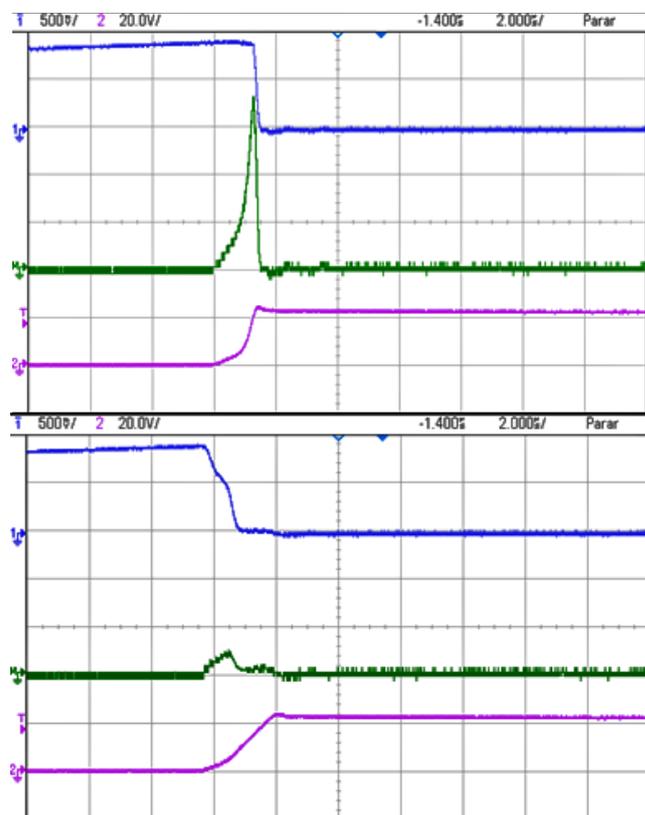


Fig. 8. Desligamento do MOSFET: Acima, sem snubber; abaixo, com snubber. Corrente de dreno (azul) 0,5 A/div., Tensão drenofonte (verde) 20 V/div., Potência (magenta) 10 W/div. Horiz.: 2 μ s/div.

V. INVERSOR MONOFÁSICO

O contexto do experimento é a produção de uma tensão senoidal, tendo como exemplo de aplicação uma Fonte de Alimentação Ininterrupta (UPS – *Uninterruptible Power Supply*). Neste tipo de aplicação, as cargas típicas são computadores, cujo elemento de conexão com a fonte CA normalmente é um retificador monofásico com filtro

capacitivo (o qual é de conhecimento dos estudantes uma vez que foi estudado na primeira sessão de laboratório da disciplina). A qualidade da saída senoidal pode ser medida, por exemplo, de acordo com normas para UPS [12], focando o problema da elevada distorção harmônica quando se alimenta uma carga não linear.

O inversor monofásico tem um modulador PWM analógico. A ideia é verificar a geração das principais formas de onda: a portadora triangular, o sinal de referência (modulante) e os pulsos PWM. Um controlador digital é usado no experimento seguinte (Conversor CC-CA III) de acionamento de motor de indução.

Faz-se uma modulação de três níveis usando uma única portadora triangular, o sinal de referência e seu inverso para a produção dos pulsos PWM, como ilustrado na Figura 9. A experiência se inicia com operação em malha aberta. Na sequência, a tensão de saída (senoidal) é realimentada. A Figura 10 mostra o diagrama de blocos do circuito.

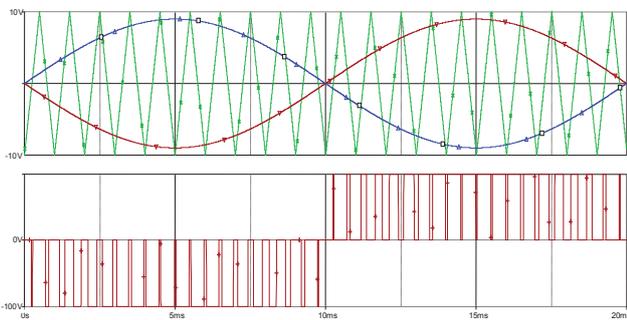


Fig. 9. Sinal PWM de três níveis. Acima: portadora triangular e modulantes senoidais. Abaixo: sinal resultante na saída do inversor.

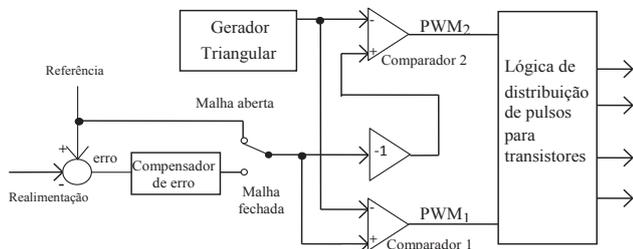


Fig. 10. Circuito analógico para comando e controle do inversor.

No respectivo exercício de simulação, a resposta em frequência do filtro de saída LC (fracamente amortecido) permite observar a ressonância em torno de 1 kHz, operando sem carga. Com carga resistiva, a ressonância é amortecida, mantendo as respostas em baixa frequência e a atenuação na frequência de comutação, conforme mostrado na Figura 11. Também na simulação, mas na análise no tempo, verifica-se o impacto de uma carga não linear na forma da tensão de saída. Para simplificar e permitir uma simulação com celeridade utiliza-se um sinal PWM de três níveis obtido conceitualmente (sem o inversor), como mostra a Figura 12.

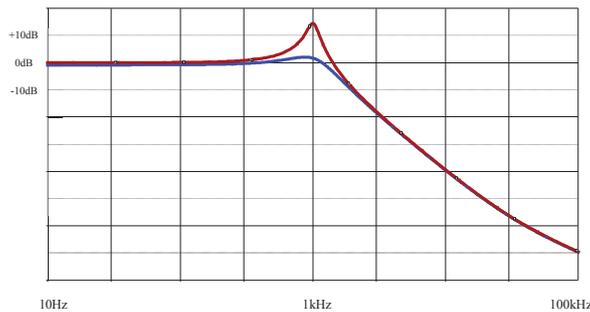
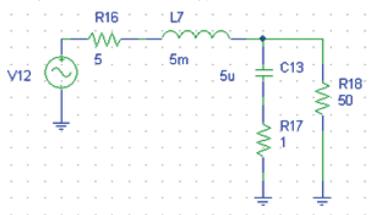


Fig. 11. Simulação: Circuito (acima) e resposta do filtro LC (abaixo): Pouco amortecimento (vermelho), amortecido (azul). Horiz: 10 Hz a 100 kHz (escala log). Vert.: 10 dB/div.

Com uma carga resistiva, a tensão na saída do filtro é senoidal, como esperado. Aplicando o retificador monofásico com filtro capacitivo, como mostra a Figura 12, a tensão CA é fortemente distorcida, como mostrado na Figura 13. As formas de onda permitem notar a presença da componente de comutação em alta frequência, bem como uma oscilação em torno de 1 kHz, induzida pelo comportamento do filtro pouco amortecido. O achatamento da tensão CA é imposto pelo capacitor CC durante os intervalos de recarga.

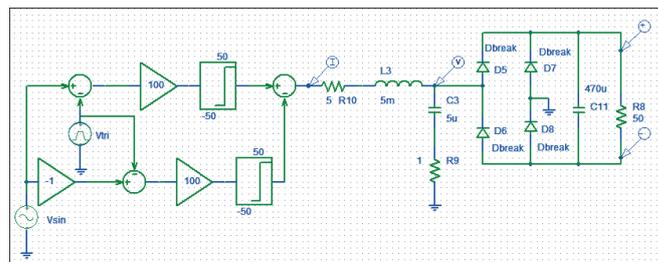


Fig. 12. Simulação funcional de inversor com filtro LC e carga não linear.

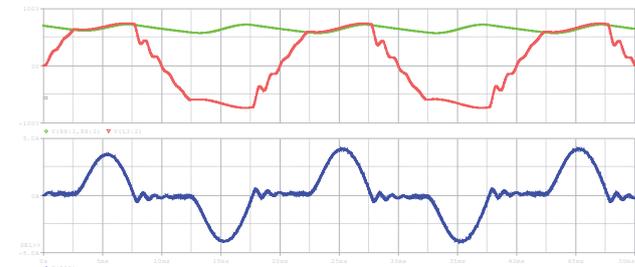


Fig. 13. Simulação: Tensão de saída do retificador (verde); Tensão (vermelho, 20 V/div.) e corrente (azul, 1 A/div.) na entrada do retificador. Horiz.: 2 ms/div.

A Figura 14 mostra as formas de onda experimentais correspondentes. São evidentes as semelhanças entre simulação e experimentação: a parte superior plana de tensão, a presença de distorções associadas à frequência de comutação, visível principalmente na corrente. A oscilação devido ao filtro LC é atenuada pelas perdas do circuito e é identificada com mais clareza usando a função FFT osciloscópio.

Para melhorar a forma de onda de saída é necessário operar em malha fechada. Um interruptor na placa de teste altera o funcionamento de malha aberta para malha fechada.

Posto que a referência é senoidal, não é possível rastreá-la com erro nulo mesmo usando elemento integral no controlador. Isso poderia ser feito com controladores mais complexos, por exemplo um controlador proporcional

ressonante, mas isso foge dos objetivos do curso. Como o foco do experimento é verificar a capacidade de minimizar a distorção por meio de realimentação, o compensador escolhido é o mais simples, ou seja, um ganho proporcional, suficiente para reduzir a distorção da saída.

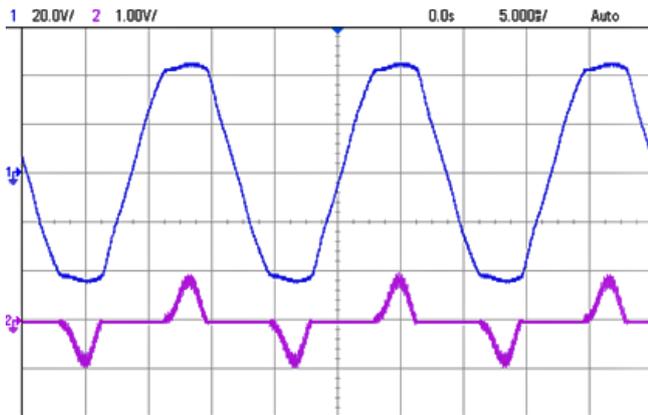


Fig. 14. Resultados experimentais em malha aberta e carga não linear: Tensão (azul, 20 V/div.) e corrente (magenta, 1 A/div.) na entrada do retificador. Horiz.: 5 ms/div.

A Figura 15 mostra as formas de onda na entrada do retificador com o inversor em malha fechada. A melhora da forma de onda é evidente. A referência interna para o modulador PWM, após o compensador, não é mais sinusoidal, como visto na Figura 16. Dado que a corrente continua distorcida, a tensão produzida pelo inversor deve ser tal que resulte uma queda de tensão no indutor do filtro para compensar as harmônicas da corrente, de modo a resultar uma tensão com reduzida distorção nos terminais de carga.

A Figura 17 mostra o circuito eletrônico para a geração dos comandos PWM e o controlador de tensão.

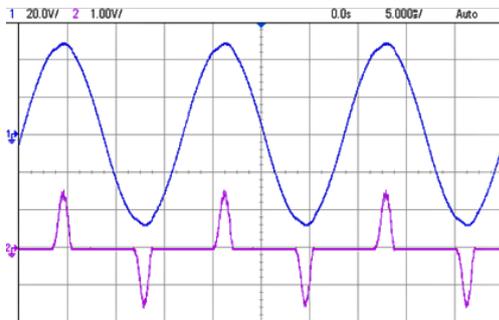


Fig. 15. Resultados experimentais em malha fechada e carga não linear: Tensão (azul, 20 V/div.) e corrente (magenta, 1 A/div.) na entrada do retificador. Horiz.: 5 ms/div...

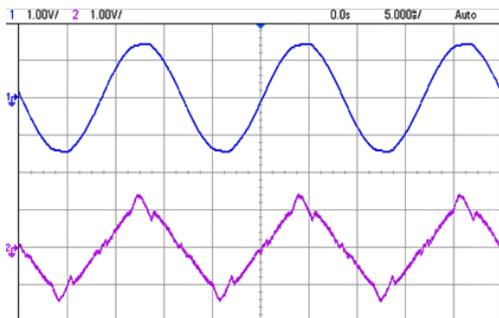


Fig. 16. Resultados experimentais em malha fechada e carga não linear: Tensão de saída realimentada (azul, 1 V/div.) e sinal modulante (magenta, 1 V/div.) Horiz.: 5 ms/div.

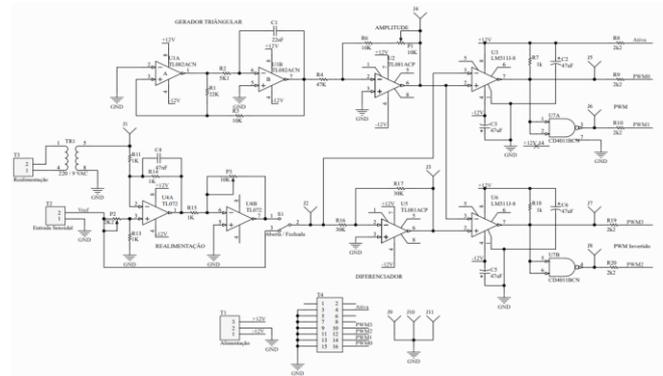


Fig. 17. Circuito eletrônico de comando e controle.

A realimentação da tensão de saída é feita por meio de um transformador colocado na placa eletrônica (Figura 17). Os estudantes fazem a conexão sem ter informação da polaridade correta. A conexão correta leva à melhoria da forma de onda. A conexão invertida representa uma realimentação positiva e conduz o inversor a produzir uma onda quadrada. Ambos os casos são verificados experimentalmente. O roteiro da experiência explicita que não se faz a regulação do valor eficaz da tensão (que necessitaria de uma malha de controle adicional). O ajuste do valor eficaz é feito pela alteração na amplitude da referência.

A topologia de potência é implementada utilizando um módulo de potência comercial (IRAMS06UP60A ou similar) que incorpora proteções de curto-circuito e térmica, tempo morto e circuitos auxiliares de "bootstrap". Neste experimento são usadas duas das três fases disponíveis no módulo. Os sinais PWM são transmitidos por meio de acopladores óticos (HCPL2601).

VI. CONCLUSÕES

Desde o seu início a Eletrônica de Potência tem sido caracterizada por uma forte integração de diversas áreas da Engenharia Elétrica. Além do seu próprio conteúdo, sua associação especialmente com as áreas de conversão de energia elétrica, controle de sistemas e processos, eletrônicas analógica e digital, transforma a disciplina em uma excelente maneira de agregar esses diversos conceitos presentes na formação dos Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas.

O uso conjunto e sinérgico de ferramentas de simulação e práticas laboratoriais permite dar consistência ao uso de simuladores e, ao mesmo tempo, possibilita que o desenvolvimento de análises prévias, baseados em modelos, seja verificado nas sessões experimentais.

Por ser a única disciplina que aborda Eletrônica de Potência no currículo, é um desafio cobrir todo o conteúdo em um curso de 60 horas, incluindo atividades teóricas e experimentais. No entanto, o conjunto de experimentos permite uma visão ampla e geral dos diferentes conversores de energia, ao mesmo tempo em que explora aplicações industriais típicas utilizando circuitos integrados dedicados.

Todo o material desenvolvido, incluindo guias de experimentos e circuitos experimentais está disponível em <https://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/ee833-eletronica-de-potencia-graduacao>.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à equipe de suporte técnico da FEEC, especialmente Nestor de Oliveira, João Paulo Gomes e Bruno Battistella. Agradece também a docentes que, ao longo do tempo ministraram e colaboraram com o aperfeiçoamento da disciplina, em especial os professores Marcelo Villalva, Elnatan Chagas Ferreira e José Augusto Afonso (*in memoriam*). Finalmente, agradece aos inúmeros estudantes e monitores que sempre auxiliam do oferecimento da disciplina e na melhoria dos roteiros experimentais e na execução das experiências.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Rashid, Ed., "Power Electronics Handbook", Elsevier, 2017.
- [2] M. Kazmierkowski, F. Blaabjerg, R. Krishnan, "Control in Power Electronics", Academic Press, 2002.
- [3] J. A. Pomilio, "Power Electronics Lab: Converging Knowledge and Technologies", in *5th IEEE Southern Power Electronics Conference & 15^o Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP-SPEC*, dez. 2019.
- [4] F. S. Garcia, A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, "Plataforma de Ensino de Eletrônica de Potência Versátil e de Baixo Custo", *Eletrônica de Potência*, v. 13, n.2, p. 85-90, maio 2008.
- [5] C. A. Canesin, F. A. S. Gonçalves, L. P. Sampaio, "Simulation Tools For Power Electronics Courses, Based In Java Technologies", in *Eletrônica de Potência*, v.13, n.2, p. 91-98, maio 2008.
- [6] S. A. Oliveira da Silva, D. H. Wollz, L. P. Sampaio, "Development of a didactic workbench using real-time monitoring system for teaching of photovoltaic systems", in *Eletrônica de Potência*, v.23, n.3, p. 371-381, set. 2018.
- [7] J. A. Pomilio, M. D. Yacoub, A. Yamakami, A. dos Santos Jr.: "Integração dos Ensinos de Graduação e de Pós-Graduação na FEEC - UNICAMP: Programa Integrado de Formação e Certificados de Estudos", in

XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, set. 2007.

- [8] V. F. Pires, A. J. Pires, O. P. Dias, "Self-learning as a tool for teaching power electronics", in *5th IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (ICELIE)*, nov. 2011.
- [9] S. Bonho, R. Pizzio, F. A. B. Batista, C. A. Petry, "Teaching power electronics with engineering interdisciplinary projects", in *13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st IEEE Southern Power Electronics Conference*, Fortaleza, Brazil, 2015.
- [10] M. Darwish, C. Marouchos, "Simulation levels in teaching power electronics", in *48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, 2013.
- [11] S. Munk-Nielsen, "Experience with Spice teaching power electronics", in *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009.
- [12] IEC 62040-3, Uninterruptible power systems (UPS) – Part 3: *Method of specifying the performance and test requirements*, 2011.

DADOS BIOGRÁFICOS

José Antenor Pomilio recebeu os títulos de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Campinas, Brasil, em 1983, 1986 e 1991, respectivamente. De 1988 a 1991, ele foi o Chefe do Grupo de Eletrônica de Potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Foi professor visitante na Universidade de Pádua, em 1993 e 2015 e na Terceira Universidade de Roma, em 2003, ambas na Itália. É professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de Campinas, onde leciona desde 1984. Dr. Pomilio foi presidente da SOBRAEP em 2000-2002, foi também membro do Conselho Administrativo da IEEE Power Electronics Society entre 1997 e 2002. Foi Editor e é membro do Conselho da revista *Eletrônica de Potência*, além de ter sido editor associado da *IEEE Transactions on Power Electronics* de 2003 a 2018.