

RASTREADOR DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA EM UM CONVERSOR BOOST

Janilson Ruan Strelow Antunes, Jefferson William Zanotti
Instituto Federal de Santa Catarina
Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica
e-mail: janilson.r@aluno.ifsc.edu.br, jefferson.zanotti@ifsc.edu.br
Trabalho de Conclusão de Curso – 20/02/2025

Resumo – Este trabalho propõe a implementação da técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) em um conversor boost, fazendo uso da plataforma Arduino Uno como hardware de controle do sistema.

Para desenvolver o controle proposto, foram simuladas as variações de luminosidade ao longo de um dia ensolarado, ajustando a tensão de entrada do conversor. O objetivo principal é avaliar o desempenho do controle em resposta às mudanças de irradiação solar ao longo do dia.

Nesse contexto, foi necessário investigar as características do conversor boost, a fim de identificar a configuração mais adequada para uma implementação simples com um módulo fotovoltaico. Isso permite uma avaliação prática da eficiência do conversor boost, enquanto analisa-se sua viabilidade para aplicações em módulos fotovoltaicos, tanto para fins acadêmicos como para trabalhos práticos.

Essa abordagem possibilitou não apenas aprimorar o entendimento sobre o controle do ponto de máxima potência, mas também medir a possibilidade de empregar o conversor *boost* em cenários práticos, contribuindo assim para pesquisas acadêmicas e experimentos relacionados à energia fotovoltaica.

Palavras-chave – Controle, Conversor Boost, Impedância Característica.

ARTICLE MODEL

Abstract – This work proposes the implementation of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique in a boost converter, utilizing the Arduino Uno platform as the system's control hardware.

To develop the proposed control, variations in sunlight throughout a sunny day were simulated by adjusting the converter's input voltage. The main objective is to evaluate the control's performance in response to changes in solar irradiation over the course of the day.

In this context, it was necessary to investigate the characteristics of the boost converter to identify the most suitable configuration for a simple implementation with a photovoltaic module. This allows for a practical assessment

of the boost converter's efficiency while analyzing its feasibility for photovoltaic module applications, both for academic purposes and practical projects.

This approach not only enhances the understanding of maximum power point tracking control but also assesses the possibility of employing the *boost* converter in practical scenarios, thereby contributing to academic research and experiments related to photovoltaic energy.

Keywords – Control, Converter, Boost, Characteristic Impedance.

I. INTRODUÇÃO

Em [1], a geração e o aproveitamento de energia elétrica são fundamentais para o funcionamento de inúmeras aplicações e dispositivos em nossa sociedade. Com a crescente preocupação com a sustentabilidade e a busca por fontes de energia mais limpas e eficientes, a engenharia elétrica desempenha um papel crucial na inovação e no desenvolvimento de tecnologias que atendam a essas necessidades. Uma área de interesse particular dentro da engenharia elétrica é a conversão de energia, que engloba o design e o controle de sistemas que transformam a energia de uma forma em outra.

Para maximizar o aproveitamento da energia elétrica gerada por um painel fotovoltaico, é fundamental que os componentes responsáveis pelo condicionamento dessa energia, como os conversores, apresentem altos níveis de eficiência. Além disso, é indispensável a implementação de técnicas avançadas de rastreamento do ponto de máxima potência, conhecidas como (MPPT) [2].

Este trabalho aborda especificamente o estudo e a implementação de um conversor CC-CC do tipo elevador de tensão, conhecido como *Boost*, e a aplicação do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em sistemas fotovoltaicos. A motivação por trás deste trabalho reside na necessidade de melhorar a eficiência e a sustentabilidade das fontes de energia elétrica, especialmente no contexto da crescente utilização de energia solar. Os conversores CC-CC, como o *Boost*, desempenham um papel fundamental em várias aplicações eletrônicas, e otimizar seu desempenho é essencial. Além disso,

o uso do MPPT é crucial para maximizar a geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos.

O objetivo deste trabalho é investigar a eficácia do método Impedância Característica no rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos e aplicá-lo a um protótipo de conversor *Boost*. O diferencial deste estudo é a integração do controle MPPT em um sistema de conversão CC-CC, visando a otimização da eficiência e do desempenho em cenários de geração de energia solar.

A literatura relacionada a conversores CC-CC, como o *Boost*, fornece uma base teórica sólida para o projeto e dimensionamento desses dispositivos. Além disso, a literatura relacionada ao rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em sistemas fotovoltaicos apresenta uma variedade de algoritmos e técnicas que podem ser aplicados para maximizar a geração de energia a partir da luz solar incidente.

Nas próximas seções, este trabalho apresentará uma fundamentação teórica abrangente sobre conversores CC-CC, concentrando-se no *Boost*, e abordará o princípio de funcionamento do MPPT. Os materiais e a metodologia utilizados na montagem do protótipo serão descritos em detalhes, seguidos pelos resultados e discussões.

Este trabalho tem como objetivo principal investigar a eficiência do método Impedância Característica na otimização do ponto de máxima potência (MPPT) em sistemas fotovoltaicos, com a aplicação prática em um conversor *Boost*. O diferencial deste estudo está na integração do controle MPPT em um conversor CC-CC e a um painel fotovoltaico, visando aprimorar a eficiência na conversão de energia.

A organização deste trabalho inclui uma revisão teórica sobre conversores CC-CC, uma descrição do desenvolvimento do protótipo do conversor *Boost* e a implementação do controle MPPT. Os resultados obtidos e sua análise são apresentados em seções subsequentes, seguidos de uma conclusão que resume os principais achados deste estudo.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Conversor CC-CC

O conversor *Boost* é um conversor elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em corrente e saída em tensão. Em [3], conversores de tensão CC-CC utilizam corrente contínua (CC) na entrada para fornecer um nível de tensão CC diferente na saída. Há duas categorias de conversores CC-CC: os não isolados e os isolados. Todos os conversores CC-CC são comutados em uma frequência definida por um interruptor eletrônico, a fim de aumentar ou diminuir o nível de tensão da saída.

B. Conversor *Boost*

Segundo [4] conversor CC-CC do tipo elevador de tensão, conhecido como *Boost*, é um dispositivo eletrônico usado para aumentar a tensão de entrada proveniente de uma fonte de energia contínua (CC). Este tipo de conversor desempenha um papel fundamental em várias aplicações eletrônicas, como

carregadores de bateria, sistemas de iluminação LED e fontes de alimentação para dispositivos eletrônicos portáteis.

No conversor *Boost*, uma chave é posicionada entre um indutor e a carga de saída. Durante o período em que a chave está conduzindo, a corrente através do indutor aumenta, armazenando energia no campo magnético do indutor. Quando a chave é desligada, um diodo bloqueia a corrente do indutor, permitindo que a tensão do indutor se some à tensão de entrada, resultando em uma tensão maior na carga de saída. A estrutura básica desse conversor é ilustrada na Figura 1.

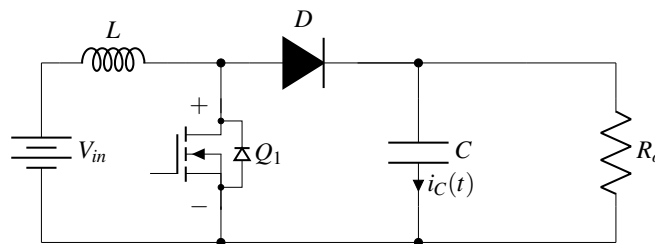


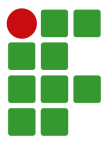
Fig. 1. Circuito conversor *Boost*. Fonte: Do Autor.

O aumento da tensão na carga de saída depende do ciclo de trabalho da chave (a proporção entre o tempo em que a chave está ligada e o período de chaveamento) e da indutância do indutor. Para obter uma tensão de saída maior, é necessário aumentar o ciclo de trabalho e/ou a indutância. O controle da tensão de saída é alcançado ajustando o ciclo de trabalho da chave. Em muitos casos, um controlador de realimentação é empregado para medir a tensão de saída e regular o ciclo de trabalho da chave para manter uma tensão constante.

O conversor *Boost* utiliza um circuito de chaveamento para gerenciar o fluxo de corrente elétrica através do indutor. Quando a chave está ligada, a corrente flui pelo indutor, criando um campo magnético. Quando a chave é desligada, a energia armazenada no campo magnético é liberada para a carga. Esse ciclo de chaveamento é repetido continuamente, mantendo a tensão de saída constante com o capacitor de saída tendo papel fundamental para isso.

Resumidamente, o conversor *Boost* é capaz de elevar a tensão de entrada para uma tensão maior na saída, graças ao armazenamento de energia no campo magnético do indutor durante o período em que a chave está ligada. Seu principal benefício reside no fato de permitir que a tensão de saída seja superior à tensão de entrada, o que é valioso em situações que exigem uma tensão mais alta. Além disso, ele é altamente eficiente, minimizando as perdas de energia durante o processo de conversão de tensão.

Entretanto, é importante notar que o processo de conversão pode gerar ruído elétrico de alta frequência, o qual pode afetar outros componentes eletrônicos próximos. Para mitigar esse problema, é fundamental projetar o circuito com cuidado e implementar técnicas de redução de ruído elétrico. Em resumo, o conversor *Boost* representa uma solução eficiente e versátil para aumentar a tensão de entrada em várias aplicações



eletrônicas, independentemente das variações dessa tensão.

C. Caracterização do painel fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos desempenham um papel fundamental na geração de energia solar, convertendo a luz solar diretamente em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. No entanto, a eficiência das células fotovoltaicas ainda é relativamente baixa, o que torna essencial o uso de sistemas de controle para otimizar o aproveitamento de sua capacidade. As células monocristalinas comerciais apresentam uma eficiência aproximada de 18%, enquanto as células policristalinas, mais populares, têm uma eficiência média em torno de 14% [5], [6] e [7].

Todos esses fatores contribuem para que a eficiência final do sistema seja baixa. Em outras palavras, isso significa que, de toda a energia solar que incide sobre o painel, apenas uma pequena fração é realmente convertida em potência elétrica utilizável.

Todo painel fotovoltaico tem uma característica única de acordo com seu fabricante. O modelo utilizado para o projeto foi da empresa Canadian Solar, modelo **CS6P-260P**, que conta com as seguintes características demonstradas na Tabela I.

Parâmetro	Magnitude	Abreviação
Potência Máxima Nominal	260 W	Pmax
Tensão Operacional Ideal	30,4 V	Vmp
Corrente Operacional Ideal	8,56 A	Imp
Tensão de Circuito Aberto	37,5 V	Voc
Corrente de Curto Circuito	9,12 A	Isc

TABELA I

Características do painel fotovoltaico

Para simular e determinar as características ideais do painel fotovoltaico, foi utilizado o software Psim. Através da parametrização dos componentes simuláveis, foi possível caracterizar o painel fotovoltaico específico utilizado no projeto, como é mostrado nas figuras 2 e 3 a fim de observar o comportamento ideal do painel fotovoltaico utilizado no projeto.

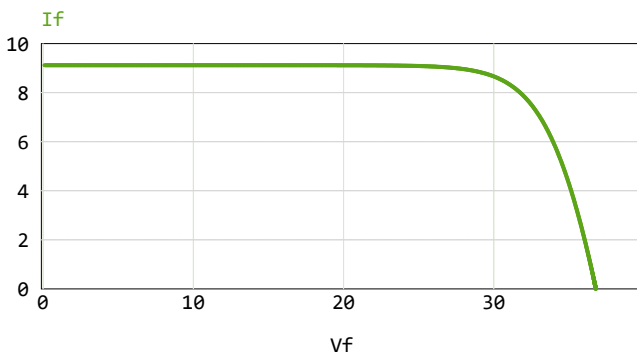


Fig. 2. Curva If/Vf do painel Canadian Solar CS6P-260P

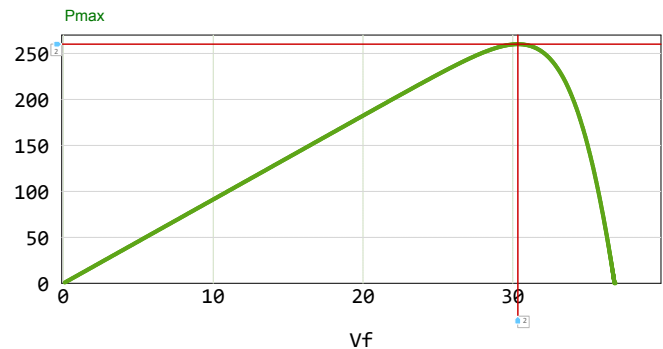


Fig. 3. Curva Pmax/Vf do painel Canadian Solar CS6P-260P

D. Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT)

Em sua maioria, os painéis fotovoltaicos apresentam um rendimento calculado de aproximadamente 15%, o que é considerado substancialmente abaixo do ideal para sua aplicação. Essa eficiência é calculada pela relação entre a máxima potência gerada e a irradiância solar incidente no painel fotovoltaico, (Zanotti, 2014) [8].

Para otimizar a eficiência desses módulos, diversas técnicas podem ser empregadas, sendo o método MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) um exemplo notável. O MPPT é amplamente utilizado na geração de energia fotovoltaica com o propósito de maximizar a conversão de energia. O princípio de funcionamento do MPPT envolve um controlador eletrônico que ajusta a tensão de saída do painel solar para manter a corrente de carga ideal, independentemente das flutuações de temperatura e luminosidade, visando o ponto de máxima potência. Esse ponto varia conforme a intensidade da luz solar e a temperatura do painel. O MPPT utiliza um algoritmo que modula a tensão de saída do painel fotovoltaico para manter a corrente de carga constante e, assim, maximizar a potência de saída.

O MPPT opera geralmente em duas fases: a primeira é a fase de varredura ou rastreamento do ponto de potência máxima, enquanto a segunda é a fixação da tensão de saída do painel solar no ponto de potência máxima. Na fase de varredura, o MPPT ajusta incrementalmente a tensão de saída do painel solar e registra a corrente e tensão de saída para identificar o ponto de potência máxima. Uma vez encontrado o ponto de potência máxima, o MPPT trava a tensão de saída no painel solar nesse ponto e mantém a corrente de carga constante.

O MPPT é comumente empregado em sistemas de energia fotovoltaica que alimentam baterias ou inversores de energia. Seu uso pode significativamente elevar a eficiência do sistema ao minimizar as perdas de energia devido às variações na intensidade da luz solar e na temperatura do painel. Em resumo, o MPPT é um sistema que permite maximizar a potência de saída do painel solar em condições variáveis de iluminação e temperatura, promovendo uma maior eficiência na conversão de energia do sistema.

Os sistemas fotovoltaicos exibem características específicas que influenciam seu desempenho. As curvas de corrente em

função da tensão (curva I-V) (Figura 2) e de potência em função da tensão (curva P-V) (Figura 3) são elementos essenciais para compreender o comportamento dos painéis fotovoltaicos.

Na Figura 4, observa-se que tanto a curva I-V quanto a curva P-V não são lineares. A corrente máxima e a tensão máxima que o módulo pode fornecer são chamadas, respectivamente, de corrente de curto-circuito (I_{sc}) e tensão de circuito aberto (V_{oc}). No entanto, é perceptível que os valores de tensão e corrente que garantem a máxima potência são menores do que os valores de pico de tensão e corrente do painel fotovoltaico. Portanto, é necessário encontrar os valores de corrente e tensão que assegurem que o arranjo de painéis opere na máxima potência, conhecida como Ponto de Máxima Potência (MPP).

A corrente de máxima potência, (I_{mp}), representa a corrente fornecida pelo painel fotovoltaico quando opera no ponto de máxima potência. Da mesma forma, a tensão de máxima potência, (V_{mp}), é a tensão presente nos terminais do painel quando opera nesse ponto. O valor de (P_{max}) representa o pico de potência do painel fotovoltaico, localizado no joelho da curva I-V e no pico da curva P-V. Os parâmetros (I_{sc}), (V_{oc}), (I_{mp}), (V_{mp}) e (P_{max}) são especificados nas folhas de dados para uma irradiância de 1000 W/m^2 e uma temperatura operacional de 25°C .

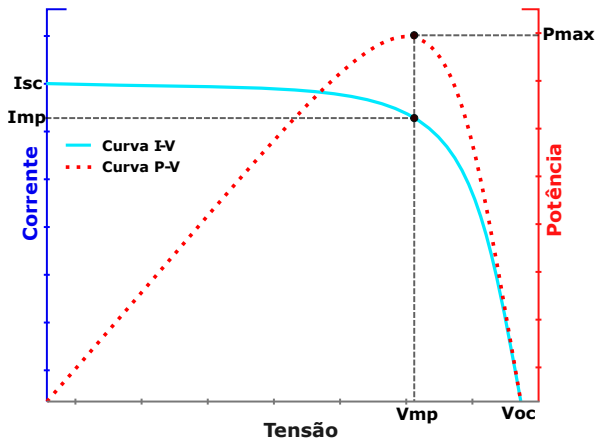


Fig. 4. Gráfico MPPT Fonte: Adaptado de (MORAES, CAIO) [9]

E. Método Impedância Característica de Conversores Estáticos

Em [8], o método proposto para rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) é denominado de Método da Impedância Característica. Isso se deve ao fato de que o ponto de operação será ajustado para atingir a máxima potência ao modificar a impedância característica do conversor, conforme percebida pelo painel fotovoltaico (FV).

O MPP é influenciado por uma variedade de fatores ambientais, como a irradiância solar e a temperatura. Para cada conjunto de condições ambientais, há um ponto de máxima potência específico associado. O propósito da técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) baseada na impedância característica é direcionar o ponto de operação

do painel fotovoltaico (FV) para o MPP correspondente. Esse método emprega a diferença entre dois instantes consecutivos, ligeiramente defasados, em vez de recorrer explicitamente a termos derivativos nas equações.

Em Zanotti (2014) [8], a técnica Impedância Característica é obtida através da modelagem detalhada do painel (FV) e da modelagem específica do conversor, juntamente com o auxílio do teorema da máxima transferência de potência (MTP), e então é obtida a equação de rastreamento para a aplicação da técnica da Impedância Característica, onde a equação é dada por (1).

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{2V_k}{Z_{in}} - \frac{V_k^2}{Z_{in}^2} \left(\frac{Z_{in(k)} - Z_{in(k-1)}}{V_k - V_{(k-1)}} \right) \quad (1)$$

Símbolo	Descrição
ΔP	Variação de potência
ΔV	Variação de tensão
V_k	Tensão da saída do módulo FV no instante k
$V_{(k-1)}$	Tensão da saída do módulo FV no instante $k - 1$
Z_{in}	Impedância de entrada do conversor
$Z_{in(k)}$	Impedância de entrada do conversor no instante k
$Z_{in(k-1)}$	Impedância de entrada do conversor no instante $k - 1$

TABELA II

Tabela de símbolos e descrições

O método impedância característica utiliza apenas um sensor de tensão, com isso aumentando a robustez do projeto. Além de conhecer a tensão atual (V_k), é necessário ter acesso ao valor da tensão no ponto de operação anterior (V_{k-1}). Este último é continuamente atualizado e registrado na memória do microcontrolador. Ambos os valores (V_k) e (V_{k-1}) são essenciais para calcular a variação (ΔP).

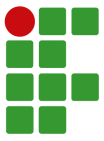
Uma peculiaridade notável do método da impedância característica é que a potência não é calculada diretamente. Em vez disso, o foco está na determinação da variação da potência, representada por (ΔP), onde a equação que comprova isso é a equação geral do método impedância característica dada por (2):

$$\Delta P = \frac{2V_k}{Z_{in_k}} \Delta V - \frac{V_k^2}{Z_{in_k}^2} \Delta Z_{in} \quad (2)$$

Para determinar Z_{in_k} , utiliza-se a equação da impedância de entrada de um conversor *boost*, apresentada na equação (3).

$$Z_{in_k} = R_{out} \cdot (1 - D)^2 \quad (3)$$

Para a construção e para a demonstração do código fez-se necessário a criação do fluxograma do algoritmo que é utilizado no projeto, como mostra a Figura 5.



III. MATERIAIS E METODOLOGIA

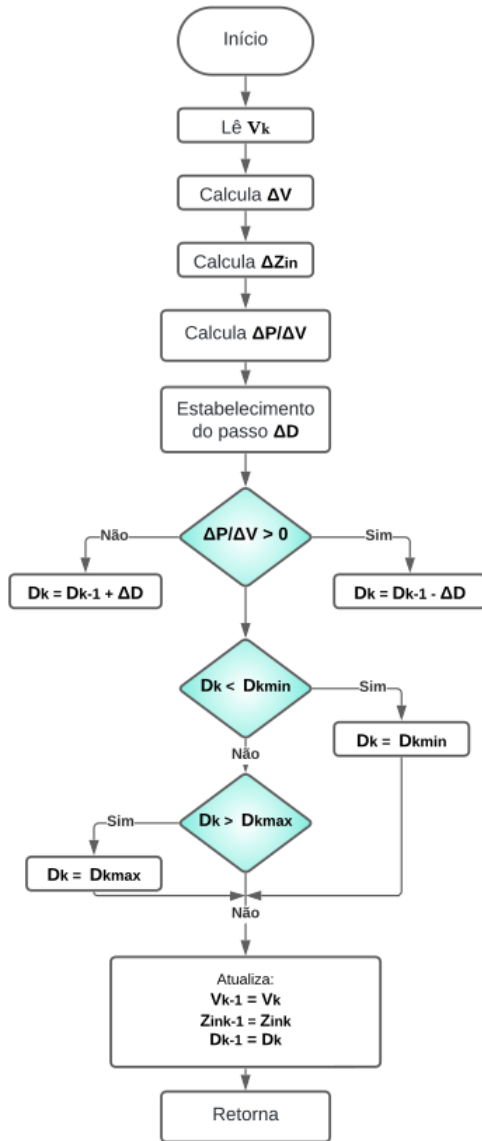


Fig. 5. Fluxograma Impedância Característica. Fonte: Adaptado de Zanotti (2014) [8].

1) *Algoritmo com passo fixo*: Como o valor de R_{out} (carga acoplada na saída do conversor *boost*) é sempre positivo, ele não interfere na direção do algoritmo, ou seja, não modifica o sinal do resultado de $\frac{\Delta P}{\Delta V}$. Dessa forma, se o resultado de $\frac{\Delta P}{\Delta V}$ for positivo, permanecerá positivo; e, se for negativo, continuará negativo. No entanto, R_{out} influenciará na magnitude da relação $\frac{\Delta P}{\Delta V}$, o que não apresenta impacto no algoritmo pois ele opera com um passo fixo.

Essa análise da técnica de MPPT da impedância característica com passo fixo pode ser vista como a abordagem original, uma vez que ela é independente do valor de R_{out} .

Para a construção do conversor CC-CC, é necessário o dimensionamento e montagem do indutor a ser utilizado. Para a operação em alta frequência, devem ser consideradas as perdas com indutância magnetizante, indutância de dispersão, aquecimento do núcleo, entre outros elementos indesejados que reduzem o rendimento do projeto e podem trazer resultados indesejados, como picos de tensão, altas perdas ou ruídos. O indutor foi construído utilizando um núcleo de ferrite do tipo E, por ter menos perdas por histerese e menor elevação de temperatura quando operando em altas frequências, se comparado ao núcleo de ferro-silício, porém é necessário tomar alguns cuidados adicionais, pois ele apresenta menor resistência a choques mecânicos e baixa densidade de fluxo de saturação.

A. Desenvolvimento do Conversor Boost

O conversor boost foi desenvolvido a partir dos parâmetros escolhidos de potência de saída $P_o = 260\text{W}$, que corresponde à máxima potência do painel fotovoltaico Canadian Solar CS6P-260P. Para o desenvolvimento do conversor boost e escolha dos componentes, foram utilizados os seguintes parâmetros contidos na tabela a seguir:

Símbolo	Unidade	Descrição
V_o	100 V	Tensão de saída
E	30 V	Tensão de entrada
Δi_L	0,2	Ondulação de corrente
ΔV	0,01	Ondulação de tensão
f_s	50k Hz	Frequência de chaveamento
P_o	260 W	Potência de saída

TABELA III
Parâmetros do Conversor Boost

Os cálculos para o desenvolvimento do projeto se encontram a seguir:

Para o cálculo da razão cíclica, utilizada a equação (4):

$$D = 1 - \frac{V_o}{E} = 0,7 \quad (4)$$

O cálculo da corrente de saída é necessário para encontrar os próximos parâmetros de componentes utilizando a equação (5):

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = 2,6\text{A} \quad (5)$$

Com o valor da corrente de saída sendo conhecido, é possível encontrar o valor da ondulação de corrente e, assim, calcular o valor da indutância de saída com a equação (6):

$$L = \frac{E \cdot D}{\Delta i_L \cdot I_o \cdot f_s} = 0,8\text{mH} \quad (6)$$

O cálculo para obter a capacitância de saída é dado pela

equação (7):

$$C = \frac{I_o \cdot D}{\Delta V \cdot V_o \cdot F_s} = 36,4 \mu F \quad (7)$$

Por fim, obtendo todos os valores dos componentes do circuito Boost, é necessário calcular a carga resistiva obtida pela equação (8):

$$R_{out} = \frac{V_o}{I_o} = 38,4 \Omega \quad (8)$$

Para alcançar os valores ideais calculados, é fundamental utilizar componentes comerciais que se aproximem o máximo possível dos valores simulados para a montagem prática do conversor. Na escolha do MOSFET, foram analisadas tanto a tensão de operação quanto a tensão de pico sobre ele. Como boa prática no desenvolvimento de projetos de conversores *boost*, optou-se por um MOSFET capaz de operar com uma tensão duas vezes maior do que a tensão de saída do conversor, ou seja, um MOSFET que consiga operar com 200 V de tensão. Em relação à corrente do MOSFET, para garantir o pleno funcionamento, é crucial que o componente tenha a capacidade de suportar uma corrente maior do que a prevista ou simulada no projeto.

Para os valores ideais calculados é necessário utilizar componentes com valores comerciais para a montagem do conversor na prática. Dessa forma os componentes comerciais com disponibilidade em laboratório para a montagem do conversor boost são demonstrados na tabela a seguir:

Componente	Ideal Calculado	Utilizado
Mosfet	IRF640 18 A	IRF640 18 A
Diodo	RURP1560 10 A	RURP1560 10 A
Capacitor	36,4 μF	47 μF
Resistor de Carga	38,4 Ω	38,4 Ω
Indutor	0,8 mH	0,8 mH

TABELA IV
Especificações dos Componentes

B. Desenvolvimento da placa de circuito impresso

O desenvolvimento de um layout coerente com as especificações do projeto é essencial para o funcionamento e obtenção dos resultados práticos, além dos simulados. Com isso, a disposição dos componentes de potência e chaveamento (diodo e MOSFET) é de notável importância, garantindo que tenham o menor distanciamento possível, evitando perdas maiores devido às indutâncias parasitas das trilhas do circuito.

As trilhas de potência do circuito foram dimensionadas com um fator de 1 mm para cada ampere conduzido. Assim, as trilhas de potência ficaram com 5 mm de espessura, proporcionando uma margem de funcionamento maior e maior robustez.

Para garantir uma boa refrigeração dos semicondutores e do indutor de potência, foi reservado espaço para a instalação de um mini ventilador, como pode ser visto na figura 6. O layout desenvolvido no software Proteus é demonstrado na figura 7.

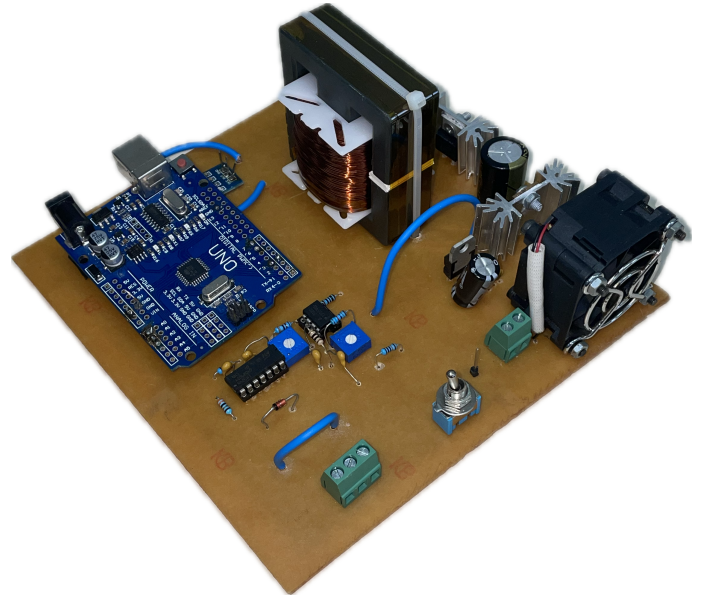


Fig. 6. Protótipo montado.

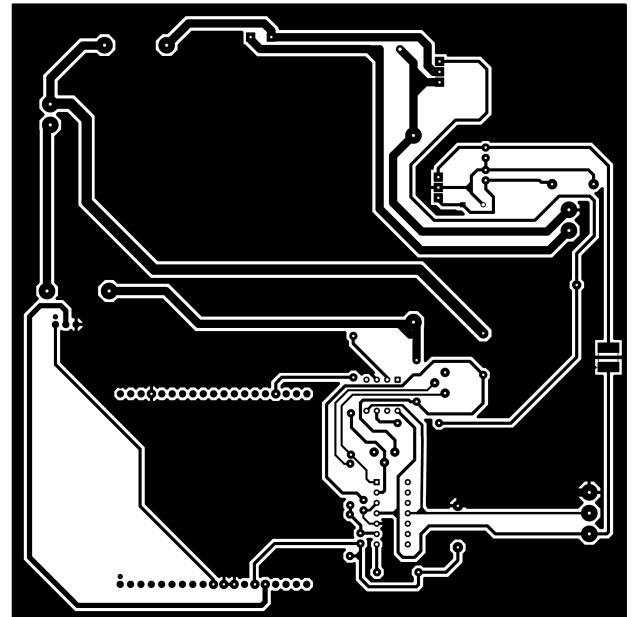
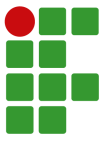


Fig. 7. Layout da placa de circuito impresso

C. Microcontrolador - Aduino UNO

O Arduino UNO é amplamente reconhecido como a placa microcontrolada mais popular e bem documentada da família Arduino. Para projetos que envolvem o desenvolvimento de um controlador MPPT para um conversor boost, o Arduino UNO se destaca como a escolha mais sensata, devido à sua simplicidade e às suas características físicas e elétricas ideais para essa aplicação.

De acordo com Arduino.cc (2024) [10] e [11], o Arduino UNO é uma placa microcontroladora robusta, fundamentada



no chip ATmega328P. Equipada com 14 pinos de entrada/saída digital (sendo 6 deles utilizáveis como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico de 16 MHz e diversas interfaces como USB, conector de alimentação, ICSP e botão de reset. Completamente autossuficiente para dar suporte ao microcontrolador, o Arduino UNO pode ser facilmente conectado a um computador via cabo USB ou alimentado por um adaptador CA para CC ou bateria.

Sua natureza versátil permite explorar suas funcionalidades sem medo de cometer erros irreversíveis; na eventualidade de problemas, é possível substituir o chip por uma quantia mínima e recomeçar sem dificuldades.

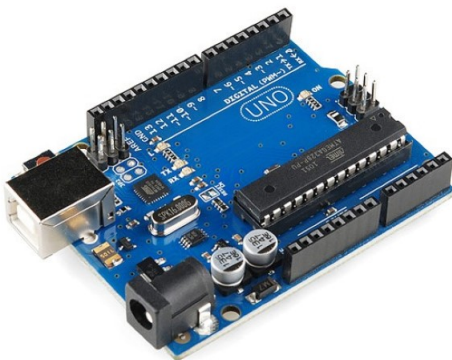


Fig. 8. Arduino UNO Fonte: FlipFlop [12].

D. Rastreador de Máxima Potência com Arduino Uno

O código contido no **APÊNDICE II** implementa um rastreador de máxima potência (MPPT) utilizando o método da Impedância Característica, controlado por um Arduino Uno. Ele realiza o ajuste do *duty cycle* de um conversor *boost* para maximizar a potência extraída de um painel fotovoltaico. A técnica utiliza medições de tensão e cálculos de impedância para determinar as variações necessárias no *duty cycle*, com a vantagem de não utilizar sensores de corrente.

1) Estrutura do Código:

1. **Declaração de Variáveis:** São definidos os limites do *duty cycle*, parâmetros do filtro de média móvel, constantes do sistema e variáveis de estado para as medições de tensão, impedância e potência.
2. **Configuração Inicial:** No `setup()`, o código configura o pino PWM (pino 3), inicializa o timer 2 para gerar um sinal de 50 kHz e define a entrada analógica A2 para leitura da tensão.
3. **Loop Principal:** O código alterna entre duas etapas:
 - *Varredura Inicial:* Realiza uma varredura sistemática do *duty cycle* de 20% a 70% durante 20 segundos,

para obter uma ideia inicial do ponto de máxima potência.

- *Algoritmo de Rastreamento:* Após a varredura, entra em operação contínua ajustando dinamicamente o *duty cycle* com base nas medições e cálculos realizados.

2) Funcionamento do Algoritmo:

1. **Leitura de Tensão e Filtragem:** A tensão é lida da entrada A2 e filtrada usando um filtro de média móvel com um buffer de quatro valores para reduzir ruídos.
2. **Cálculos de Impedância e Potência:** A cada iteração, o algoritmo calcula:
 - Impedância elétrica do sistema (Z).
 - Variação de tensão (ΔV) e potência (ΔP).
 - Taxa de variação de potência em relação à tensão ($\frac{\Delta P}{\Delta V}$).

O código inclui proteções contra divisão por zero para garantir robustez.

3. **Ajuste do Duty Cycle:** Baseado na variação de potência, o *duty cycle* é aumentado ou reduzido. Caso a variação indique um aumento de potência, o sistema ajusta-se para seguir essa tendência.
4. **Limites do Duty Cycle:** Os ajustes são restringidos a um intervalo seguro entre 20% e 70% ($DkMIN = 7$, $DkMAX = 27$).
5. **Saída PWM e Monitoramento:** O novo *duty cycle* é aplicado no pino 3, enquanto os dados de tensão, *duty cycle* e variação de potência são enviados ao monitor serial para análise em tempo real.

3) Entradas e Saídas: Entradas:

- *Tensão:* Lida pelo sensor conectado ao pino analógico A2.

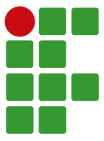
Saídas:

- *PWM:* Sinal PWM gerado no pino 3 para controlar o conversor *boost*.
- *Monitor Serial:* Exibe os dados de operação, como *duty cycle*, tensão atual e variação de potência.

4) *Considerações:* Este algoritmo utiliza técnicas de controle simples, mas eficientes, para rastrear o ponto de máxima potência com apenas um sensor de tensão. A implementação é robusta contra variações abruptas de condições ambientais, como alterações de irradiação solar. Trabalhos futuros podem explorar a aplicação de filtros mais avançados e ajustes adaptativos do *step* para melhorar ainda mais a eficiência e a estabilidade do sistema.

E. Desenvolvimento do indutor de potência

Para o pleno funcionamento do projeto, fez-se necessário o desenvolvimento de um indutor de potência específico. Com



base na equação (5), obteve-se o valor da indutância de 0,8mH para o conversor *boost*.

Em Barbi (2007) [13], há um problema nos indutores que operam em altas frequências: os elementos parasitas, como indutância de magnetização, indutância de dispersão, capacitância entre enrolamentos, capacitância entre espiras e outras variáveis, comprometem a idealidade de operação de um elemento magnético.

Estes elementos parasitas influenciam gerando resultados indesejáveis no funcionamento do conversor *boost*. Os problemas mais observados são:

- Picos de tensão nos semicondutores;
- Altas perdas;
- Emissão de ruídos.

O projeto de indutores torna-se ainda mais desafiador quando se busca reduzir seu tamanho ao trabalhar com frequências de operação na faixa de 50 kHz a 200 kHz. Essa tarefa é complexa devido à necessidade de equilibrar a minimização de perdas magnéticas e a maximização da densidade de potência nesses níveis elevados de frequência [14].

Para o projeto do indutor de potência, é necessário escolher previamente o núcleo do indutor, que, no caso, será de ferrite, pois o indutor operará em uma frequência de 50k Hz. O núcleo escolhido foi o **NEE-55/28/21-6500-IP12R** com base no **ANEXO II**.

Para operação em 50k Hz, o núcleo escolhido é o mais indicado. Contudo, este tipo de núcleo apresenta algumas desvantagens, tais como:

- Baixa densidade de fluxo de saturação (0,3T);
- Baixa robustez a choques mecânicos.

Com base nos parâmetros da Tabela V, desenvolvem-se abaixo os cálculos do projeto do indutor de potência. Para verificar inicialmente se o modelo do núcleo escolhido será o correto, deve-se calcular $A_e A_w$ a fim de comparar com o produto $A_e A_w$ do indutor escolhido. O termo $A_e A_w$ é o produto da área efetiva do núcleo (A_e) e da área da janela (A_w). Esse parâmetro é fundamental no dimensionamento de indutores de potência, pois influencia diretamente a capacidade do núcleo de suportar a densidade de fluxo magnético e acomodar o enrolamento do fio condutor.

Dessa forma, o valor de $A_e A_w$ calculado pela equação (9) deve ser menor que 8,85 cm⁴.

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{pico} \cdot I_{eficaz}}{B_{max} \cdot A_e} = 6,74 \text{ cm}^4 \quad (9)$$

Para calcular o número de espiras que indutor de potência, tem-se como base a equação (10):

$$N = \frac{L \cdot I_{pico}}{B_{max} \cdot A_e} = 74,32 \quad (10)$$

Para fins práticos, o indutor terá 75 espiras.

No dimensionamento do entreferro, utiliza-se a equação (11), que expressa o valor do comprimento do entreferro total no indutor de potência:

Símbolo	Unidade	Descrição
I_{eficaz}	8,97 A	Corrente eficaz
I_{pico}	9,86 A	Corrente de pico
L	0,8 m H	Indutância
B_{max}	0,3 T	Máxima densidade de fluxo de saturação
J_{max}	500 A/cm ²	Máxima densidade de corrente
f	50k Hz	Frequência de operação
A_w	2,5 cm ²	Área da janela
A_e	3,54 cm ²	Área da seção transversal do núcleo
K_w	0,7	Fator de ocupação
$A_e A_w$	8,85 cm ⁴	Produto $A_e A_w$ do núcleo escolhido

TABELA V

Parâmetros do projeto do indutor

$$l_{entreferro} = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A_e}{L} = 0,0031 \text{ m} \quad (11)$$

A permeabilidade do ar é dada por:

$$\mu_0 = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ T}\cdot\text{m/A}$$

Vale ressaltar que, no núcleo E-E escolhido, deve-se colocar metade do entreferro em cada lado. Assim, o valor obtido na equação (11) deve ser dividido por 2, resultando em 0,00155 metros ou 1,55 mm de entreferro para cada lado do núcleo do indutor, sendo papel o material escolhido.

1) *Cálculo da seção dos condutores:* Conforme [15], a utilização de condutores em altas frequências deve levar em consideração o efeito pelicular (*skin effect*). À medida que a frequência aumenta, a corrente no interior de um condutor tende a se concentrar na periferia, resultando em maior densidade de corrente nas bordas e menor no centro. Esse efeito reduz a área efetiva do condutor, limitando a máxima área útil.

Para calcular o diâmetro necessário do condutor elétrico, deve-se determinar a profundidade de penetração utilizando a equação (12):

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f}} = 0,0335 \text{ cm} \quad (12)$$

Dessa forma, o condutor utilizado não deve possuir um diâmetro superior ao valor 2Δ. Assim:

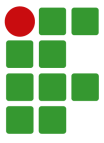
$$\text{condutor} = 2 \cdot \Delta = 0,067 \text{ cm} \quad (13)$$

Logo, o fio correspondente é o AWG 22, cujo diâmetro é 0,064 cm e a área é 0,003255 cm². Porém, devido à disponibilidade no laboratório, será utilizado o fio AWG 27, que possui as seguintes dimensões, conforme a tabela a seguir:

Fio	Diâmetro	Área
AWG 27	0,036 cm	0,001021 cm ²

TABELA VI

Características físicas do cabo AWG 27.



Considerando os efeitos térmicos, o cálculo da seção necessária para conduzir a corrente do enrolamento depende da máxima densidade de corrente admitida no condutor, conforme evidenciado na equação (14):

$$S_{\text{cond}} = \frac{I_{\text{eficaz}}}{J_{\text{max}}} = 1,9933 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

onde S_{cond} é a área de condução.

Conforme a tabela de condutores do **ANEXO I**, o valor de S_{cond} indica que o condutor para suprir a condição térmica é o AWG 14, com área de $0,020811 \text{ cm}^2$ e diâmetro de $0,163 \text{ cm}$. Para atender às condições impostas pelo efeito pelicular *skin effect* e efeito térmico, deve-se calcular, conforme a equação (15), quantos condutores em paralelo do fio AWG 27 (condutor escolhido para o projeto) serão necessários no indutor de potência:

$$N_{\text{cond}} = \frac{S_{\text{cond}}}{0,001021} = 17,5 \quad (15)$$

Ou seja, serão necessários 18 condutores em paralelo.

O valor de $0,001021 \text{ cm}^2$ indicado na equação (14) corresponde à área do fio ****AWG 27****, informação encontrada no **ANEXO I**.

2) *Cálculo do comprimento do condutor*: Para calcular o comprimento total de cada condutor do indutor de potência, é necessário determinar o perímetro do carretel utilizado **CE-55/28/21**, dado pela equação (16). O comprimento total do condutor enrolado no carretel do indutor é determinado pela equação (17), que é o produto do perímetro do carretel pelo número de espiras:

$$\text{Perímetro} = 86,4 \text{ mm} \quad (16)$$

$$l_{\text{espira}} = 86,4 \cdot N = 6407,04 \text{ mm} \quad (17)$$

Ou aproximadamente 6,5 metros.

A Figura 10 mostra o resultado final após o desenvolvimento do indutor de potência.

IV. RESULTADOS

O protótipo do rastreador de máxima potência com a técnica de Impedância Característica foi construído para provar que a técnica em questão funciona para a topologia do conversor **CC-CC Boost**. Para isto, fez-se necessário a elaboração da simulação e construção de um protótipo de placa de circuito impresso para aquisição de resultados teóricos e práticos. Logo, nesta seção, são apresentados os resultados via simulação pelo Software PSIM na versão 2023.1, e os resultados obtidos via ensaios em laboratório do protótipo construído.

A. Resultados Simulados

O objetivo do degrau abrupto de irradiância é simular uma situação comum ao longo do dia, em que o painel fotovoltaico

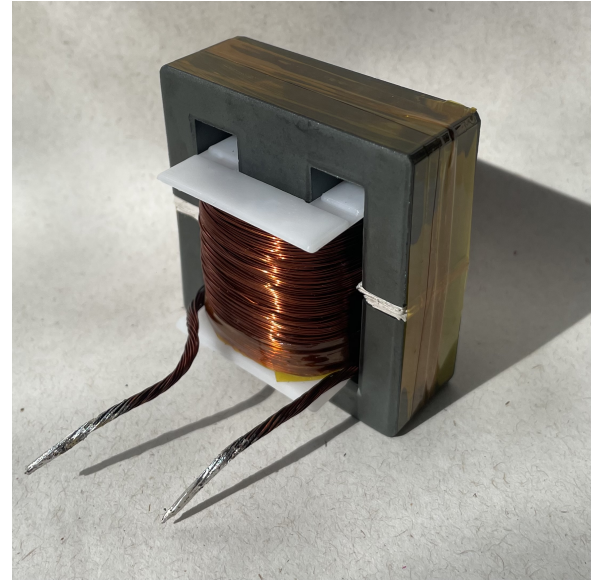


Fig. 9. Indutor de potencia. Fonte: Do autor.

(FV) recebe irradiância solar direta em um céu claro e, repentinamente, uma nuvem passa, sombreando totalmente o painel.

1) *Degrau de irradiância de 200 W/m^2* : No primeiro teste, o sistema inicia operando com uma irradiância de 1000 W/m^2 (o valor máximo a que é submetido). Em seguida, aplica-se um degrau de baixa amplitude, de 200 W/m^2 , simulando a passagem de uma pequena nuvem sobre o painel fotovoltaico, conforme ilustrado na Figura 10.



Fig. 10. Degrau de 200 W/m^2 . Fonte: Do autor.

Pode-se observar que, na Figura 11, após o degrau de -200 W/m^2 , o sistema rastreia o novo ponto de máxima potência MPP em um tempo praticamente instantâneo. Porém, após receber o degrau ocorre oscilações no novo MPP, pois o algoritmo de controle tem dificuldades em rastrear baixas potências.

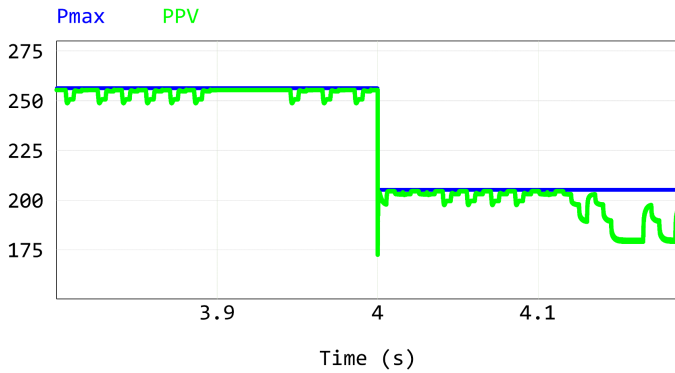
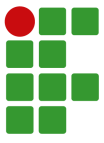


Fig. 11. Zoom no degrau de 200 W/m². Fonte: Do autor.

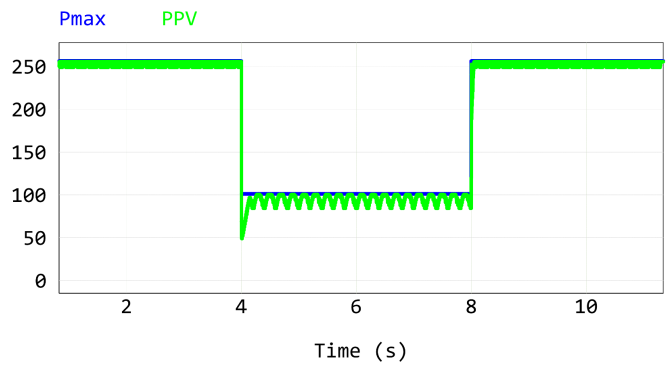


Fig. 13. Degrão de 600 W/m². Fonte: Do autor.

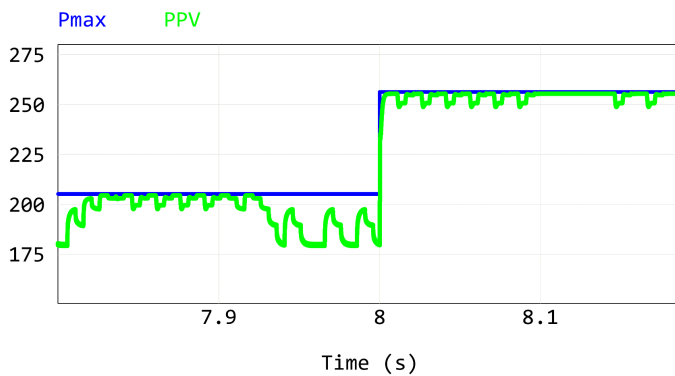


Fig. 12. Zoom no degrau de 200 W/m². Fonte: Do autor.

Na Figura 12, observa-se que o sistema responde conforme o esperado para um degrau positivo de irradiância, conseguindo rastrear o novo ponto de máxima potência (MPP) sem dificuldades. Esse tempo praticamente instantâneo é justificável, pois o degrau aplicado é de 200 W/m² é pequeno, permitindo ao sistema uma resposta rápida. Nota-se também, em variações e degraus positivos de irradiância, o algoritmo consegue realizar um rápido e consistente rastreamento do novo (MPP).

2) *Degrão de irradiância de 600 W/m²*: No segundo teste, o sistema foi submetido a um degrau com intensidade triplicada em relação ao primeiro, simulando a interferência de uma nuvem de grande porte na irradiância direta sobre o painel fotovoltaico, conforme ilustrado nas Figuras 13, 14 e 15.

O sistema é submetido a um degrau de irradiância de -600 W/m² aos 4 segundos, seguido por outro degrau de 600 W/m² aos 8 segundos. Nesse contexto, espera-se que o rastreamento do novo ponto de máxima potência (MPP) seja mais lento ao retornar à irradiância de 1000 W/m². Esse atraso ocorre devido à interferência gerada por degraus abruptos de grande amplitude, que interferem no tempo de rastreamento do (MPP) pelo sistema.

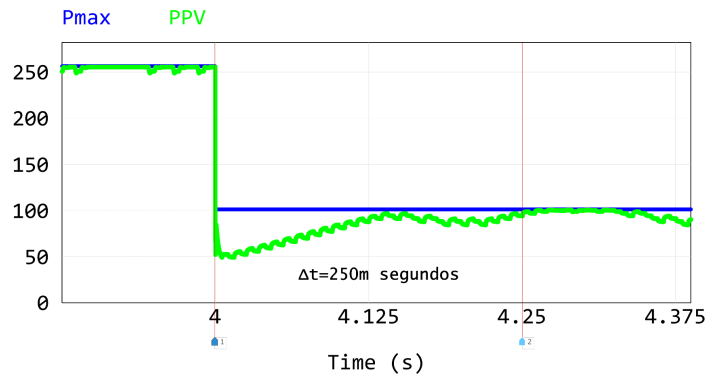


Fig. 14. Zoom no degrau de 600 W/m². Fonte: Do autor.

Observa-se que, na Figura 14, em resposta a um degrau negativo abrupto de grande amplitude, o sistema rastreia o novo ponto de máxima potência MPP para a irradiância atual de forma a levar um tempo de resposta de aproximadamente $\Delta T = 250$ ms. Isso ocorre pois o degrau é abrupto gerado por uma queda significativa da irradiância sobre o painel fotovoltaico, fazendo o algoritmo levar mais tempo para rastrear o novo (MPP).

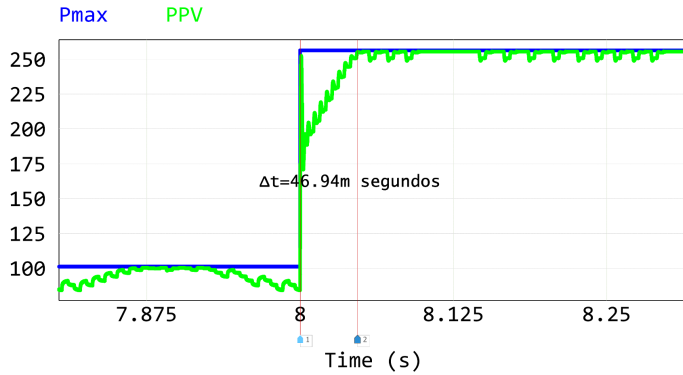
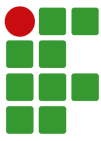


Fig. 15. Zoom no degrau de 600 W/m². Fonte: Do autor.

Na Figura 15, observa-se que, embora o degrau aplicado seja três vezes maior que o do primeiro teste, o sistema rastrea rapidamente o novo ponto de máxima potência MPP em resposta a um degrau positivo de irradiância, demonstrando a eficiência da técnica de controle MPPT por Impedância Característica. O tempo de resposta do sistema foi de aproximadamente $\Delta T = 46,94\text{ms}$ para atingir novamente o MPP, agora na potência nominal que o sistema pode fornecer.

Observa-se também, nas Figuras 14 e 15, que, ao rastrear o novo ponto de máxima potência MPP após o degrau de -600W/m^2 , há uma oscilação mais acentuada na potência entregue pelo sistema. Isso ocorre devido à dificuldade em rastrear potências menores, geradas por uma irradiância reduzida sobre o painel fotovoltaico. Esse comportamento foi observado tanto em simulação quanto nos testes práticos.

3) *Rampa de irradiância:* O objetivo, neste contexto, é avaliar a dinâmica de rastreamento da técnica da Impedância Característica e comprovar que o sistema é capaz de acompanhar o ponto de máxima potência, mesmo em condições de constante variação.

O ponto de máxima potência não é um valor fixo, pois está em constante alteração devido às variações contínuas na irradiância.

4) *Rampa crescente de irradiância:* Observa-se que, na Figura 16, à medida que a irradiância aumenta, as oscilações na potência rastreada pelo sistema tendem a ser menores. Isso ocorre porque é mais simples rastrear o ponto de máxima potência sob condições de alta irradiância.

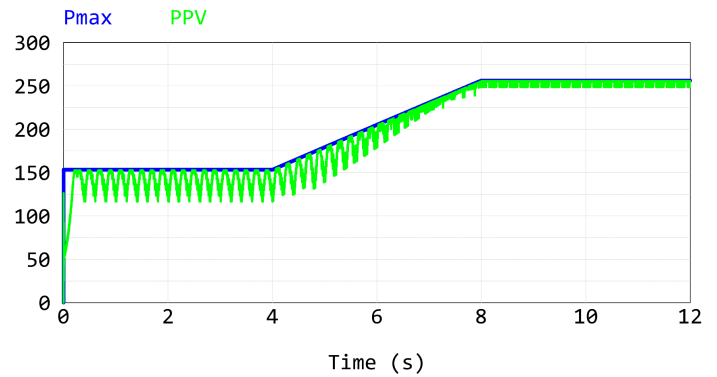


Fig. 16. Rampa crescente de irradiância de 600 W/m². Fonte: Do autor

Durante o rastreamento, o sistema parte de um ponto estabilizado no ponto de máxima potência e, de forma consistente, acompanha esse ponto. No entanto, durante o incremento da irradiância, não há um ponto de máxima potência fixo, o que impede o sistema de identificar um alvo claro a ser alcançado, resultando em oscilações na potência rastreada.

Por outro lado, quando a irradiância se estabiliza em um valor fixo, o ponto de máxima potência também se torna definido. Nessa condição, o sistema é capaz de entregar menos oscilações de maneira eficiente.

5) *Rampa decrescente de irradiância:* Verifica-se na Figura 17 que, em condições de baixa irradiância, o processo de rastreamento apresenta maior dificuldade, especialmente quando a irradiância está em transição e não estabilizada, como observado nos testes realizados. É relevante mencionar uma limitação do conversor *boost*, que se mostra incapaz de rastrear o ponto de máxima potência em condições de baixa irradiância [16].

Entretanto, ao alcançar um novo regime estacionário de irradiância, o sistema converge para o respectivo ponto de máxima potência, operando com oscilações em torno desse ponto.

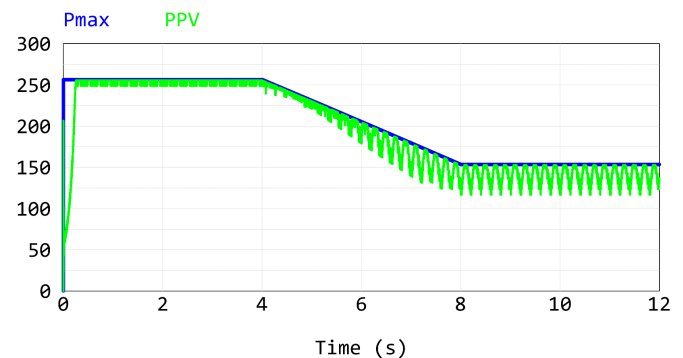
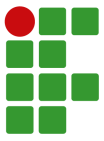


Fig. 17. Rampa decrescente de irradiância de -600W/m^2 . Fonte: Do autor



B. Resultados práticos

Os resultados foram obtidos a partir de testes experimentais realizados em laboratório, utilizando um painel fotovoltaico modelo *Canadian Solar CS6P-260P* (cujas características estão contidas na Tabela I), instalado no telhado do campus do IFSC - Rau. Os experimentos ocorreram em um dia com condições climáticas não ideais para maximizar a irradiância sobre o painel, conforme ilustrado na Figura 18, que apresenta as condições climáticas horárias para Jaraguá do Sul - SC.



Fig. 18. Condição climática do dia dos testes experimentais. Fonte: Previsão do tempo Apple.

Os gráficos de potência rastreada foram gerados multiplicando-se a tensão de entrada pela corrente de entrada, com ambos os valores obtidos diretamente no osciloscópio. Posteriormente, os dados foram organizados em uma tabela de pontos e utilizados para construir o gráfico no software MATLAB, sem a aplicação de qualquer tipo de filtro.

Durante dias limpos, a irradiância não sofre mudanças súbitas. O mesmo ocorre com a curva fotovoltaica (PV) do painel fotovoltaico, que permanece quase constante e apresenta apenas um ponto de máxima potência [17], como é mostrado na figura 4, a qual caracteriza o comportamento ideal do painel fotovoltaico utilizado nos testes experimentais.

Com as condições de teste apresentadas, é possível avaliar o desempenho do algoritmo ilustrado na Figura 19 na busca pelo ponto de máxima potência (MPP). O programa começa com uma varredura fixa para localizar o MPP, demonstrando, em seguida, como o controle se comporta ao rastrear o ponto detectado durante essa etapa inicial.

Após concluir a varredura fixa do *duty cycle*, que dura cerca de 21 segundos, o controle MPPT entra em operação. Durante esse período inicial, o algoritmo incrementa o *duty cycle* em passos fixos de 0,025, começando em 0,2 e avançando até 0,7. Esse incremento fixo de 0,025 é mantido ao longo de toda a

execução do programa, garantindo consistência na operação com passo fixo do controle MPPT.

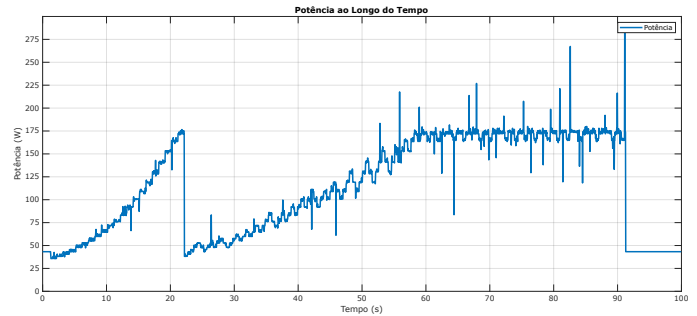


Fig. 19. Potência máxima rastreada de 175 W para condição de céu com nuvens. Fonte: Do autor

Na Figura 19, é possível observar o sucesso do rastreamento da máxima potência cerca de 60 segundos após a inicialização do sistema, atingindo um valor médio de 175 W. Esse resultado deve-se às condições climáticas durante o teste prático, que foi realizado em um cenário parcialmente nublado, provocando variações na irradiância incidente sobre o painel fotovoltaico.

O tempo necessário para que o controle MPPT atinja o ponto de máxima potência MPP foi de aproximadamente 40 segundos. Esse intervalo reflete a dinâmica real do painel fotovoltaico em resposta às variações climáticas, bem como a escolha de um passo fixo no duty cycle utilizado pelo algoritmo de controle, justificando o tempo total para alcançar o MPP.

1) *Condição de céu parcialmente nublado próximo ao meio dia:* O comportamento da potência segue o mesmo padrão observado no teste anterior, porém com uma amplitude maior na potência máxima rastreada, conforme ilustrado na Figura 20. Nesse teste, a potência alcançou 200 W, resultado de uma maior incidência de irradiância solar sobre o painel fotovoltaico.

Na Figura 20, também se observa que o tempo necessário para o algoritmo rastrear o ponto de máxima potência MPP foi menor em comparação ao teste anterior, mostrado na Figura 19. Esse desempenho superior deve-se à maior facilidade do algoritmo em rastrear potências associadas a níveis mais elevados de irradiância solar, o que reduz o tempo de convergência para o MPP.

V. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi apresentar o estudo de uma técnica inovadora e pouco convencional para o rastreamento do ponto de máxima potência MPP em sistemas fotovoltaicos, conhecida como Impedância Característica.

A principal vantagem dessa técnica reside na simplicidade do sistema, que utiliza apenas um sensor de tensão. Este componente é de fácil construção e baixo custo, eliminando a necessidade de um sensor de corrente. Sensores de corrente, amplamente utilizados em técnicas tradicionais de MPPT, como Perturba e Observa, apresentam maior complexidade e custo. Com a remoção do sensor de corrente, o sistema torna-se mais confiável e robusto, resultando em maior eficiência e melhor desempenho geral.

Foram realizados diversos testes teóricos para avaliar o desempenho da técnica de Impedância Característica. Entre os experimentos conduzidos, destacam-se testes com degraus de diferentes magnitudes, bem como com rampas crescentes e decrescentes, visando analisar a dinâmica ideal do método de controle MPPT proposto. Os resultados obtidos demonstraram que a técnica de Impedância Característica apresenta um desempenho satisfatório, com respostas rápidas e eficientes às variações aplicadas ao sistema.

Apesar de suas vantagens, a técnica de Impedância Característica apresenta uma limitação: a oscilação constante em torno do ponto de máxima potência. Contudo, quando aplicada em sua forma original, com passo fixo, o valor da potência rastreada torna-se independente de R_{out} , conferindo maior previsibilidade ao sistema.

Por fim, é importante ressaltar que este trabalho não busca esgotar os estudos e análises sobre a técnica de Impedância Característica. Considerando a ampla variedade de formas de aplicação e as inúmeras possibilidades de melhorias, sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas ao final deste estudo.

VI. TRABALHOS FUTUROS

Por meio de trabalhos futuros, podem ser apresentadas propostas de aprimoramento tanto para a continuidade deste estudo quanto para o aperfeiçoamento da técnica de Impedância Característica.

A. Aplicar o dual da técnica Impedância Característica

Como a técnica de Impedância Característica faz uso apenas de um sensor de tensão, propõe-se a exploração de uma abordagem complementar utilizando exclusivamente um sensor de corrente, permitindo assim a implementação de um método dual dessa técnica.

B. Estabilização do algoritmo no MPP

Sugere-se a realização de estudos voltados para a eliminação das oscilações da técnica de Impedância Característica após atingir o ponto de máxima potência MPP, especialmente em

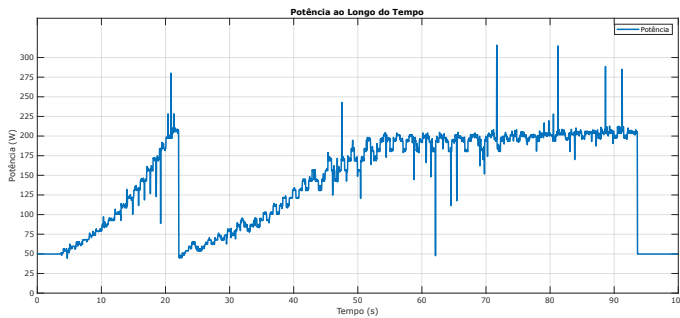


Fig. 20. Potência máxima rastreada de 200 W para condição de céu com nuvens espaçadas. Fonte: Do autor

2) *Degrau gerado por passagem de nuvem:* Na Figura 21, observa-se que o sistema foi submetido a uma variação abrupta na irradiância solar, resultando em um degrau perceptível na amplitude da potência entre os instantes de 67 e 87 segundos. Esse comportamento foi causado pela passagem de uma nuvem de alta densidade sobre o painel fotovoltaico, gerando um degrau natural na potência do sistema.

É possível notar que, no instante de 62 segundos, o algoritmo ajusta o sistema para rastrear o ponto de máxima potência MPP. Contudo, entre os instantes de 68 e 82 segundos, a passagem da nuvem provoca uma perturbação no sistema, afetando temporariamente o rastreamento. Após esse evento, a partir do instante de 83 segundos, o sistema retoma o rastreamento do novo MPP, que já começava a ser alcançado antes da interferência causada pela nuvem.

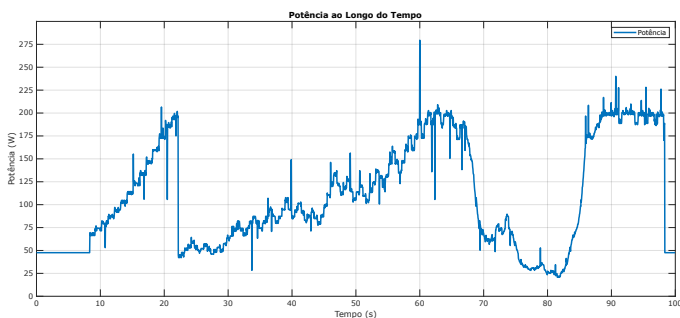
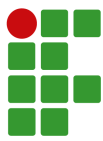


Fig. 21. Potência ao longo do tempo com passagem de nuvem gerando degrau. Fonte: Do autor

Observa-se que, em todos os testes práticos realizados, há a presença de ruídos nos resultados. Embora esses ruídos afetem a estética dos gráficos, eles não comprometem a confiabilidade das medições.

Os ruídos são causados, principalmente, pelo chaveamento do MOSFET, que opera no sistema a uma frequência de 50 kHz. Esse problema pode ser mitigado com a implementação de filtros adequados no protótipo, bem como pela definição de um ponto único para a coleta das grandezas elétricas (tensão e corrente) por meio do osciloscópio.



situações de degrau negativo de potência no sistema.

C. Utilização de fonte programável de tensão

Propõe-se o uso de uma fonte de tensão programável para emular as características de um painel fotovoltaico. Ao configurar a fonte de tensão com os parâmetros do painel, torna-se possível introduzir perturbações controladas, como degraus e rampas no sistema. Isso permite a realização de testes práticos que reproduzem com precisão os cenários teóricos.

D. Implementação de filtros para redução de ruídos no sistema

Para mitigar os ruídos observados nos testes práticos, recomenda-se a implementação de filtros adequados que minimizem os efeitos do chaveamento em alta frequência do MOSFET. Entre as possíveis soluções, destacam-se a utilização de filtros RC, a aplicação de circuitos *snubber* em paralelo com o MOSFET e a definição de uma área dedicada exclusivamente à coleta das grandezas elétricas (tensão e corrente) por meio do osciloscópio. Essas medidas visam aumentar a qualidade dos sinais coletados e, conseqüentemente, aprimorar a confiabilidade das análises realizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] A. R. Hambley, *Electrical Engineering: Principles and Applications*, 6 ed., Pearson, 2013.
- [2] M. A. G. De Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. d. A. e Melo, C. A. Canesin, “Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications”, *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, 2012.
- [3] M. H. Rashid, “Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações”, *Tradução de L Abramowicz*, vol. 48, p. 48, 2014.
- [4] I. BARBI, *Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*, 1ª edição ed., Editora Exemplo, São Paulo, 2023.
- [5] M. M. Casaro, D. C. Martins, “Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação”, *Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 3, pp. 141–146, 2008.
- [6] INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, “Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011: Anexo – Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica (Módulo, Controlador de Carga, Inversor e Bateria)”, , 2011.
- [7] CEPEL; CRESESB, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, Ediouro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [8] J. W. Zanotti, “Rastreador de potência máxima para sistemas fotovoltaicos utilizando toda a impedância característica dos conversores estáticos”, , 2014.
- [9] C. MORAES, “AS 7 PRINCÍPIAIS TÉCNICAS DE MPPT”, , 2020, URL: <https://eletronicadepotencia.com/as-7-principais-tecnicas-de-mppt/>.
- [10] Arduino, “Arduino Uno Rev3 Documentation”, Acessado em 2 de abril de 2024, acessado em 2024, URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>.
- [11] B. Arduino, “Arduino uno”, *Datasheet(Downloaded: 13 Jun 2020) https://datasheet octopart com/A000066-Arduino-datasheet-38879526 pdf*, 2015.
- [12] Filipeflop, “Placa Uno R3 + Cabo USB para Arduino”, , 2019, URL: <https://www.filipeflop.com/produto/placa-uno-r3-cabo-usb-para-arduino/>.
- [13] I. BARBI, *Projetos de fontes chaveadas*, 2ª edição ed., Edição do Autor, Florianópolis, 2008.
- [14] C. L. Ebert, *Projeto de elementos magnéticos planares utilizados em fontes de alimentação chaveadas visando a redução das perdas de energia*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós ... , 2008.
- [15] M. E. R. L. A. M. Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing. Eng. Carlos Henrique Illa Font, *PROJETO FÍSICO DE INDUTORES E TRANSFORMADORES*, 1ª edição ed., Edição dos Autores, Florianópolis, MARÇO/2002.
- [16] R. F. Coelho, *et al.*, “Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos”, , 2008.
- [17] T. F. Guimarães, V. Leite, “Analyses of mppt algorithms in real test conditions”, in *2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, pp. 164–169, IEEE, 2020.

ANEXOS

ANEXO I: Tabela de fios.

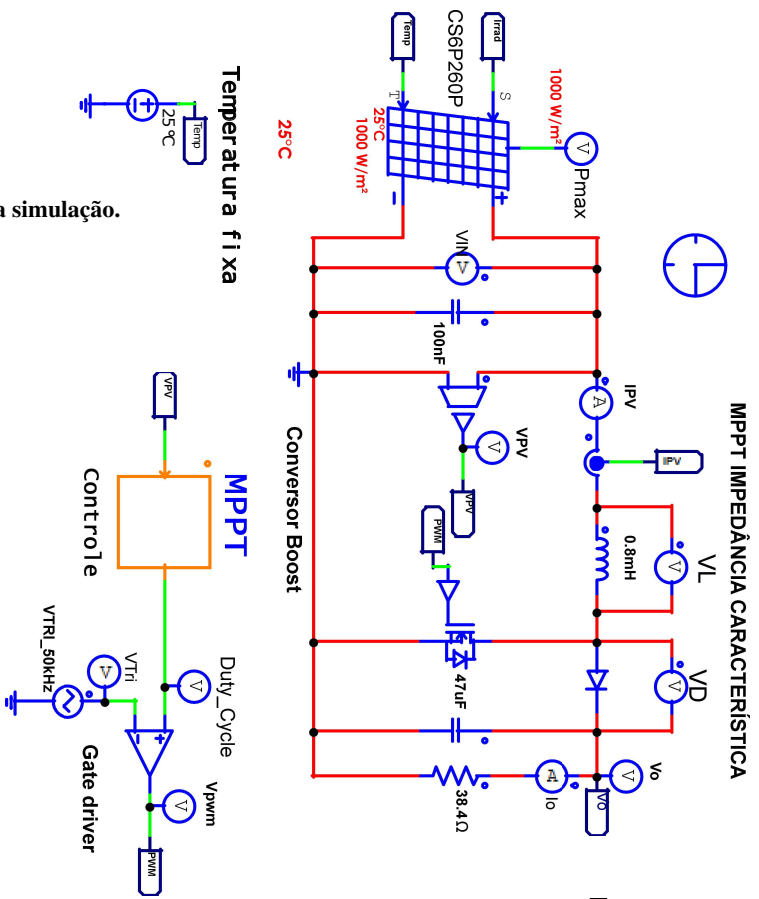
<i>AWG</i>	<i>Diâmetro Cobre [cm]</i>	<i>Área Cobre [cm²]</i>	<i>Diâmetro Isolamento [cm]</i>	<i>Área Isolamento [cm²]</i>	<i>Resistividade 20°C [Ohms/°C]</i>	<i>Resistividade 100°C [Ohms/°C]</i>	<i>Corrente [A] 450A/cm²</i>
10	0,259	0,052620	0,273	0,058572	0,000033	0,000044	23,679
11	0,231	0,041729	0,244	0,046738	0,000041	0,000055	18,778
12	0,205	0,033092	0,218	0,037309	0,000052	0,000070	14,892
13	0,183	0,026243	0,195	0,029793	0,000066	0,000080	11,809
14	0,163	0,020811	0,174	0,023800	0,000083	0,000111	9,365
15	0,145	0,016504	0,156	0,019021	0,000104	0,000140	7,427
16	0,129	0,013088	0,139	0,015207	0,000132	0,000176	5,890
17	0,115	0,010379	0,124	0,012164	0,000166	0,000222	4,671
18	0,102	0,008231	0,111	0,009735	0,000209	0,000280	3,704
19	0,091	0,006527	0,100	0,007794	0,000264	0,000353	2,937
20	0,081	0,005176	0,089	0,006244	0,000333	0,000445	2,329
21	0,072	0,004105	0,080	0,005004	0,000420	0,000561	1,847
22	0,064	0,003255	0,071	0,004013	0,000530	0,000708	1,465
23	0,057	0,002582	0,064	0,003221	0,000668	0,000892	1,162
24	0,051	0,002047	0,057	0,002586	0,000842	0,001125	0,921
25	0,045	0,001624	0,051	0,002078	0,001062	0,001419	0,731
26	0,040	0,001287	0,046	0,001671	0,001339	0,001789	0,579
27	0,036	0,001021	0,041	0,001344	0,001689	0,002256	0,459
28	0,032	0,000810	0,037	0,001083	0,002129	0,002845	0,364
29	0,029	0,000642	0,033	0,000872	0,002685	0,003587	0,289
30	0,025	0,000509	0,030	0,000704	0,003386	0,004523	0,229
31	0,023	0,000404	0,027	0,000568	0,004269	0,005704	0,182
32	0,020	0,000320	0,024	0,000459	0,005384	0,007192	0,144
33	0,018	0,000254	0,022	0,000371	0,006789	0,009070	0,114
34	0,016	0,000201	0,020	0,000300	0,008560	0,011437	0,091
35	0,014	0,000160	0,018	0,000243	0,010795	0,014422	0,072
36	0,013	0,000127	0,016	0,000197	0,013612	0,018186	0,057
37	0,011	0,000100	0,014	0,000160	0,017165	0,022932	0,045
38	0,010	0,000080	0,013	0,000130	0,021644	0,028917	0,036
39	0,009	0,000063	0,012	0,000106	0,027293	0,036464	0,028
40	0,008	0,000050	0,010	0,000086	0,034417	0,045981	0,023
41	0,007	0,000040	0,009	0,000070	0,043399	0,057982	0,018

ANEXOS

ANEXO II: Tabela de núcleos.

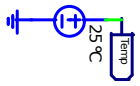
<i>Núcleo</i>	<i>A_e[cm²]</i>	<i>A_w[cm²]</i>	<i>I_e[cm]</i>	<i>I_t[cm]</i>	<i>V_e[cm³]</i>	<i>A_eA_w[cm⁴]</i>
E-20	0,312	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	11,2	11,6	42,50	8,85

APÊNDICES

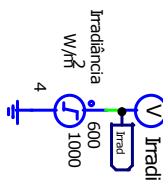


MPPT IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA

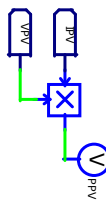
Temperatura fixa



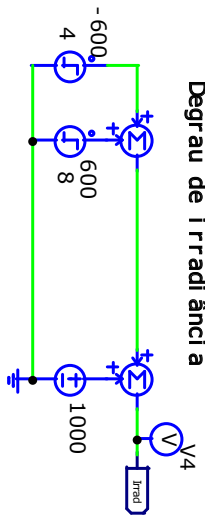
Rampa de irradância



Potência do painel FV



Degrau de irradância



APÊNDICE I: Esquemático da simulação.

APÊNDICES

APÊNDICE II: Código PSIM.

```
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <math.h>

// Variáveis globais
int tempo = 0;

double VA = 0.0; // Tensão atual
double ZA = 0.0; // Impedância atual
double VAprev = 0.0; // Tensão no instante anterior
double ZAprev = 0.0; // Impedância no instante anterior
double DeltaVA = 0.0; // Variação de tensão atual
double DeltaZA = 0.0; // Variação de impedância atual
double DeltaP = 0.0; // Variação de potência
double DeltaV1 = 0.0; // Variável para correção de sentido 1
double DeltaV2 = 0.0; // Variável para correção de sentido 2
double DeltaVAprev = 0.0; // Variação de tensão no instante anterior

double Dprev = 0; // Valor anterior de D
double Rout = 38.4; // Resistência da carga

double D = 0; // Duty cycle atual
double step = 0.01; // Valor do passo fixo de 1%
double Dmax = 0.7; // Duty cycle máximo
double Dmin = 0.2; // Duty cycle mínimo
double variacao = 0; // Relação DeltaP/DeltaV

void SimulationStep(
    double t, double delt, double *in, double *out,
    int *pnError, char *szErrorMsg,
    void **reserved_UserData, int reserved_ThreadIndex, void
*reserved_AppPtr)
{
    tempo++;

    if (tempo > 10000) {
        tempo = 0;

        // Lê o valor de VA da entrada
        VA = in[0];
        DeltaVA = VA - VAprev; // Cálculo da variação de VA

        // Calcula ZA baseado no valor anterior de D
        ZA = Rout * pow(1 - Dprev, 2);
        DeltaZA = ZA - ZAprev; // Cálculo da variação de ZA

        // Calcula DeltaP
        DeltaP = (2 * VA / ZA) * DeltaVA - ((VA * VA) / (ZA * ZA)) *
DeltaZA;
```

```

// Calcula DeltaP/DeltaVA
variacao = DeltaP / DeltaVA;

if (variacao > 0) {
    // Correção Parte 1: Valor absoluto
    DeltaV1 = DeltaVA;
    DeltaV2 = (DeltaV1 < 0) ? -DeltaV1 : DeltaV1;

    // Correção Parte 2: Step diferenciado
    if (DeltaVA < 0) {
        if (DeltaV2 > 2 * DeltaVAprev) {
            D = Dprev - (2 * step);
        }
    } else {
        // Sentido original
        D = Dprev - step;
    }

    // Correção Parte 3: Correção do sentido
    if (DeltaVA > 0) {
        if (DeltaV2 > 2 * DeltaVAprev) {
            D = Dprev + step;
        }
    }
}

if (variacao < 0) {
    D = Dprev + step;
}

// Limites da razão cíclica
if (D > Dmax) {
    D = Dmax;
} else if (D < Dmin) {
    D = Dmin;
}

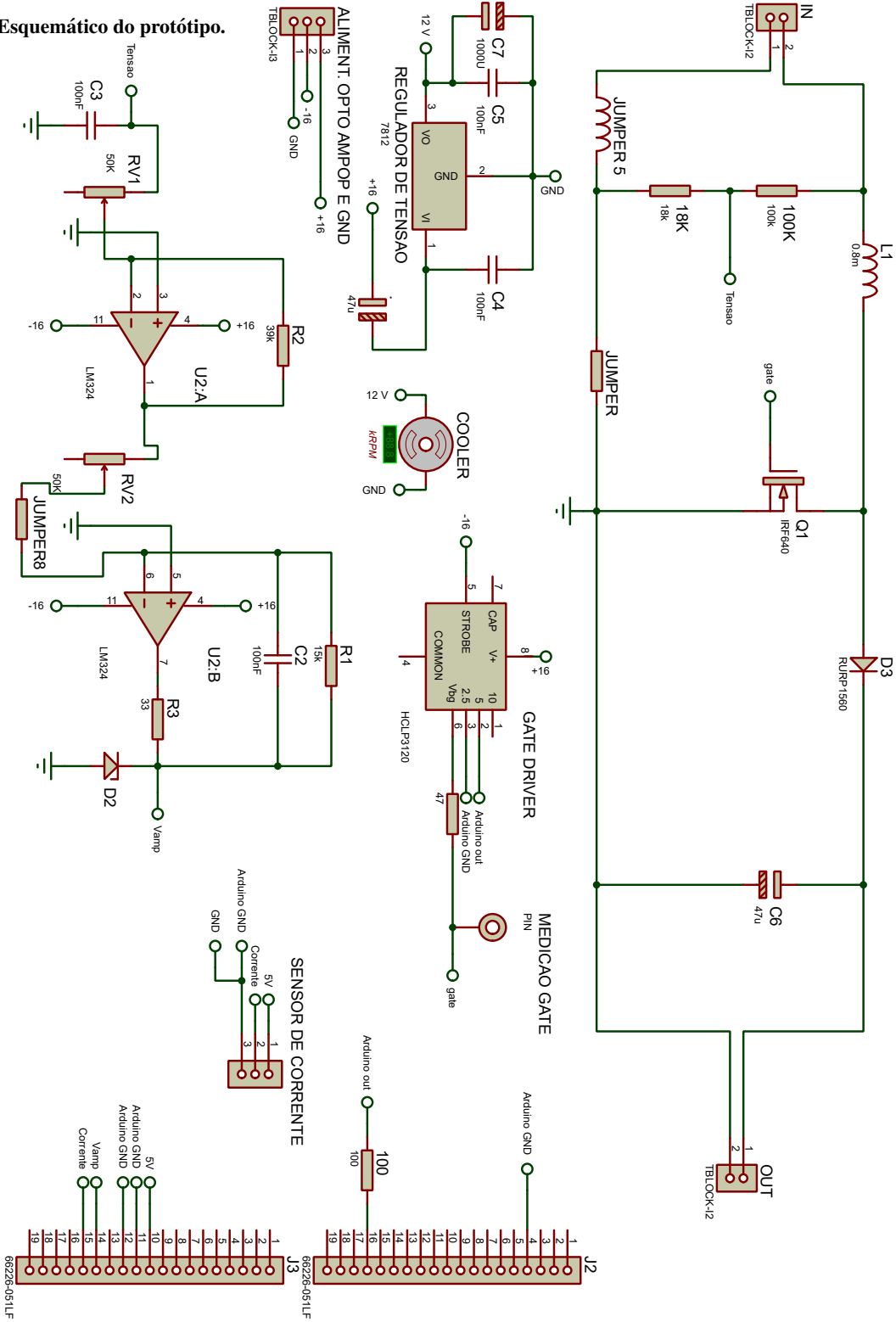
// Atualiza a saída com o valor atual de D
out[0] = D;

// Atualiza as variáveis para o próximo ciclo
VAprev = VA;
ZAprév = ZA;
Dprev = D;
}
}

```

APÊNDICES

APÊNDICE III: Esquemático do protótipo.



APÊNDICES

APÊNDICE IV: Código MPPT.

```

//*****DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS*****
const float step = 1; // Step de incremento do duty cycle
const float DkMIN = 7; // Valor mínimo do duty
const float DkMAX = 27; // Valor máximo do duty

float V_atual = 0; // Tensão atual filtrada
float V_anterior = 0; // Tensão anterior filtrada
float DeltaV = 0; // Variação de tensão

float D_atual = 7; // Duty cycle atual
float D_anterior = 7; // Duty cycle anterior
float DeltaP = 0; // Variação de potência
float DeltaZ = 0; // Variação de impedância
float Z_atual = 0; // Impedância atual
float Z_anterior = 0; // Impedância anterior

float R_OUT = 38.5; // Resistência de saída
float variacao = 0; // Taxa de variação de potência

const int FILTER_SIZE = 4; // Tamanho do filtro de média móvel
float voltageBuffer[FILTER_SIZE] = {0}; // Buffer para o filtro
int voltageIndex = 0; // Índice do filtro
float filteredVoltage = 0; // Tensão filtrada

const long duration = 20000; // Tempo total para ir de 0,2 a 0,7
const float DutyMIN = 7; // Valor do duty para 20%
const float DutyMAX = 27; // Valor do duty para 70%

//*****Configurações*****
void setup() {
    pinMode(3, OUTPUT); // Define o pino 3 como saída PWM
    TCCR2A = bit(COM2A1) | bit(COM2B1) | bit(WGM21) | bit(WGM20); //
    Configura Timer 2
    TCCR2B = bit(WGM22) | bit(00000001); // Configura prescaler
    OCR2A = 39; // Frequência: 50 kHz
    pinMode(A2, INPUT);
    Serial.begin(9600); // Inicializa o monitor serial
}

void loop() {
    //***** Algoritmo Inicial de Varredura de Duty Cycle
    *****
    int steps = (DutyMAX - DutyMIN) / step;
    int intervalo = duration / steps; // Calcula o intervalo para cada
    incremento no duty cycle

    for (float duty = DutyMIN; duty <= DutyMAX; duty += step) {
        OCR2B = duty; // Define o valor do duty cycle
        delay(intervalo);
    }
}

```

```

}

// Após a varredura de 20 segundos, desativa o PWM no pino 3
TCCR2A &= ~(_BV(COM2A1)); // Desativa o PWM no pino 3

//***** Algoritmo Principal *****
while (true) {
    //***** Leitura e Filtro *****
    int RAW_Voltage = analogRead(A2); // Leitura analógica
    voltageBuffer[voltageIndex] = (RAW_Voltage * 5 / 1023.0); //
Converte tensão
    voltageIndex = (voltageIndex + 1) % FILTER_SIZE; // Atualiza
índice do filtro

    // Calcula a média dos últimos valores
    filteredVoltage = 0;
    for (int i = 0; i < FILTER_SIZE; i++) {
        filteredVoltage += voltageBuffer[i];
    }
    filteredVoltage /= FILTER_SIZE;

    // Atualiza tensões
    V_anterior = V_atual;
    V_atual = filteredVoltage;
    DeltaV = V_atual - V_anterior;

    //***** Cálculos com Proteção Contra Divisão por Zero
*****
    Z_anterior = Z_atual;
    Z_atual = R_OUT * pow(1 - D_anterior, 2);

    if (Z_anterior != 0) {
        DeltaZ = Z_atual - Z_anterior;
    } else {
        DeltaZ = 0; // Evita erro caso Z_anterior seja zero
    }

    if (Z_atual != 0) {
        DeltaP = (2 * V_atual / Z_atual) * DeltaV -
        (pow(V_atual, 2) / pow(Z_atual, 2)) * DeltaZ;
    } else {
        DeltaP = 0; // Evita divisão por zero em Z_atual
    }

    if (DeltaV != 0) {
        variacao = DeltaP / DeltaV;
    } else {
        variacao = 0; // Evita divisão por zero em DeltaV
    }
}

```

```

// Ajuste do duty cycle
D_anterior = D_atual;
if (variacao > 0) {
    if (DeltaV < 0) {
        D_atual = D_anterior - step;
    } else {
        D_atual = D_anterior + step;
    }
} else {
    D_atual = D_anterior + step;
}

// Limites do duty cycle
if (D_atual > DkMAX) {
    D_atual = DkMAX;
} else if (D_atual < DkMIN) {
    D_atual = DkMIN;
}

//***** PWM e Monitoramento *****
OCR2B = D_atual; // Ajusta o PWM
Serial.print("Duty Cycle: ");
Serial.println(D_atual);
Serial.print("Tensão Atual: ");
Serial.println(V_atual);
Serial.print("Variação de Potência: ");
Serial.println(variacao);

delay(500); // Pausa para leitura no monitor serial
}
}

```