

Proposta de um Guia Didático para Ensino de Eletrônica de Potência Voltado para Controle de Conversores Eletrônicos.

1st Ruan Sávio Ferreira Zeferino
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
Cruz das Almas, Brasil
zeferinoruan@gmail.com

2nd Bruna Samille Assis Sampaio
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
Cruz das Almas, Brasil
brunasamille@aluno.ufrb.edu.br

3rd Rodrigo Cássio de Barros
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
Cruz das Almas, Brasil
rodrigo.barros@ufrb.edu.br

4th Renata Oliveira de Sousa
Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Curitiba, Brasil
renatasousa@utfpr.edu.br

5th Heverton Augusto Pereira
Departamento de Engenharia Elétrica (DEL)
Universidade Federal de Viçosa (UFV)
Viçosa, Brasil
heverton.pereira@ufv.br

6th Allan Fagner Cupertino
Departamento de Engenharia Elétrica (DEL)
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Juiz de Fora, Brasil
allan.cupertino@ufjf.br

Abstract— The increased insertion of renewable energy sources into the electrical power system, resulting from growing environmental concerns, has driven the global energy transition. In this context, electronic converters have emerged as an attractive solution to integrate these sources into the electrical sector. The qualification of professionals in this area therefore becomes even more fundamental. This work proposes a educational platform addressing practical methodology in teaching the control of power electronic converters. A methodology is presented that uses the Texas Instruments LAUNCHXL-F28379D DSP and PLECS software to control the current of a three-phase inverter. A case study is presented, highlighting the effectiveness of the platform and the flexibility of the control system. This approach highlights the relevance of practical teaching materials to train professionals capable of facing the challenges of the modern electrical sector.

Keywords — *three-phase inverter; inverter control; power electronics; educational platform; DSP F28379D; 3PhGaNIInv.*

I. INTRODUÇÃO

As crescentes preocupações ambientais têm impulsionado uma série de reflexões e esforços rumo a uma transição energética [1]. Com o objetivo de concretizar essa transição, as nações estão incentivando o uso de fontes renováveis de energia, e estão investindo em tecnologias que viabilizem a integração dessas fontes no Setor Elétrico (SE) [2], [3]. O Brasil, em especial, ocupa uma posição de forte protagonismo no que diz respeito à diversificação de sua matriz elétrica, sendo referência nesse aspecto [4]. Nesse contexto, a Eletrônica de Potência (EP) tem um particular destaque por ser o meio viabilizador dessa integração. De fato, sistemas de abaixamento/elevação de tensão (CC/CC), retificação de tensão (CA/CC), inversão de tensão (CC/CA) são, geralmente, circuitos baseados em EP [5]. Esse panorama sugere que o desenvolvimento de um SE sustentável e diverso requer uma demanda de recursos humanos com qualificação a altura para desempenhar um papel significativo na especificação, utilização, projeto, manutenção, pesquisa e

desenvolvimento de processos e equipamentos elétrico-eletrônicos, tanto na indústria quanto na academia [6]. Nesse contexto, há uma expectativa do mercado para os próximos anos, de que haja profissionais com conhecimento prático em operação, manutenção e controle dos conversores eletrônicos, o que implica uma chamada para que as instituições de ensino se adaptem a essa realidade [7].

Por mais que o ensino de EP não seja novidade, mecanismos que ajudem a relacionar teoria e prática são essenciais para construir um conhecimento sólido e bem fundamentado. A literatura é rica em trabalhos que reportam sucesso com aplicação de metodologias diversificadas para o ensino [7], [8] e trabalhos que apresentam plataformas práticas para o aprendizado de EP [10], relatando, nos resultados, alunos que diziam não ser possível finalizar um projeto de EP utilizando somente conhecimentos da teoria [8]. Além disso, o engenheiro que trabalhará diretamente nessa área precisa conhecer as técnicas de modulação e controle de conversores eletrônicos [11].

Neste contexto, uma forma de aproximar a teoria da prática é a implementação de plataformas de desenvolvimento acessíveis. Uma plataforma promissora é o *LaunchPad kit*, plataforma de desenvolvimento pela fabricada pela *Texas Instruments* (TI). O *kit* inclui o processador de sinais digitais (DSP, do inglês, *Digital Signal Processor*) LAUNCHXL-F28379D, que pode trabalhar com diversos *drivers* externos (*BoosterPack*) também fabricados pela TI. Os DSPs da família F28379X são bem relatados na literatura em aplicações de ensino de EP [12] controle de motores de indução [13], [14] e controle automático em tempo real [15].

Portanto, este trabalho apresenta um guia para o uso de um DSP em uma bancada de testes didática para implementação de conteúdos de EP, instrumentação e controle. Como estudo de caso, considera-se um sistema de armazenamento por baterias, em que o controle de corrente durante a descarga da

bateria é realizado por um inversor trifásico. Além disso, através do *software* PLECS e do DSP, realiza-se o controle de corrente no inversor. Testes experimentais são apresentados afim de validar a plataforma didática.

II. COMPOSIÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA

A proposta desta seção é apresentar os equipamentos utilizados na bancada didática, dando ênfase às principais características elétricas e especificações do DSP, do inversor e do *software* utilizado para o controle.

A. Inversor

Na Figura 1(a) é visto um inversor trifásico baseado em três módulos de potência, LMG5200 [16], feitos de nitreto de gálio (GaN), com dois FETs (*Field Effect Transistor*) cada um. Os FETs de GaN oferecem vantagens significativas para conversão de energia, o que é mais rápido que os FETs tradicionais [16].

Para estratégias de controle é essencial que especialmente os dados de medição de corrente sejam precisos. Para isso ele conta com três resistores de 5-m Ω , que detectam com precisão correntes entre $\pm 16A$, mas com operação nominal de $\pm 10A$. Esses resistores são ligados em *shunt*, conforme Figura 2, ao circuito integrado (CI) INA240 para medição de corrente [17].

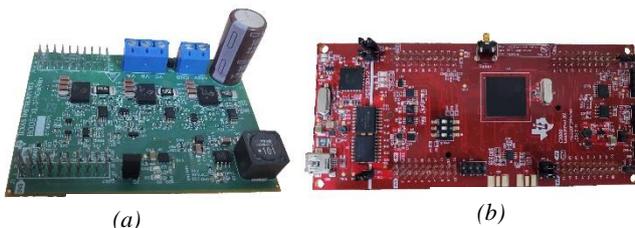


Figura 1. (a) Inversor trifásico BOOSTXL-3PhGaNIv; (b) DSP F28379D

A proteção contra sobrecorrente de *hardware* é implementada com o CI TLV3201 com limite de desarme definido como 12A [18]. A Tabela 1 é adaptada do *datasheet* do fabricante e resume alguns dos recursos do 3PhGaNIv [19], além disso a corrente de saída é limitada pela temperatura de junção das chaves semicondutoras de 125°C.

Tabela 1. Recursos do 3PhGaNIv

Parâmetro	Valor típico	Especificação
Entrada V_{cc}	48 V (12V a 60 V)	Máximo de 80V
Corrente de saída	7A _{RMS} ou 10A pico	-40°C a 125°C
Capacitor do barramento	220 μ F	-
Potência de entrada	400W	$\eta(100kHz) = 98,5\%$
Frequência de comutação	40 a 100kHz	Portadora da PWM
Sensor de corrente	5-m Ω <i>shunt</i>	CI INA240
Temperatura de operação	-40°C a 85°C	-
Proteção sobrecorrente	<i>setpoint</i> para 12A	CI TLV3201

A comutação dos GaN-FETs é feita com modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation* - PWM), e depende que um DSP forneça os sinais. O inversor recebe três sinais de PWM em nível alto (*high*) e três sinais em nível baixo (*low*): PWMMAH, PWMAL, PWMBH, PWMBL, PWMCH e PWMCL, como mostra a Figura 2.

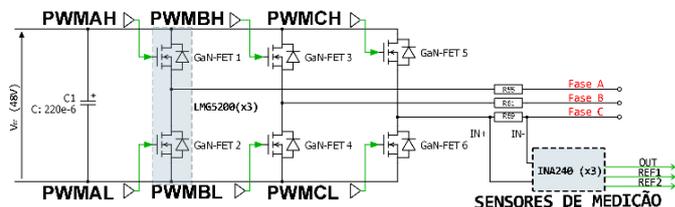


Figura 2. Inversor trifásico com sensor de corrente em *shunt*.

B. LAUNCHXL-F28379D

O LAUNCHXL-F28379D é o elemento principal do *LaunchPad*, um DSP baseado no microcontrolador TMS320F28379D, da família C2000 da *Texas Instruments* (Figura 1(b)). Essa topologia é otimizada para aplicações de controle em tempo real, como inversores de energia, sistemas de controle de motor e dispositivos de automação industrial. Este microcontrolador oferece uma variedade de recursos, incluindo ADCs (*Analog-to-Digital Converter*) de alta resolução, PWMs de alta frequência, interfaces de comunicação serial, conexões *BoosterPack* (BP) e recursos avançados de controle em tempo real. Por operar em frequências de até 200MHz, é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações industriais e de automação.

O DSP pode se comunicar com dispositivos externos através das portas programáveis GPIO (*General Purpose Input/Output*), conexão micro USB (*Universal Serial Bus*) ou ainda por comunicação via protocolo CAN (*Controller Area Network*). As GPIOs são endereçadas pelo fabricante, mas a forma mais simples de acessar uma GPIO desejada é através dos conectores "J", já que as GPIOs não obedecem a uma numeração ordenada. Os conectores J (J1, J2, J3...) ordenam uma série de Pinos numerados. A Tabela 2 resume a conexão J, os pinos e os principais recursos disponíveis na versão 2 da F28379D [20].

Tabela 2. Recursos LaunchPad F28379D.

Recursos	Qtd.	Conexão	Pin
CAN	1	J12	1 e 2
LED	2	D9, D10	-
USB	1	-	-
Conexão BP	80	J1-J8	1 a 80
Expansão BP	1	J9	-
PWM nativo	12	J4 e J8	35 a 40
PWM expansão EMIF	12	J9	75 a 80
Tensão de saída 5V	2	J3 e J7	21 e 61
Tensão de saída 3,3V	2	J1 e J5	1 e 41
<i>Switch boot mode</i>	1	S1	1,2 e 3
ADC 12 bits A	6	J3 e J7	70, 69, 66, 30, 29, 26
ADC 12 bits B	4	J3 e J7	68, 65, 28 e 25
ADC 12 bits C	4	J3 e J7	67, 64, 27 e 24
Diferencial 16 bits (ADCIND)	4	J21	1, 3, 5 e 7
DAC A e B	2	J3 e J7	30 e 70

A programação da *LaunchPad* é realizada por meio de *software*. Os primeiros *softwares* utilizados para programar a *LaunchPad* foram o *Code Composer Studio* e *Simulink*. Recentemente, o *software* PLECS (*Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation*) tem ganhado destaque na literatura [17]. O PLECS incorporou o *Target Support Package* (TSP), uma extensão que engloba produtos da família C2000 da TI. Isso ampliou muito as possibilidades de desenvolvimento, pois, além de permitir o desenvolvimento de códigos complexos em diagramas de blocos, as bibliotecas reservadas a produtos da TI otimizam o código e facilitam o controle.

C. PLECS

O PLECS é um *software* de simulação de circuitos elétricos desenvolvido pela PLEXIM *Electrical Engineering Software*, esse programa oferece uma abordagem amigável para a análise de circuitos de eletrônica de potência. Além disso, é conhecido por sua capacidade de simular sistemas elétricos de potência de forma eficiente e precisa, especialmente em aplicações que envolvem conversores de energia, sistemas de controle e eletrônica de potência. Outra vantagem é a variedade de configurações específicas para cada modelo de *LaunchPad*. O *software* oferece uma ampla gama de opções de configuração que são adaptadas para diferentes modelos de *LaunchPad*, proporcionando maior flexibilidade e adaptabilidade aos projetos.

O controle online, ou *external mode*, é a função que extrai todo o potencial de controle do DSP. O *external mode* estabelece um *link* de comunicação entre a *LaunchPad* e a interface do usuário PLECS. Enquanto estiver conectado no *external mode*, é possível modificar parâmetros e observar dentro da interface de usuário as mudanças.

III. INTEGRAÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA

Esta seção foi dedicada a um detalhado passo a passo da configuração, montagem e programação dos equipamentos da bancada didática, garantindo uma compreensão prática da implementação do controle de corrente no inversor trifásico.

A. Integração DSP e inversor

A F28379D foi projetada para receber múltiplos *BoosterPacks* simultaneamente. Doravante, cabe dividir o DSP em face Inferior ou Superior e lado A (J1, J2, J3, J4) ou

B (J5, J6, J7, J8). Todo o procedimento de conexão deve ser realizado com ambos desenergizados. Existem duas configurações principais para fornecer 3,3V ou 5V à placa. Em geral o DSP vem com *jumpers* posicionados para o Modo1 de 3,3V e o Modo 1 para 5V. As Tabelas 1 e 2 no guia de usuário da LAUNCHXL-F28379D resumem os modos de isolamento [23]. Os *jumpers* JP1, JP2, JP3 e JP6 são utilizados para controlar o fornecimento de energia e o isolamento. As conexões externas, como os cabeçalhos *BoosterPack* e J16, podem ser usadas para fornecer energia adicional à placa ou para conectar dispositivos externos. O inversor 3PhGaNInv é conectado simplesmente acoplando-o em alguma das posições da parte de cima.

Na Figura 3 é visto a conexão entre o inversor e o DSP através da face Superior, lado A. Nessa forma é necessário cuidado ao conectar, pois os terminais inferiores do inversor ficam muito próximos do DSP. A conexão nesta forma deve levar em consideração uma distância entre os terminais do 3PhGaNInv e dos BP do DSP.

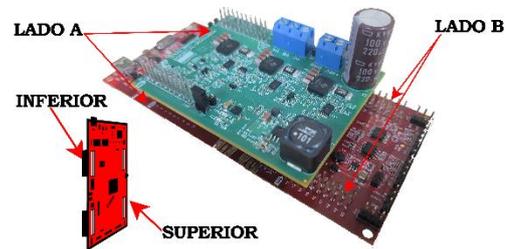


Figura 4. Representação de conexão do 3PhGaNInv ao F28379D.

A Figura 4(a) mostra o diagrama de pinos da F28379D ao passo que a Figura 4(b) mostra o diagrama de pinos do 3PhGaNInv quando conectado na parte superior do DSP. Após conexão, alguns pinos do inversor assumem o estado Não Conectado (NC, do inglês, *Not Connected*), não podendo funcionar como uma GPIO.

B. Configurações iniciais

Antes de conectar o DSP é preciso instalar o PLECS *Standalone* e o pacote TSP para implementar os MCUs C2000, da *Texas Instruments*. O próximo passo é conectar o DSP ao computador. Como passo inicial na configuração, verifique no Gerenciador de Dispositivos e Portas do computador, a porta COM pela qual o DSP se comunica. Em

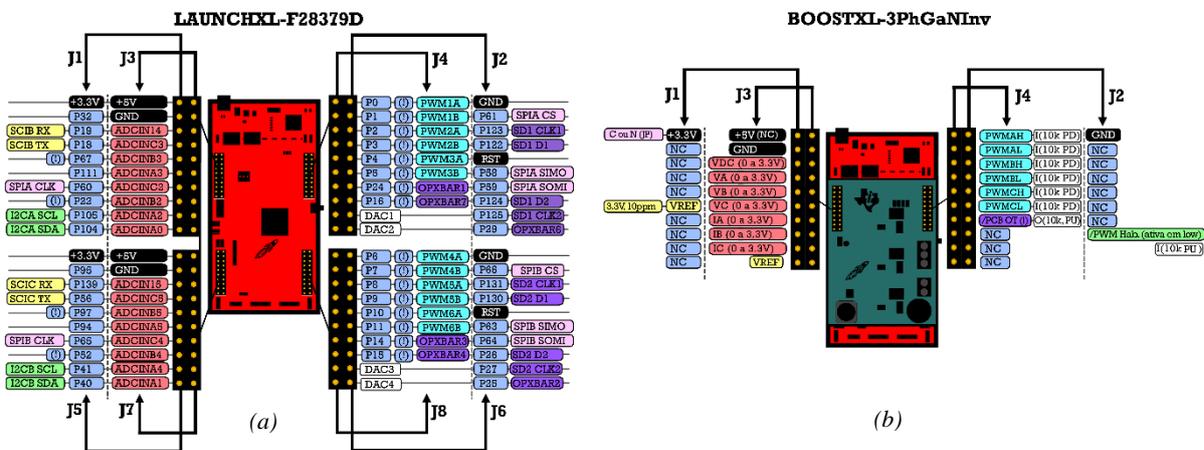


Figura 3. (a) Diagrama de pinos da F28379D; (b) Diagrama de pinos da 3PhGaNInv.

apresenta três saídas de sinais de tensão proporcionais ao sinal de corrente, mas ainda sendo necessário um ganho de calibração k . É válido ressaltar que seria possível utilizar as medições de corrente do próprio inversor. A Figura 6 resume a montagem experimental em um diagrama de conexão.

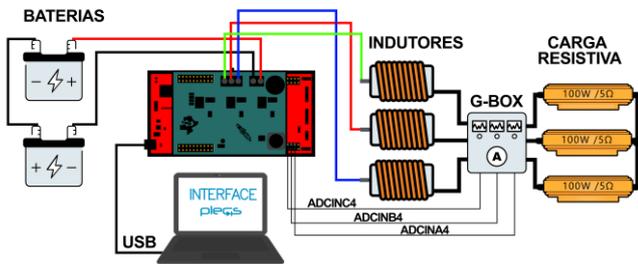


Figura 6. Esquemático da plataforma didática em aplicação com baterias.

O controle no PLECS se resume em diagramas blocos de: controle de corrente, habilitação de pulsos e controle, sinais PWM do DSP, leitura dos sinais de corrente e proteção de sobrecorrente. Os sinais PWM do DSP são os ADCS na Figura 4 (a) e dependem somente do sinal da portadora, que foi configurada para 10kHz. Os sinais de corrente são lidos na GBOX e enviados aos ADCS A4, B4 e C4 (Figura 4). A habilitação do chaveamento muda de estado (*high/low*) junto com o controle de corrente e só ocorre se a variável de controle “*POT*” estiver *low*. O diagrama de blocos do controle é visto na Figura 7.

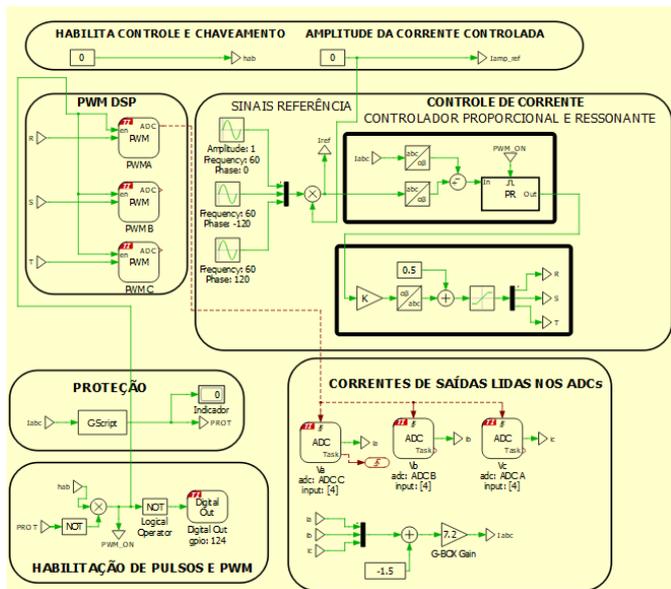


Figura 7. Diagrama de blocos do controle desenvolvido no software PLECS.

Por fim, com o controlador implementado, foi realizado um estudo de caso em *external mode*.

O controle foi feito para uma corrente de saída com amplitude de 0,5A e em seguida a amplitude foi variada para um *setpoint* de 2,5A. A Figura 8 mostra a bancada experimental.

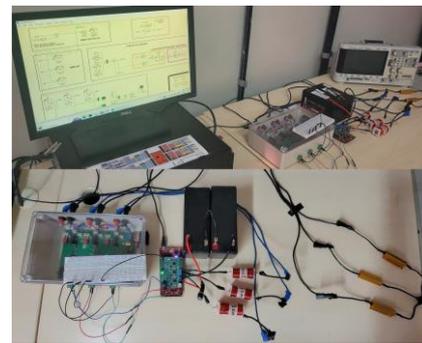
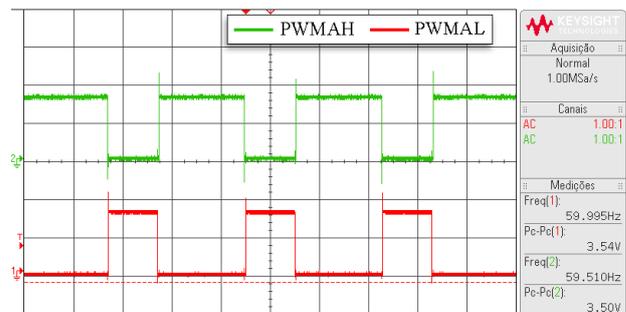


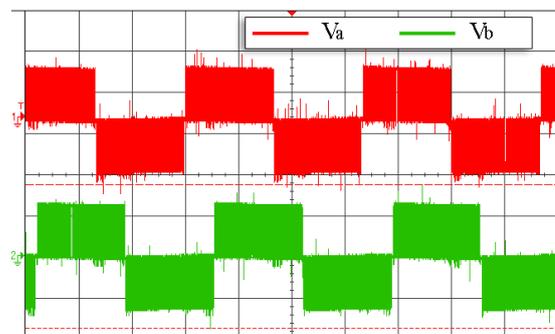
Figura 8. Bancada experimental de controle de corrente.

V. RESULTADOS

Os sinais PWM foram os primeiros resultados registrados, pois, os demais passos dependiam diretamente do funcionamento adequado da estratégia de modulação. A Figura 9(a) mostra os sinais PWM_{AH} e PWM_{AL}. Os mesmos apresentaram amplitudes no pico de sinal da GPIO do DSP, na ordem dos 3,5V, e forma de onda e frequência compatíveis com o esperado. Já na Figura 9(b), é possível ver as formas de onda e o defasamento dos sinais de tensão das fases A e B lidas em osciloscópio.



(a) PWM medido na F28379D.



(b) Tensões de saída medidas no 3PhGaNInv
Figura 9. Medição de sinais de tensão antes do filtro indutivo.

No estudo de caso, foram obtidos sinais de corrente com 0,5A de amplitude com frequência e amplitude controlada. A Figura 10 mostra a forma de onda da corrente de linha ao longo do tempo, lida em um osciloscópio. Percebe-se a eficiência do controle PMR no tempo de resposta rápido e preciso quando enviado um *setpoint* de 2,5A através do PLECS. Como resultado é visto um sinal senoidal na frequência da rede elétrica com ruídos maiores para baixas amplitudes, e ruídos menores para amplitudes maiores, o que é comum em sinais de corrente não filtrados.

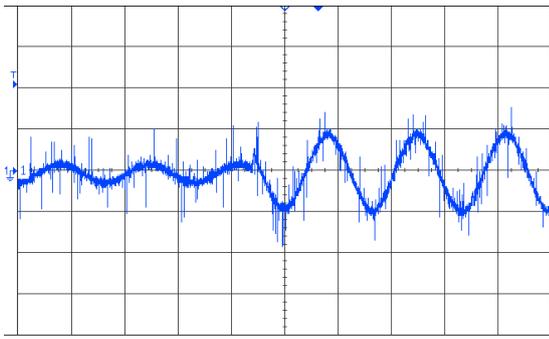


Figura 10. Controle de corrente em no inversor 3PhGaNInv.

VI. CONCLUSÕES

O sistema apresentou estabilidade e flexibilidade com os parâmetros aqui utilizados, podendo estes serem intuitivamente alterados com segurança devido ao algoritmo e os dispositivos de proteção de sobrecorrente e excesso de temperatura. Os resultados mostram que é possível realizar a estratégia de controle abordando amplos aspectos da eletrônica de potência e controle de conversores eletrônicos através da plataforma *LaunchPad* apresentada. A partir dos resultados, é demonstrado a contribuição da plataforma proposta neste trabalho como ferramenta didática na familiarização de estudantes com a prática do controle automático de conversores baseados em Eletrônica de Potência. Um direcionamento que poderia ser levado em consideração como trabalho futuro, seria estender o sistema até a etapa de sincronia e conexão à rede elétrica, utilizando uma malha de controle *Phase Locked Loop* e um transformador, para controlar a potência injetada na rede, bem como utilizar a rede para carregar as baterias e assim abordar tantos outros aspectos do controle de inversores.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Marques, Marcelo Filipe Carvalho. Agenda 2030: objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU: desafios ao desenvolvimento tecnológico e à inovação empresarial. Diss. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2020.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética - EPE 2021. "Reforços no sistema da região noroeste do estado de São Paulo para o escoamento de excedentes de geração fotovoltaica e biomassa." Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/relatorios-r1>. Acesso em: 20/04/2024.
- [3] Empresa de Pesquisa Energética - EPE 2022. "Estudo de expansão das interligações regionais – Parte II: Expansão da capacidade de exportação da região Norte/Nordeste". Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/relatorios-r1>. Acesso em: 20/04/2024.
- [4] Ministério de Minas e Energia - MME 2020. "Plano Decenal de Expansão de Energia 2029." Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029>. Acesso em 22/04/2024. Hart, D. W. "Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos. Tradução: Romeu Abdo." Revisão Técnica: Antônio Pertence Júnior. Porto Alegre: AMGH (2012).
- [5] Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez. (2011). "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems, John Wiley & Sons."
- [6] Ang, S. A (1996). Practice-oriented course in switching converters. IEEE Transactions on Education, v. 39, n. 1, p. 14–18, 1996.
- [7] Max, T. Thiringer, T. Undeland and R. Karlsson, "Power Electronics Design Laboratory Exercise for Final-Year M.Sc. Students," in IEEE Transactions on Education, vol. 52, no. 4, pp. 524-531, Nov. 2009, doi: 10.1109/TE.2008.930513.
- [8] Sausen, Eduardo Matheo. "Projeto de um inversor de tensão meia-ponte como kit didático para o ensino de eletrônica de potência." (2023).
- [9] Donoso-Garcia, P. F., P. C. Cortizo, and L. M. F. Morais. (2008). "Ensino orientado ao projeto: uma experiência para o ensino de eletrônica nas disciplinas de laboratório de eletrônica e eletrônica de potência." 13.2 (2008): 109-116.
- [10] Barbi, Ivo. "Modelagem de conversores CC-CC empregando modelo médio em espaço de estados." Edição do Autor. Florianópolis (2015).
- [11] D. Perez, J. Balcells, M. Lamich, N. Berbel, J. Zaragoza and J. Mon, "Training kit for power electronics teaching," 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 3541-3545, doi: 10.1109/IECON.2008.4758532.
- [12] Kaerst, Jens Peter. "Hardware-in-the-loop control of a modular induction motor drive in power electronics education." 2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe). IEEE, 2022.
- [13] Lee, Jooyoung, and Jae Suk Lee. "Rapid control prototyping for PMSM drives using DSPs and PLECS." 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2021.
- [14] TI, LMG5200 80-V, 10-A GaN Half-Bridge Power Stage, English, Texas Instruments, 29 págs., (2015).
- [15] Suárez Porras, Jorge. (2020). "Prototipo de sistema de control por microprocesador de un convertidor electrónico trifásico fuente de tensión."
- [16] TI, INA240 High- and Low-Side, Bidirectional, Zero-Drift, Current-Sense Amplifier With Enhanced PWM Rejection, English, Texas Instruments, 41 págs., (2016a).
- [17] TI, BOOSTXL-3PhGaNInv Evaluation Module, English, Texas Instruments, 41 págs., (2017).
- [18] TI, LAUNCHXL-F28379D Overview, English, Texas Instruments, 30 págs., (2016b).
- [19] TI, 48-V Three-Phase Inverter With Shunt-Based In-Line Motor Phase Current Sensing Reference Design, English, Texas Instruments, 41 págs., (2016c).
- [20] Pechincha, Brisa Ribeiro, et al. "Inversores trifásicos baseados em controladores ressonantes adaptativos para compensação de correntes harmônicas em sistemas fotovoltaicos." Revista Brasileira de Energia Solar 7.1 (2016): 66-73.
- [21] Heverton A. Pereira, Guilherme L.E. da Mata, Lucas S. Xavier, Allan F. Cupertino, Flexible harmonic current compensation strategy applied in single and three-phase photovoltaic inverters, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 104, 2019.