

Control and Monitoring of a Flyback DC-DC Converter for Photovoltaic Applications Using Embedded IoT System

A. W. N. da Silva, L. D. S. Bezerra, S. C. S. Jucá, R. I. S. Pereira, and C. M. S. Medeiros

Abstract — In this article, the authors present an Internet of Things (IoT) solution for controlling and monitoring a low power photovoltaic system (250 W). Power conditioning is performed by a DC-DC Flyback converter with active clamping. An ESP32 microcontroller is used to implement an output voltage control loop and to communicate, online and in real time, with an internet server. The effectiveness of voltage regulation is proven with experimental results and the authors present evidence that the IoT features work properly.

Index Terms — DC-DC Flyback converter, ESP32 microcontroller, Internet of Things (IoT), controlling and monitoring, photovoltaic system.

I. INTRODUÇÃO

A disseminação do uso de sistemas fotovoltaicos (FV) em níveis industrial, comercial e residencial, como forma de cogeração de energia elétrica é notória e irreversível. A pressão social no sentido da ampliação da participação das fontes de energia renováveis, notadamente eólica e fotovoltaica, na matriz energética brasileira, aliada aos planos e incentivos governamentais, tem promovido um crescimento vertiginoso na instalação de sistemas FV principalmente em nível de microgeração (<75 kW) [1], [2].

A instalação desses sistemas de microgeração ocorre predominantemente em residências e edifícios comerciais. Nesses casos, os consumidores decidem pelo investimento baseados em estudos elaborados pelos próprios fornecedores desses sistemas FV, os quais definem a configuração do sistema e o *payback* basicamente em função do consumo de energia elétrica do cliente, das taxas de juros de empréstimos e de estimativas de desempenho do sistema proposto. Assim, o acompanhamento da evolução do desempenho do sistema torna-se uma ferramenta de gestão importante para disparar as ações de manutenção e tentar manter o cronograma e a taxa de retorno do investimento.

A. W. N. da Silva, Instituto Federal do Ceará (IFCE), Maracanaú, Ceará, Brasil, wallace_neres@yahoo.com.br.

L. D. S. Bezerra, Instituto Federal do Ceará (IFCE), Maracanaú, Ceará, Brasil, danielbezerra@ifce.edu.br.

S. C. S. Jucá, Instituto Federal do Ceará (IFCE), Maracanaú, Ceará, Brasil, sandrojuca@ifce.edu.br.

R. I. S. Pereira, Instituto Federal de Alagoas (IFAL), Arapiraca, Alagoas, Brasil, renata.pereira@ifal.edu.br.

C. M. S. Medeiros, Instituto Federal do Ceará (IFCE), Fortaleza, Ceará, Brasil, claudiosa@ifce.edu.br.

A solução para o acompanhamento da produção de energia diária é uma realidade. Diversos inversores *Grid-Tie* já

possuem suporte para comunicação via rede de dados. Mas para os sistemas de baixa potência, como estações meteorológicas, por exemplo, esse recurso pode ser proibitivo do ponto de vista de custo final de aquisição.

Encontra-se na literatura acadêmica diversos estudos sobre a aplicação de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) em sistemas FV [3]-[8]. Em geral, as propostas dos trabalhos se detêm em utilizar mais de uma plataforma digital para realizar ações de monitoramento, comando, ou ainda, controle da planta FV, objetivando implementar a aplicação IoT.

Neste artigo, os autores apresentam uma solução compacta (dimensões de 2,8 cm x 5,7 cm x 1 cm) e de fácil acesso no mercado virtual e local (sendo encontrado por R\$ 50,00 em lojas no Brasil e 5 USD no mercado internacional), que é a plataforma de desenvolvimento ESP32. Esta permite rápido desenvolvimento e oferece ferramentas abertas (software livre) com comunidade de apoio global na Internet para permitir uma rápida aplicação da solução IoT proposta. Dessa forma, é possível utilizar uma única ferramenta de desenvolvimento para realizar todas as funcionalidades em sistemas FV de pequeno porte para aplicação remota e desassistida com recursos de IoT.

Este artigo é organizado como segue. Na Seção II é discutida uma visão geral do sistema proposto neste trabalho.

Nas Seções III e IV são apresentados o conversor Flyback e o microcontrolador ESP32, respectivamente, como bases instrumentais do protótipo proposto na Seção V. Nesta seção ainda são abordadas as metodologias de controle e monitoramento adotadas. Os resultados experimentais das operações em malha aberta e malha fechada são apresentados e discutidos na Seção VI. Por fim, a Seção VII é dedicada às conclusões dos autores.

II. VISÃO GERAL DO SISTEMA PROPOSTO

Nesta abordagem, um único painel de aproximadamente 250 W é utilizado para fornecer energia elétrica a equipamentos de pequeno porte alimentados em tensão industrial.

Dado que atualmente um único painel FV comercial gera tensão inferior a 100 V, os autores empregam um conversor *Flyback* para, além de promover isolamento galvânica entre gerador e carga, elevar a tensão para o nível necessário ao perfeito funcionamento da carga.

Considerando ainda questões de redução de custo e aumento de confiabilidade, além da diminuição de risco de roubo ou vandalismo, os autores optaram por não fazer uso de

baterias. Assim, para contornar o efeito das variações naturais de irradiância incidente no painel devido a passagem de nuvens, foi implementado um sistema de controle de tensão e limitação de corrente de saída do conversor *Flyback*.

O diagrama esquemático do sistema de controle e monitoramento do conversor *Flyback* é apresentado na Fig. 1.

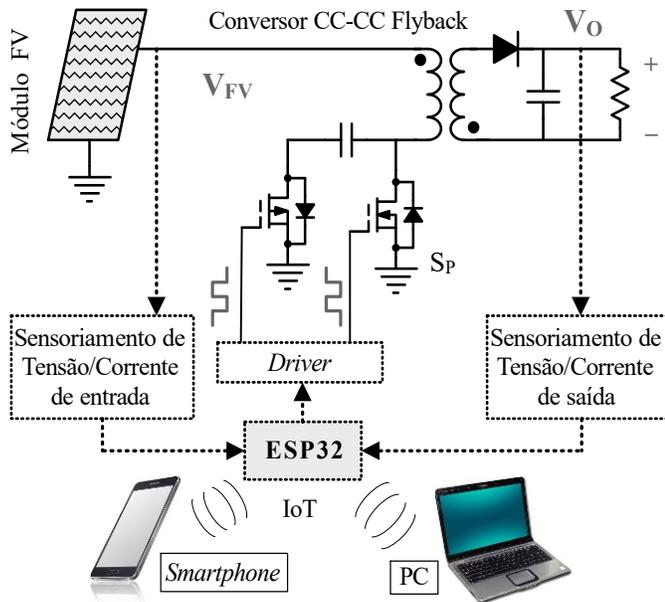


Fig. 1. Diagrama de controle e monitoramento do Conversor CC-CC *Flyback* empregando a plataforma IoT ESP32.

O microcontrolador empregado é o ESP32, que além de ser reconhecido pela sua alta velocidade de processamento, apresenta facilidades para realizar aplicações HTML. Os autores fazem uso dessa última característica para, através da implementação de uma rotina computacional de cálculo de potências de entrada e saída do conversor *Flyback*, e o desenvolvimento de uma plataforma IoT (*Internet of Things*), disponibilizar aos usuários o monitoramento *online* e em tempo real do desempenho operacional do conversor.

É importante salientar que, com a apresentação deste artigo, os autores querem despertar nos leitores a possibilidade da aplicação dos recursos de IoT com ESP32 para os mais diversos fins. Podem ser aplicadas técnicas de tolerância à falha, em que o próprio sistema de controle detecta a falha, pode-se tentar contornar a situação com a execução de ações previamente planejadas e informar ao sistema de supervisão a ocorrência. Após a análise da ocorrência, um especialista pode interferir para a melhor solução do problema. É interessante ressaltar que antes de implementar novas funcionalidades no código, deve-se estudar a capacidade de memória e de processamento do ESP32. Além disso, para aplicações específicas em Eletrônica de Potência, deve-se considerar circuitos externos de acionamento com chaves eletrônicas e hardware de potência específico.

No atual estágio de desenvolvimento do protótipo é possível alterar as referências (*setpoints*) de controle de tensão e limite de corrente, além dos ganhos do controlador. Isto confere ao controlador uma certa capacidade de adaptação, mesmo *offline*. Com a inserção de mais um sensor de temperatura,

uma célula de referência ou piranômetro e o desenvolvimento de uma rotina computacional apropriada é possível realizar o monitoramento do desempenho do sistema de geração FV como um todo.

III. O CONVERSOR CC-CC *FLYBACK*

O conversor *Flyback* é utilizado em várias aplicações de fontes chaveadas, empregado tanto para elevação quanto para abaixamento da tensão CC. O transformador isolador *flyback* dá liberdade ao projetista para definir o número de saídas independentes, adequar o ganho de conversão para cada uma delas, além de possibilitar uma saída isolada, promovendo uma maior segurança entre fonte e carga [9]. Nesse sentido, dentre os diversos conversores CC-CC, o *Flyback* caracteriza-se como uma topologia relevante para ser empregada em aplicações FV, visto a flexibilidade de ganho estático, isolamento entre módulo FV e a fonte de saída, possuir estrutura simples e baixo custo de fabricação [9], [10].

Contudo, esse conversor possui uma grande desvantagem com relação aos efeitos nocivos da dispersão magnética do seu transformador. Um efeito negativo direto da dispersão magnética é a produção de sobretensão danosa nas chaves de potência no momento de seu desligamento [9], [11]. Para mitigar esse efeito, os projetistas têm empregado grameadores ativos, os quais oferecem um caminho alternativo para a corrente imposta pelas indutâncias de dispersão, reduzindo as sobretensões nas chaves [11], [12]. Na Fig. 2-(a) é ilustrada a topologia do conversor CC-CC *Flyback* clássico apresentando o efeito de sobretensão na chave de potência (S_P) provocada pela dispersão magnética; e na Fig. 2-(b), é ilustrado o circuito de grameamento ativo empregando-se uma chave auxiliar (S_A) com o objetivo de atenuar tais sobretensões.

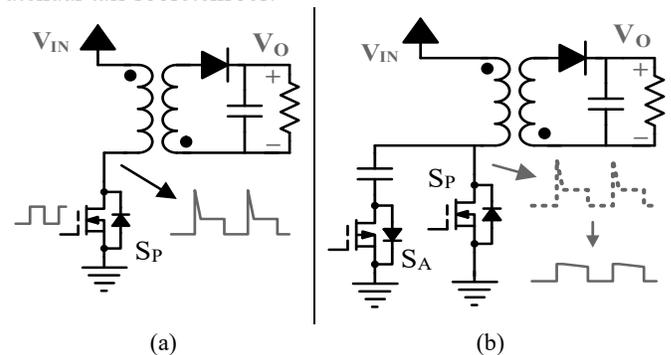


Fig. 2. Conversor *Flyback* com efeito da dispersão magnética (a) e com grameamento ativo (b).

Com a implementação da técnica de grameamento ativo, os autores suplantam o risco de sobretensão na chave de potência e tiram proveito da isolamento galvânica propiciada pelo *Flyback* para construir um protótipo de conversor controlado digitalmente e monitorado com recursos de IoT.

Detalhes sobre a forma de operação do conversor *Flyback*, bem como as peculiaridades relacionadas ao emprego do grameamento ativo estão fora do escopo deste artigo. Porém, para os leitores interessados em se familiarizar com a

topologia proposta, os autores sugerem alguns trabalhos na literatura [11]-[14] que abordam o tema.

IV. O MICROCONTROLADOR ESP32

O microcontrolador ESP32 é um dispositivo IoT com suporte a *wifi* e *bluetooth* embarcado em uma única placa de desenvolvimento, não havendo a necessidade de circuitos externos. Dentre as principais características deste dispositivo, pode-se citar: baixo consumo de energia, baixo custo de aquisição, versatilidade e confiabilidade [15]. Para facilitar o desenvolvimento da prototipagem e, por consequência, de projetos IoT, assim como de outros na área de automação e controle, a multinacional chinesa *Espressif*, desenvolvedora do ESP32, projetou um módulo de prototipagem com *hardware* aberto para esse microcontrolador. Diversos fabricantes estão, portanto, disponibilizando modelos variados no mercado. No presente protótipo utiliza-se o módulo DOIT ESP32 DEVKIT V1. Este módulo possui um conversor USB serial embarcado e uma porta micro USB para alimentação e programação, memória *flash* integrada de 4 MB, GPIOs com função PWM, conversores I²C, SPI, AD/DA, antena integrada *Wifi* e *bluetooth*, entre outras funções [15], [16]. O módulo DOIT ESP32 DEVKIT V1 e seus principais dispositivos são ilustrados na Fig. 3.

Além dos recursos supracitados, esse microcontrolador permite ser programado em linguagem C, em código aberto, e é compatível com a IDE do Arduino [15], o que facilita a implementação de vários projetos dada a quantidade de documentação e a facilidade de programação empregando-se essa IDE. Dessa forma, a facilidade de programação, o tamanho reduzido, a quantidade de recursos para desenvolvimento de projetos, o baixo custo de aquisição e o baixo consumo de energia foram fatores que contribuíram para a escolha deste módulo no presente projeto.

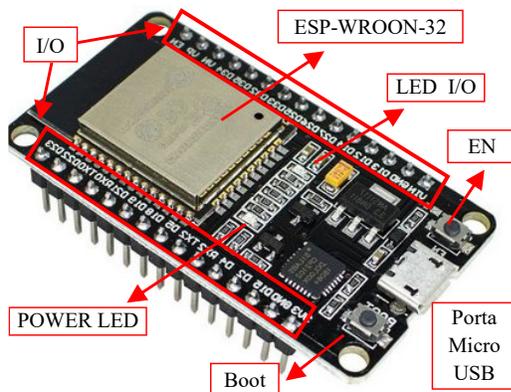


Fig. 3. Principais dispositivos embarcados no módulo DOIT ESP32 DEVKIT V1.

V. MATERIAIS E MÉTODOS

Dada a versatilidade do *hardware* do ESP32, materializada com a disponibilidade de pinos de entrada para conversão A/D, pinos de saída para comando PWM, além da possibilidade de conectá-lo à Internet via W-Fi, os autores utilizam esse módulo IoT para implementar um sistema de controle digital do conversor *Flyback* utilizado para

condicionar a energia de um módulo FV, além de realizar o monitoramento do desempenho do conversor e adaptação de ganhos do controlador via IoT através de uma página *Web*.

A. Protótipo Proposto

Considerando a simplicidade do conversor *Flyback*, que emprega poucos componentes, aliada à versatilidade e compactação de recursos do ESP32, o protótipo apresenta baixo custo, além de flexibilidade para implementação de outras funcionalidades. Por exemplo, dado que o sistema proposto já dispõe de sensores de corrente e tensão na entrada do conversor, que corresponde aos terminais do painel FV, os autores poderiam, caso necessário, inserir um algoritmo de busca do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT). Entretanto, mesmo havendo ainda a disponibilidade de 42% (540.482 bytes) do total de memória de programa, esta funcionalidade é desnecessária atualmente, visto que o sistema é de aplicação isolada da rede elétrica e não há bateria(s) para que haja o gerenciamento de carga. O propósito é disponibilizar tensão de saída regulada.

Na Fig. 4 é apresentado o protótipo. São destacados os circuitos que compõem o conversor *Flyback* propriamente dito, o *driver* de acionamento das chaves e o circuito de sensoriamento, responsável por condicionar os sinais de tensão e corrente, tanto de entrada quanto de saída do conversor. Embora os autores não tenham envidado grandes esforços na elaboração do *layout* do protótipo, o mesmo apresenta as seguintes dimensões 15 cm x 11 cm x 3 cm com uma massa de aproximadamente 400 g, o que dá margem à possível integração à *junctionbox* de módulos FV.

O dimensionamento do conversor, o projeto do controlador digital e dos circuitos de condicionamento de sinais, bem como a descrição da funcionalidade do *driver* de acionamento das chaves de potência não fazem parte do escopo deste artigo.

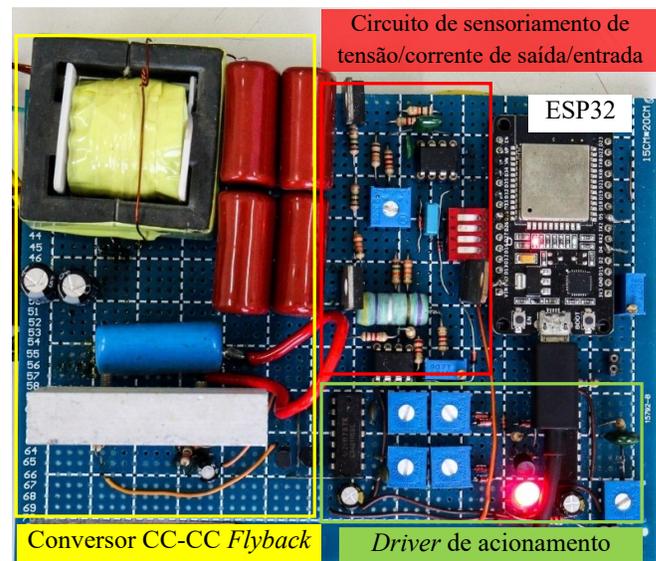


Fig. 4. Protótipo do conversor *Flyback* com microcontrolador ESP32.

B. Metodologia de Controle e Monitoramento

Um diagrama esquemático do sistema de controle empregado é apresentado na Fig. 5.

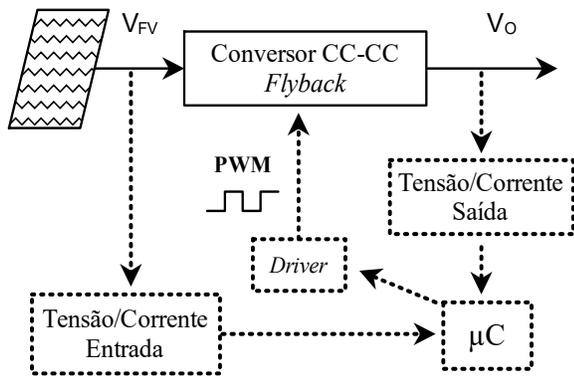


Fig. 5. Diagrama do circuito de controle de tensão/corrente aplicado ao conversor *Flyback*.

Como é sugerido na Fig. 5, o sistema de controle digital é do tipo SISO (Single Input – Single Output). O microcontrolador realiza as medições de corrente e tensão, tanto da entrada quanto da saída do conversor, para aplicar a lei de controle e atuar na razão cíclica do sinal PWM da entrada de comando do conversor.

Na Fig. 6 é apresentado o algoritmo de configuração do ESP32 e controle da tensão de saída do conversor. Nota-se que o microcontrolador é aplicado como servidor, o qual define um IP local, SSID e a solicitação de uma senha de acesso. Ao ser iniciado, o ESP32 realiza a leitura da tensão de saída (V_O), tensão de entrada (V_{IN}), corrente de saída (I_O) e corrente de entrada (I_{IN}).

Conforme Fig. 6, com a malha fechada desativada, o valor da tensão de saída é dado conforme o valor da razão cíclica do sinal PWM, visto que nessa situação o conversor opera em malha aberta. Operando em modo de condução contínua (CCM, *Continuous Conduction Mode*) a tensão de saída do conversor *Flyback* é dada por $V_O = (a) \cdot (D / (1 - D))$, em que “a” caracteriza-se como a relação de transformação do transformador e D a razão cíclica do sinal PWM, a qual varia de zero a um. Com a malha fechada ativada, o ESP32 ativa o processamento de potência, iniciando a regulação da tensão de saída. A regulação de V_O é dada através do controle de D.

Nesse algoritmo, $C(z)$ caracteriza-se como o controlador proporcional-integrativo (PI) e “Erro” como o erro de controle. A tensão de saída é subtraída da referência (REF) do sistema, tendo como resultado o erro. Este erro é utilizado pelo controlador para definir a imposição de um novo valor para D, modificando novamente V_O . Ao final do processo, o valor de D é mantido constante dado um valor de erro nulo, o que só ocorre caso V_O seja igual a REF. Nesse sentido, a regulação da tensão de saída é determinada pelo valor de REF.

Além do controle da malha de tensão, paralelamente é realizada a comunicação IoT com o ESP32, a partir de requisições HTTP por IP local. Na Fig. 7 é apresentado o algoritmo empregado para monitoramento IoT.

Ao requisitar acesso via HTTP, o ESP32 retorna à página principal, apresentando os valores de tensão e corrente de entrada e saída. Através dessas grandezas é determinado o valor da potência. Dessa forma, é possível informar ao usuário o valor da eficiência do conversor.

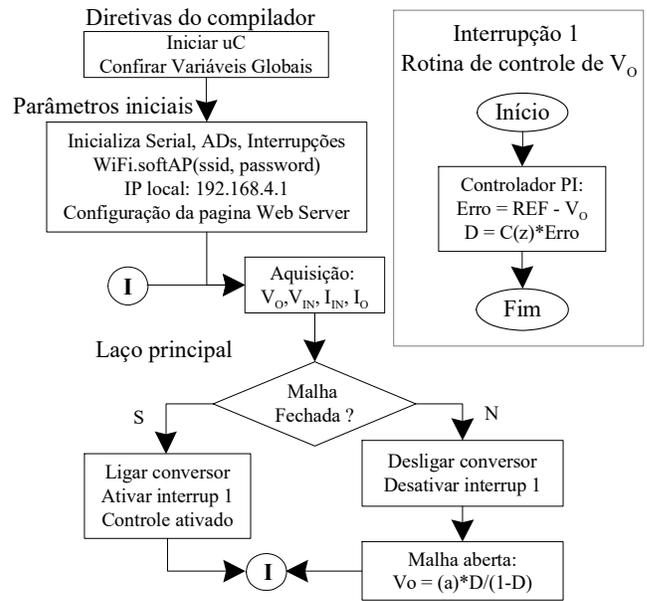


Fig. 6. Algoritmo de configuração do ESP32 e controle da tensão de saída do conversor.

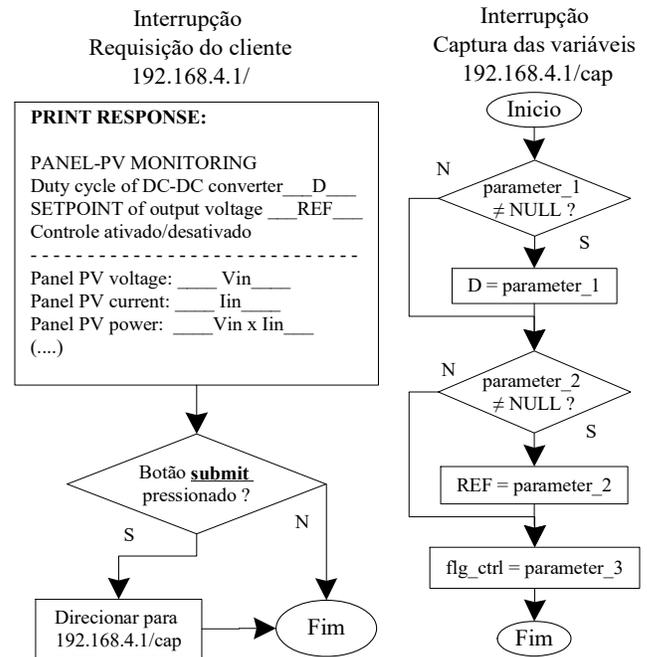


Fig. 7. Algoritmo empregado para monitoramento e controle do conversor com ESP32.

Ao se pressionar o botão “submit”, os valores impostos aos parâmetros são recebidos pelo microcontrolador. O valor relacionado ao *parameter_1* define o valor da razão cíclica (D), *parameter_2* define o valor da referência (REF) da malha de controle e o *parameter_3* determina se o conversor está em malha aberta ou fechada. Nesse sentido, com o conversor em malha aberta o usuário pode definir o valor de “D” objetivando realizar testes com base no ganho estático esperado para estrutura. Na situação em que o conversor está em malha fechada, o usuário pode variar o valor de REF, objetivando impor um valor desejado para tensão de saída. É

importante ressaltar que é imposto um valor limite para D e REF com intuito de não comprometer a estrutura em caso de valor extremo para essas variáveis.

Nota-se que, para a aplicação em questão, utiliza-se o ESP32 como servidor, o qual impõe um endereço de IP fixo com: 192.168.4.1. No entanto, é possível realizar a aplicação empregando tal dispositivo como cliente, o qual iria conectar-se ao IP de uma rede externa, por exemplo, a fim de realizar o monitoramento e controle do conjunto conversor-módulo FV a longa distância.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na Fig. 8 é apresentado o ambiente laboratorial utilizado para validar o desempenho do sistema proposto.

Para demandar a energia FV gerada, são usadas lâmpadas incandescentes na saída do conversor *Flyback*. A medição dos valores da tensão de entrada e saída, corrente de entrada e do sinal PWM do conversor é feita por um osciloscópio.

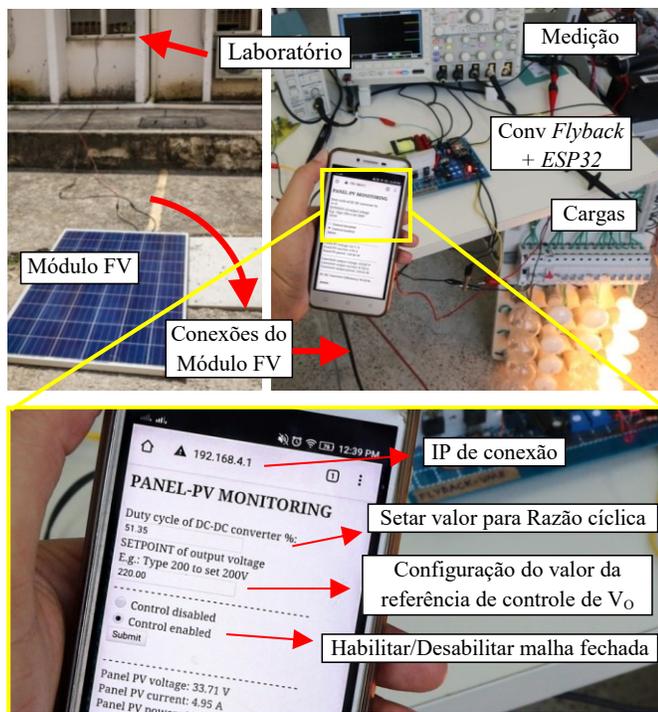


Fig. 8. Ambiente utilizado para validar a proposta de monitoramento e controle IoT em plantas FV.

O controle e o monitoramento são realizados por um *smartphone*. Conforme o algoritmo da Fig. 7, ao requisitar acesso via HTTP, através do IP local, o ESP32 responde enviando informações ao navegador do dispositivo. Como pode ser visto na Fig. 8, é possível alterar o valor da razão cíclica (D) do conversor e o valor da tensão de saída (V_O), além de habilitar ou desabilitar a malha fechada. A alteração de D só é acessível caso o conversor esteja em malha aberta, dado que em malha fechada o próprio controlador define o valor de D . Em contrapartida, a regulação de V_O é realizada apenas com a habilitação da malha fechada, a qual irá impor a tensão de saída conforme o valor da referência de controle, imposto pelo usuário via HTTP.

A seguir é abordado o desempenho do sistema de controle do conversor em malha aberta e em malha fechada.

A. Operação em Malha Aberta

Na Fig. 9 é apresentado o comportamento estático do conversor operando em malha aberta, impondo um valor para razão cíclica de 30%. As formas de onda apresentadas foram obtidas através do modo de captura da tela do osciloscópio. A forma de onda enumerada como “1” representa a tensão do módulo FV, a forma de onda número “2” representa a tensão de saída do conversor e a forma de onda número “3” representa o sinal PWM. Comparando os valores apresentados na página da *Web* com as formas de onda exibidas na tela do osciloscópio, percebe-se que o monitoramento IoT pode ser considerado fidedigno, levando em conta a tolerância de medição relacionada às ponteiros de tensão do osciloscópio.

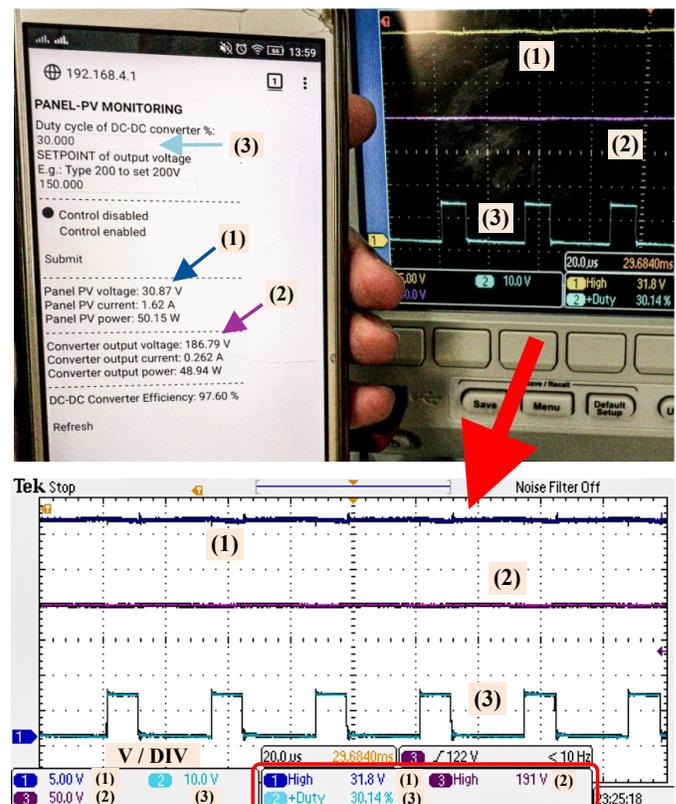


Fig. 9. Monitoramento do conversor operando em malha aberta.

B. Operação em Malha Fechada

Na Fig. 10 é apresentado o comportamento dinâmico do conversor operando em malha fechada para um valor de referência de 350 V. Nota-se que a tensão evolui transitoriamente de forma suave até atingir o valor de 350 V no estado permanente. Os autores consideram como satisfatório o comportamento dinâmico da tensão de saída na partida. Esta é uma condição normalmente considerada severa para o controlador, e o mesmo impôs uma resposta isenta de sobressinais e com um tempo de acomodação de aproximadamente 2 s.

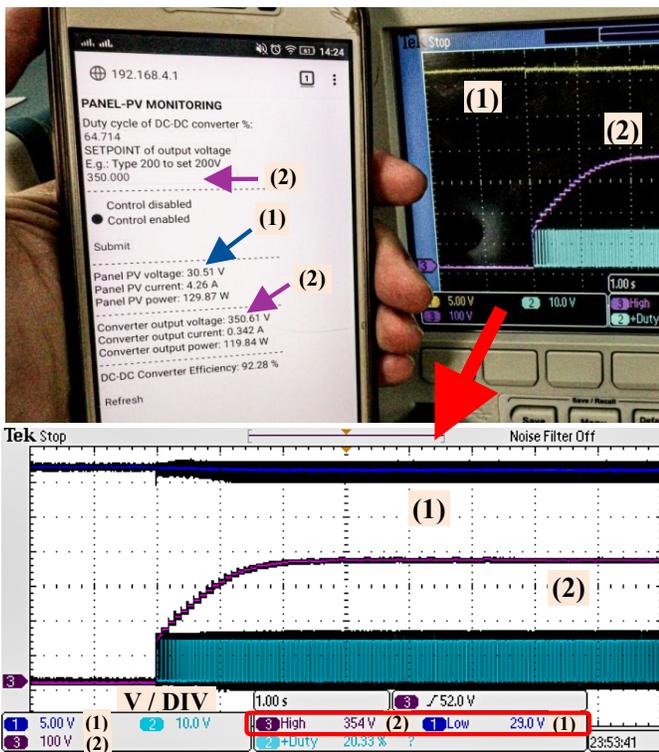


Fig. 10. Monitoramento do conversor operando em malha fechada.

Objetivando verificar a regulação de tensão para diferentes níveis de tensão de saída V_O , optou-se por variar a referência de controle via IoT através do navegador do dispositivo móvel. Inicialmente configura-se a referência do controlador para 150 V. Logo em seguida para 220 V e 350 V, e finalmente desliga-se o conversor, setando 0 V para a referência do controlador. Na Fig. 11 é apresentada a evolução temporal da tensão de saída V_O regulada em diferentes níveis de tensão. A forma de onda enumerada como “1” corresponde à tensão do módulo FV, a número “2” corresponde a tensão de saída do conversor e a número “3” corresponde a corrente do módulo FV. Experimentalmente observou-se um *delay* médio de informação de aproximadamente 1 s, ao variar a referência de controle e efetivamente ser realizada a mudança de V_O , considerando uma distância de aproximadamente 1,5 m do microcontrolador ao *smartphone*.

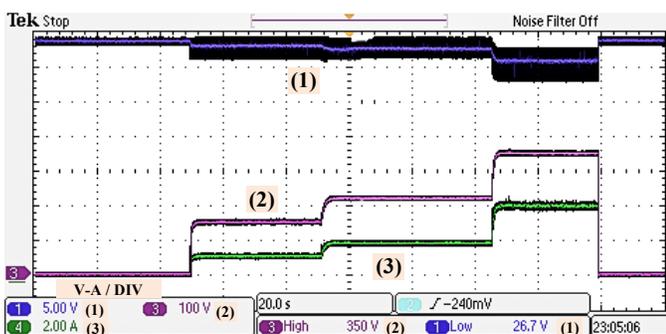


Fig. 11. Configuração da tensão de saída do conversor via IoT.

Percebe-se uma redução gradativa da tensão do painel com a elevação da tensão terminal do conversor. Esse é um comportamento natural, visto que o conversor está operando como fonte de tensão e a carga é resistiva. Assim, com a

elevação da tensão, a corrente de carga é proporcionalmente maior, exigindo também do painel FV uma corrente maior, o que causa uma maior queda de tensão nas resistências em série com as células FV do painel solar.

Além de verificar a partida do conversor e a regulação de tensão de saída V_O em diferentes situações, é necessário analisar a regulação da tensão de saída em razão da variação da tensão de entrada provocada pela variação de irradiância solar incidente no módulo FV. Na Fig. 12 é apresentada a regulação da tensão de saída considerando variação de tensão do módulo FV.

Verifica-se que mesmo o módulo apresentando variação de tensão, a tensão de saída do conversor permanece constante, o que traduz uma regulação eficaz. Dessa forma, além de monitoramento e adaptação da tensão de saída via IoT, a aplicação em questão promove a regulação da tensão de saída do conversor, o que valida sua aplicação em plantas FV.

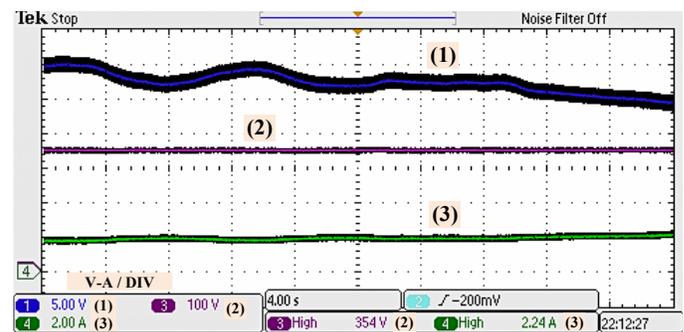


Fig. 12. Regulação da tensão de saída com variação da tensão de entrada (módulo FV).

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma aplicação de IoT voltada ao condicionamento de potência de um sistema de geração FV de pequeno porte. Os autores comprovam a efetividade do sistema de controle digital projetado para regular a tensão de saída do conversor CC-CC do tipo *Flyback*. Sugerem ainda que, com sua versatilidade, o microcontrolador ESP32 se mostra uma ferramenta apropriada para, além de abrigar as rotinas de controle, propiciar o comando e monitoramento remoto e em tempo real do sistema proposto de qualquer lugar do mundo. Particularmente, com a plataforma desenvolvida, é possível monitorar a eficiência do conversor *Flyback* e alterar *setpoint* e ganhos do controlador digital.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a qual apóia o programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) no IFCE Campus Maracanaú/Fortaleza; ao Laboratório de Potência e Controle (LPC), ao Laboratório de Eletrônica e Sistemas Embarcados (LAESE) do IFCE Campus Maracanaú e ao Laboratório de Processamento de Energia (LPE) do IFCE Campus Fortaleza por disponibilizar o espaço e os equipamentos necessários para a presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] B. S. Scolari, J. U. Junior, "Panorama dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica amparados pela REN nº482/2012 da ANEEL no Brasil," *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 9, no. 2, pp. 151-160, 2018.
- [2] I. Rios, E. Rios, "Microgeração fotovoltaica conectada à rede elétrica: o que mudou com a resolução normativa nº 687 da agência nacional de energia elétrica – ANEEL," *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 8, no. 2, pp. 119-122, 2017.
- [3] R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, P. C. M. Carvalho, "IoT embedded systems network and sensors signal conditioning applied to decentralized photovoltaic plants," *Measurement*, vol. 142, pp. 195–212. 2019. DOI:10.1016/j.measurement.2019.04.085.
- [4] S. M. Patil, M. Vijayalashmi, R. Tapaskar, "IoT based solar energy monitoring system," *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Chennai, 2017, pp. 1574-1579, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389711.
- [5] A. López-Vargas, M. Fuentes, M. Vivar, "IoT Application for Real-Time Monitoring of Solar Home Systems Based on Arduino™ With 3G Connectivity," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 679-691, 15 Jan. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2876635.
- [6] N. Rouibah, L. Barazane, A. Mellit, B. Hajji, A. Rabhi, "A low-cost monitoring system for maximum power point of a photovoltaic system using IoT technique," *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, Fez, Morocco, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/WITS.2019.8723724.
- [7] I. Dupont, R. Pereira, S. Jucá, P. Carvalho, "Internet of Things Data Acquisition System Applied to Photovoltaic Water Pumping," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 10, pp. 2547-2560, October 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8795134.
- [8] R. I. S. Pereira, S. C. S. Jucá, P. C. M. Carvalho, C. P. Souza, "IoT Network and Sensor Signal Conditioning for Meteorological Data and Photovoltaic Module Temperature Monitoring," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 06, pp. 937–944. 2019. DOI:10.1109/TLA.2019.8896816.
- [9] I. Barbi, *Eletrônica de potência: projetos de fontes chaveadas*, 2nd. ed., Florianópolis-SC, INEP - Instituto de Eletrônica de Potência: Ed. do Autor, 2007, p. 334.
- [10] B. Tamyurek, B. Kirimer, "An Interleaved High-Power Flyback Inverter for Photovoltaic Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 6, pp. 3228-3241, June 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2332503.
- [11] G. Stojcic, "Active-clamp PWM converters: design-oriented analysis and small-signal characterization," M.S. thesis, Virginia polytechnic institute, Blacksburg, Virginia, 1995.
- [12] J. Zhang, X. Huang, X. Wu, Z. Qian, "A High Efficiency Flyback Converter With New Active Clamp Technique," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 7, pp. 1775–1785, 2010, doi:10.1109/tpel.2010.2042302.
- [13] Texas Instruments "Incorporating Active-Clamp Technology to Maximize Efficiency in Flyback and Forward Designs," *Power Supply Design Seminar*, TI Literature Number: SLUP262, 2011, p. 26.
- [14] R. Watson, F. C. Lee, G. C. Hua, "Utilization of an active-clamp circuit to achieve soft switching in flyback converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 162-169, Jan. 1996, doi: 10.1109/63.484429.
- [15] N. Kolban, "Kolban's Book on the ESP32 -Web Site", *Kolban's Book on ESP32 - September 2018*, 2018. [Online]. Available at: <https://leanpub.com/kolban-ESP32>.
- [16] Espressif Systems, "Espressif Web Site", *ESP-IDF Programming Guide*, 2019. [Online]. Available at: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/api-reference/index.html>.

**Antonio Wallace Neres da Silva**

Nascido na cidade de Maracanaú-CE em 1990. Atualmente mestrando no programa de pós-graduação em energias renováveis do Instituto Federal do Ceará (IFCE) – Campus Maracanaú/Fortaleza. Possui graduação em Tecnologia de Manutenção Industrial pelo IFCE Campus Maracanaú concluído em 2016 e possui formação técnica em eletrotécnica pelo IFCE Campus Fortaleza concluído em 2010. Trabalha como Técnico de Laboratório em Eletrônica na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Circuitos Elétricos, Eletrônicos e Eletrônica de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas de geração fotovoltaica, microcontroladores, sistemas embarcados e desenvolvimento de software.

**Luiz Daniel Santos Bezerra:**

Nascido em Fortaleza em 1983, possui título de Doutor (2018) e mestre pela Universidade federal do Ceará (2010) em Eletrônica de Potência com ênfase em controle de conversores através do uso de controle digital. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (2007) - Magna Cum Laude.

Realizou graduação sanduíche em Elektrotechnik - Universität Kassel (2005). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: fuzzy, pid, sistemas integrados, comunicação usb. Trabalha com projetos de controle de máquinas industriais e servo mecanismos, também atua no desenvolvimento de projetos na área de eletrônica de potência, em especial com o uso de controle digital aplicado. Sócio e ex-diretor da empresa SDG Soluções Energéticas. Atualmente é Professor de Ensino Técnico e Tecnológico do Instituto Federal do Ceará (IFCE), Campus Maracanaú.

**Sandro César Silveira Jucá**

Possui Graduação em Tecnologia Mecatrônica pelo Instituto Federal do Ceará (2002). É Especialista em Automação Industrial (2003) e Licenciado em Física (2005) pela Universidade Estadual do Ceará (UECE), Mestre (2004) e Doutor em Engenharia Elétrica (2014) pela

Universidade Federal do Ceará (UFC) com pesquisa realizada na Universität Paderborn - Alemanha e apoio do programa de Doutorado Sanduíche do Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD). Realizou também estágio de pesquisa pós-doutoral (2019) na Universidad de Cádiz - Espanha com apoio da Fundación Carolina. Atualmente é professor e pesquisador do IFCE - Campus Maracanaú, docente permanente do ProfEPT (Mestrado em educação profissional e tecnológica em rede nacional com Qualis

Ensino) e do Mestrado Acadêmico em Energias Renováveis (PPGER com Qualis Interdisciplinar). Pesquisa na área de Mecatrônica e Engenharia Elétrica, dentro dos seguintes temas: Energias Renováveis, Sistemas Embarcados, IoT, Robótica, EaD e Educação Profissional



Renata Imaculada Soares Pereira

Professora de Eletroeletrônica do Instituto Federal de Alagoas - Campus Arapiraca. Desenvolveu pesquisa de pós-doutorado (2019) em Engenharia Elétrica na UFPB - João Pessoa com ênfase em redes de sensores sem fio e colheita de energia aplicados ao monitoramento IoT

de plantas fotovoltaicas. Concluiu Doutorado (2018) em Engenharia Elétrica com bolsa de doutorado sanduíche (Programa conjunto CAPES/DAAD) na "Technische Hochschule Köln" - Alemanha e Mestrado (2014) em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal do Ceará (UFC). No Instituto Federal do Ceará (IFCE) - Campus Maracanaú, concluiu Tecnólogo em Manutenção Industrial (2012) e curso técnico em Automação Industrial (2009). Áreas de atuação: Eletrônica, Sistemas embarcados IoT, Aquisição de dados e Monitoramento online em Nuvem, Energias Renováveis.



Cláudio Marques de Sá Medeiros

Possui graduação (1989) e mestrado (1997) em Engenharia Elétrica, além de doutorado (2008) em Engenharia de Teleinformática, todos cursados na Universidade Federal do Ceará. Atualmente é professor do Instituto

Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, ministrando disciplinas no curso de graduação em Engenharia de Mecatrônica e nos programas de pós-graduação em Ciências da Computação e Energias Renováveis. Tem atuado academicamente em acionamento eletrônico de máquinas elétricas, controle de processos, geração de energia elétrica a partir do princípio fotovoltaico, aplicações industriais de lógica fuzzy e aplicação de redes neurais artificiais na detecção de falhas em máquinas elétricas.