

Desenvolvimento de um Carregador Solar de Bateria Orientado à Eficiência Energética

José Tiago Torres de Lima¹, Mickaelly Freitas Nobre¹, Felipe Feitosa Teixeira¹

¹Campus Quixadá – Universidade Federal do Ceará (UFC)
Av. José de Freitas Queiroz, 5002 – Cedro Novo – CEP: 63.902-580 – Quixadá-Ceará

{tiagotorres,mickaelly01nobre,felipeflw11}@alu.ufc.br

Abstract. *This article addresses the integration of electromagnetic concepts with embedded systems in the development of a controlled solar charger, focusing on technological innovation and the optimization of renewable energy use. The research investigates how electromagnetic phenomena can be applied to improve efficiency in solar energy conversion, while embedded systems are implemented to intelligently manage the charging process. This controlled system aims to automatically adapt to environmental variables, such as the intensity of solar radiation and energy demand, ensuring optimized and safe operation. The methodology involves theoretical analysis of the concepts, followed by the creation of a prototype and the execution of practical tests to validate the functionality and efficiency of the solar charger. The results include not only improvements in charging performance but also significant insights for the development of sustainable technologies.*

Resumo. *Este artigo aborda a integração de conceitos eletromagnéticos com sistemas embarcados no desenvolvimento de um carregador solar controlado, focando na inovação tecnológica e na otimização do uso de energias renováveis. A pesquisa investiga como os fenômenos eletromagnéticos podem ser aplicados para melhorar a eficiência na conversão de energia solar, enquanto sistemas embarcados são implementados para gerir de forma inteligente o processo de carregamento. Este sistema controlado visa adaptar-se automaticamente às variáveis ambientais, como a intensidade da radiação solar e a demanda energética, garantindo um funcionamento otimizado e seguro. A metodologia envolve a análise teórica dos conceitos, seguida pela criação de um protótipo e pela realização de testes práticos para validar a funcionalidade e a eficiência do carregador solar. Os resultados incluem não apenas melhorias no desempenho de carregamento, mas também insights significativos para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.*

1. Introdução

Com a Revolução Industrial de 1875 o homem desenvolveu a máquina a vapor e multiplicou ainda mais suas capacidades na indústria e no transporte. A população cresceu e, junto, o consumo de energia.[Goldemberg and Lucon 2007] Nesse sentido, a transição para uma era industrial representou um ponto de inflexão na utilização de fontes energéticas, caracterizada veementemente por uma crescente dependência de formas de energia não-renováveis para sustentar o rápido avanço tecnológico e a expansão econômica. Não obstante, tal dependência das fontes não-renováveis configurou um paradigma onde a segurança energética tornou-se um aspecto central da política econômica global, exigindo uma constante adaptação das estratégias de exploração e gestão dos recursos disponíveis. Paralelamente, [Freitas and Dathein 2013] sobreleva que desde os anos 1970, por ocasião da Conferência das Nações Unidas sobre Meio

Ambiente Humano, que os vários países do mundo dedicam-se ao debate sobre a questão ambiental, o que estendeu-se, ao longo do século XXI, por ocorrência de duas outras Conferências, a COP15 e, mais recentemente, a denominada Rio+20. Neste ínterim, organismos ligados à temática ambiental e ao desenvolvimento das nações se posicionaram de forma a criar mecanismos e propor ações de mitigação aos impactos ambientais.

Nesse contexto, dentre esses mecanismos, encontram-se as fontes de energias renováveis, que podem ser definidas como recursos naturais disponíveis em abundância e que se renovam constantemente na natureza, embora não possam ser considerados inesgotáveis, sendo utilizados pelo homem para a geração de diferentes tipos de energia e combustíveis.¹ Atrelado a neste cerne, estima-se que a energia que o Sol (considerado a maior fonte energética da Terra) irradia para o nosso planeta seja cerca de 175,000 terawatts, o que equivale a quatro vezes mais do que a energia que o Homem utiliza, mesmo tendo em conta a utilização intensiva que é feita hoje em dia.[Rocha 2015] Diante desse potencial, o desenvolvimento de tecnologias que aproveitem essa fonte de energia de maneira eficiente e sustentável tornou-se um dos pilares para a transição energética contemporânea. É dentro desse panorama que o desenvolvimento de um carregador solar de bateria, orientado à eficiência energética, surge como uma proposta relevante para enfrentar os desafios atuais. A necessidade de otimizar a utilização da energia solar, com o máximo aproveitamento dos recursos disponíveis, exige um avanço tecnológico que alie sustentabilidade e inovação. Ao longo deste artigo, serão discutidas as soluções técnicas e conceituais que embasam o projeto de um carregador solar eficiente, analisando o papel de componentes como reguladores de tensão, conversores de corrente e sensores de monitoramento.

Portanto, serão abordadas as estratégias destinadas a mitigar perdas energéticas e maximizar o armazenamento de energia em baterias, garantindo uma gestão mais eficaz da energia gerada. A busca por essas soluções visa não apenas contribuir para a independência energética e redução dos custos, mas também alinhar-se aos objetivos globais de preservação ambiental. Assim, ao longo do texto, exploraremos como a aplicação de princípios de eletrônica embarcada e controle de sistemas pode oferecer respostas viáveis para os desafios enfrentados no campo das energias renováveis, apontando para a viabilidade e a importância de inovações como o carregador solar eficiente no contexto da transição energética.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Células Fotovoltaicas

A função de uma célula solar consiste em converter diretamente a energia solar em eletricidade [Izidoro et al. 2010]. Os semicondutores mais comuns são os formados por elementos do grupo IV da tabela periódica como o silício (Si) [Marques et al. 2009], permitindo a formação de ligações covalentes. Para melhorar a condução elétrica, dopantes são adicionados ao semicondutor: átomos do grupo V, como fósforo e arsênio, introduzem elétrons extras, criando o tipo N de semicondutor, enquanto dopantes do grupo III, como o índio, criam lacunas na banda de valência, formando o tipo P de semicondutor.

Quando os semicondutores tipo N e tipo P se combinam, forma-se uma junção N-P, que estabelece um campo elétrico. Quando essa junção é exposta à luz, os fótons são absorvidos e fazem com que elétrons se movam da banda de valência para a banda de condução. Esses elétrons, atraídos pelo campo elétrico, são então direcionados para fora da célula, gerando eletricidade.

¹<https://www.portalsolar.com.br/energia-renovavel/>; Acesso: 09/09/2024

Para entender esses fenômenos fotovoltaicos, é crucial compreender a interação da luz com a matéria, que é de natureza quântica, e aplicar um modelo físico dos materiais semicondutores. Na descrição semi-clássica de um dispositivo fotovoltaico são ainda necessárias as equações de Maxwell do eletromagnetismo. Os materiais utilizados na conversão fotovoltaica são tipicamente semicondutores, cuja estrutura de bandas de energia é obtida mediante a aplicação das leis da mecânica quântica. [Lima et al. 2020]

2.1.1. Fótons e a Interação da Luz com a Matéria

De acordo com a teoria clássica, a luz é vista como uma onda eletromagnética, descrita pelas equações de Maxwell. Entretanto, não é possível compreender inteiramente a interação da luz com a matéria através dessa descrição ondulatória, sendo necessário introduzir o conceito de fóton, que representa o quantum de energia da radiação eletromagnética, evidenciando dessa forma o aspecto corpuscular da luz. A energia de um fóton está associada diretamente à frequência da radiação eletromagnética através da relação de Planck . [Sakurai 1994, Eisberg and Resnick 1979]

$$E_f = \hbar\omega \quad (1)$$

No qual $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ representa a constante reduzida de Planck, e ω indica a frequência angular da luz expressa em rad/s no sistema SI. Além disso, o fóton possui um vetor de momento linear, \mathbf{p} , [Zettili 2009] que é calculado pela seguinte fórmula:

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}, \quad (2)$$

sendo que o vetor de onda \mathbf{k} é medido em radianos por metro (rad/m) e está relacionado ao comprimento de onda λ pela expressão $|\mathbf{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$, onde c é a velocidade da luz. A interação da luz com a matéria acontece quando pequenas partículas de luz, chamadas fótons, colidem com as partículas de um material. Durante essa colisão, a luz pode ser absorvida pelo material, transferindo sua energia para ele; emitida, quando o material libera energia na forma de luz; ou espalhada, mudando sua direção. Para entender melhor essa interação, usamos o conceito de vetor de onda, que descreve a direção de propagação e o comprimento de onda da luz [Jackson 1998]. Além disso, o fóton possui uma característica chamada spin, que pode ser vista como um "giro", mas que não influencia diretamente no que estamos discutindo aqui. Independentemente de como a luz interage com a matéria, certas quantidades como energia, momento, e carga elétrica devem ser conservadas, ou seja, o total dessas quantidades permanece o mesmo antes e depois da interação. Nesse contexto, em materiais semicondutores, elétrons podem ser promovidos da banda de valência para a banda de condução pela absorção de fótons. Esse processo aumenta a condutividade do material, pois os elétrons podem se mover livremente na banda de condução, enquanto os buracos deixados na banda de valência atuam como cargas positivas. Para que dispositivos fotovoltaicos sejam eficientes, os materiais precisam ser sensíveis ao espectro visível e infravermelho da luz solar. Semicondutores com gap de energia entre 0,5 e 2 eV, como o silício, germânio e arseneto de gálio, são ideais para a conversão de luz em eletricidade.

2.1.2. Modelo de Jaynes-Cummings da interação da luz com a matéria

Uma forma simplificada de analisar a interação entre radiação e matéria é por meio de um modelo de dois níveis de energia. Nesse contexto, o elétron, inicialmente no estado de menor energia, localizado na banda de valência, pode ser promovido à banda de condução, o estado de maior energia, ao absorver radiação com frequência ω [Ashcroft and Mermin 1976]. Essa transição ocorre quando a energia do fóton incidente corresponde exatamente à diferença de energia entre os dois níveis ($\hbar\omega$), gerando um buraco na banda de valência. Para simplificação, a polarização da radiação não é considerada, embora seja um fator relevante em análises mais detalhadas. Este "toy model" preserva os conceitos fundamentais, facilitando a compreensão dos processos envolvidos na interação. Tal cenário simplificado é análogo ao problema do spin 1/2 na presença de um campo magnético variante no tempo, podendo ser modelado através da utilização das matrizes de Pauli [Eisberg and Resnick 1979]. No formalismo da segunda quantização para o campo eletromagnético, o hamiltoniano do sistema toma a forma mais elementar possível do modelo de Jaynes-Cummings e é dado abaixo [Jaynes and Cummings 1963, Cummings 2013]

$$\hat{H} = \frac{\epsilon_0}{2}\sigma_z + \hbar\omega\hat{a}^\dagger\hat{a} + \gamma\sigma^+\hat{a} + \gamma^*\sigma^-\hat{a}^\dagger \quad (3)$$

A constante de acoplamento entre os fótons e o sistema de dois níveis é representada por γ . O operador \hat{a} descreve a aniquilação bosônica de um fóton, enquanto \hat{a}^\dagger se refere ao operador de criação bosônica de fótons. O operador σ^+ é dado por $(\sigma_x + i\sigma_y)/2$ e σ^- por $(\sigma_x - i\sigma_y)/2$, onde σ_x , σ_y , e σ_z são as matrizes de Pauli.

$$\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \sigma^+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Obedecendo à seguinte relação algébrica:

$$[\sigma^+, \sigma^-] = \sigma_z, \quad (5)$$

$$[\sigma_z, \sigma^+] = 2\sigma_z, \quad (6)$$

$$[\sigma_z, \sigma^-] = -2\sigma_z, \quad (7)$$

Considerando o comutador definido como $[A, B] = AB - BA$, atuando em um sistema de dois níveis de pseudo-spin, onde $|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ e $|\downarrow\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, esses estados estão associados a energias $\epsilon_0/2$ e $-\epsilon_0/2$, que são autovalores da matriz σ_z , com autovalores +1 e -1, respectivamente. Pode-se observar que $|\downarrow\rangle$ é o estado fundamental, enquanto $|\uparrow\rangle$ é o estado excitado do sistema. Os operadores bosônicos \hat{a} e \hat{a}^\dagger se combinam para formar o operador de número de fótons $\hat{n} = \hat{a}^\dagger\hat{a}$, que satisfaz a seguinte relação algébrica:

$$[\hat{a}^\dagger, \hat{a}^\dagger] = [\hat{a}, \hat{a}] = 0, \quad [\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1. \quad (8)$$

No espaço de número de fótons, o estado físico contendo n fótons é indicado por $|n\rangle$ e é um autoestado do operador \hat{n} , de modo que:

$$\hat{n}|n\rangle = n|n\rangle, \quad (9)$$

$$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle, \quad (10)$$

$$\hat{a}^\dagger|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle \quad (11)$$

Dado que $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ é um número inteiro, há um estado chamado estado de vácuo da radiação, que ocorre quando $n = 0$. Esse estado é completamente anulado pelo operador \hat{a} , ou seja, $\hat{a}|0\rangle = 0$.

Recapitulando sobre Hamiltoniano descrito (3) considera um sistema quântico de dois níveis, onde os dois primeiros termos representam os estados energéticos possíveis do sistema, correspondendo às energias $\pm \frac{\epsilon_0}{2}$ [Cohen-Tannoudji et al. 1992]. O segundo termo, $\hbar\omega\hat{n}$, refere-se ao número de fótons presentes no sistema. Esse sistema é capaz de interagir com a radiação eletromagnética (fótons), e os termos subsequentes são responsáveis por modelar essa interação.

A interação entre o sistema e os fótons pode ser entendida por meio dos operadores de criação e aniquilação de fótons. O operador de aniquilação de fótons \hat{a} age sobre um estado $|\downarrow, n\rangle$, promovendo o sistema ao estado excitado $|\uparrow, n-1\rangle$, com a absorção de um fóton. Esse processo ocorre apenas quando há fótons disponíveis, ou seja, para $n > 0$. Quando o sistema está em seu estado excitado $|\uparrow, n\rangle$, o operador de aniquilação de fótons não produz mudanças adicionais se não houver fótons para absorver, resultando em um operador nulo nesse caso [Cohen-Tannoudji et al. 1992].

Por outro lado, o operador de criação de fótons \hat{a}^\dagger , que é o hermitiano conjugado de \hat{a} , descreve a emissão de fótons. Quando aplicado ao estado excitado $|\uparrow, n\rangle$, ele induz a emissão de um fóton, fazendo com que o sistema decaia para o estado fundamental $|\downarrow, n+1\rangle$. Isso descreve o processo de emissão de radiação, com um fator de proporcionalidade \sqrt{n} , que indica que a absorção ou emissão de fótons depende diretamente do número de fótons presentes no sistema.

Além disso, o sistema pode emitir fótons espontaneamente, mesmo quando $n = 0$, o que é conhecido como emissão espontânea. Esse fenômeno, inicialmente proposto por Einstein em 1917 [Einstein 1917], ocorre na ausência de radiação externa e é responsável pela emissão de fótons de forma natural. Em contraste, quando há fótons no sistema, o operador \hat{a}^\dagger age com um fator $\sqrt{n+1}$, que permite a emissão de fótons adicionais em resposta à presença de radiação. Esse processo é denominado emissão estimulada e resulta no aumento da probabilidade de emissão com o número de fótons presentes. A emissão estimulada é um princípio fundamental no funcionamento de dispositivos como o laser, onde os fótons emitidos são coerentes com a radiação existente, resultando em uma radiação intensa e altamente coerente.

A dinâmica por trás de fenômenos como a emissão espontânea e estimulada pode ser compreendida através da equação:

$$i\hbar \frac{d\hat{O}}{dt} = [\hat{O}, \hat{H}] \quad (12)$$

uma expressão fundamental da mecânica quântica que descreve a evolução temporal de um operador \hat{O} , associado a um observável do sistema, no formalismo de Heisenberg. Nessa

formulação, \hbar é a constante de Planck reduzida, e \hat{H} representa o Hamiltoniano do sistema, que contém todas as informações sobre as energias cinética, potencial e de interação. No caso da emissão de fótons, o operador \hat{O} pode ser o operador de número de fótons ou o operador de criação \hat{a}^\dagger , e o comutador $[\hat{O}, \hat{H}]$ descreve como observáveis, como a posição ou o momento dos elétrons, são afetados pela interação com a luz. Isso captura a dinâmica essencial que governa processos de absorção, emissão e dispersão da luz em sistemas materiais, refletindo a base quântica da interação entre luz e matéria em situações de emissão espontânea e estimulada [Loudon 2000, Einstein 1917]

2.2. Conversor Buck

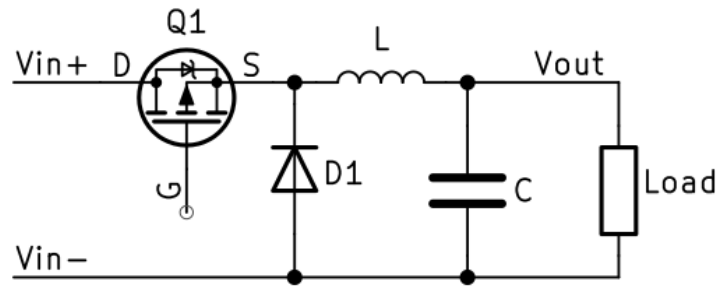


Figura 1. Esquemático do Circuito do Conversor Buck

O chaveamento eletrônico no conversor buck, que é mostrado na Figura 1, é regido pelo sinal de Modulação por Largura de Pulso (PWM), que permite ao transistor, tipicamente um MOSFET, alternar entre os estados de condução e corte em alta frequência. Durante o período de condução, a tensão de entrada (V_{in}) é aplicada diretamente ao indutor, promovendo um aumento progressivo da corrente através deste componente. Quando o transistor se desliga, o caminho da corrente proveniente da fonte de alimentação é interrompido. No entanto, o indutor, devido à sua propriedade de inércia eletromagnética, continua a fornecer corrente à carga, liberando a energia previamente armazenada em seu campo magnético. Esse ciclo rápido de chaveamento gera variações dinâmicas na corrente, que, conforme postulado pelas Leis de Faraday e Lenz, resultam em alterações no campo magnético circundante do indutor, influenciando diretamente a força eletromotriz (fem) gerada e a oposição às mudanças de corrente, de acordo com os princípios do eletromagnetismo. [Erickson and Maksimovic 2001]

Nesse circuito, os princípios do eletromagnetismo desempenham um papel fundamental no comportamento do indutor e do capacitor, os dois principais componentes responsáveis pelo armazenamento e transferência de energia. Conforme descrito pela Lei de Faraday da indução eletromagnética, uma variação no fluxo magnético induz uma força eletromotriz (fem) no circuito. Essa relação é expressa pela equação:

$$E = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

onde E representa a fem induzida, N é o número de espiras do indutor, e Φ_B é o fluxo magnético. No conversor buck, durante o período em que o transistor está em condução, o aumento da corrente através do indutor gera um aumento no fluxo magnético. Esse crescimento no fluxo magnético induz uma fem que, conforme descrito pela Lei de Lenz, se opõe à variação da corrente. Quando o transistor se desliga, o fluxo magnético no indutor diminui, e a energia

acumulada no campo magnético é liberada para a carga, mantendo o fluxo de corrente e estabilizando a operação do circuito. Esses princípios são detalhadamente explorados [Griffiths 1999], onde a Lei de Faraday é discutida com base teórica rigorosa e aplicações práticas no contexto de circuitos elétricos.

A Lei de Lenz, que complementa a de Faraday, determina que a direção da fem induzida será tal que se oporá à variação que a gerou. Essa relação é descrita pela equação:

$$E = -L \frac{dI}{dt} \quad (14)$$

onde E é a fem induzida, L é a indutância, e $\frac{dI}{dt}$ representa a taxa de variação da corrente no indutor. Durante a condução do transistor, o indutor armazena energia na forma de campo magnético, resistindo a variações abruptas de corrente. Quando o transistor desliga, o campo magnético colapsa, liberando a energia armazenada para a carga. Esse comportamento do indutor, controlado pela indutância, é essencial para suavizar o ripple de corrente e garantir uma transição estável entre os estados de chaveamento. conforme descrito por [Erickson and Maksimovic 2001]

Indutor e capacitor funcionam como filtros complementares, baseados nos princípios do eletromagnetismo. O indutor, por meio do controle do campo magnético, suaviza as variações de corrente, enquanto o capacitor estabiliza a tensão de saída ao gerir o campo elétrico. Juntos, esses componentes formam um circuito ressonante LC, cuja frequência de ressonância é dada por: [Erickson and Maksimovic 2001]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (15)$$

Essa frequência de ressonância otimiza a filtragem de ruídos e oscilações, melhorando a eficiência do sistema e reduzindo interferências eletromagnéticas.

Além disso, a relação entre indutor e capacitor influencia o desempenho do conversor nos diferentes modos de condução. No Modo Contínuo (CCM), a corrente no indutor nunca cai a zero, resultando em uma operação mais estável, com menor variação no campo magnético. No Modo Descontínuo (DCM), onde a corrente no indutor pode chegar a zero, o ripple de tensão tende a ser maior, pois o campo magnético colapsa completamente, exigindo uma maior capacidade de estabilização do capacitor. Esses conceitos são apresentados [Erickson and Maksimovic 2001].

A Figura 2 e 3 mostram formas de onda do conversor buck na fronteira entre os modos de condução contínua e descontínua: (Figura 2) corrente no indutor $i_L(t)$, (Figura 3) corrente no diodo $i_D(t)$.

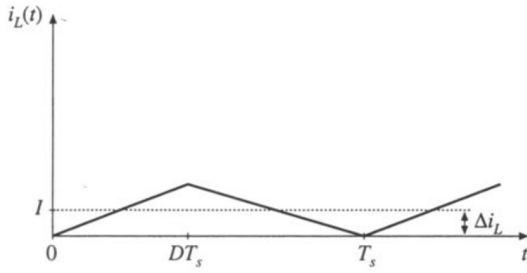


Figura 2. Corrente no indutor
 $i_L(t)$

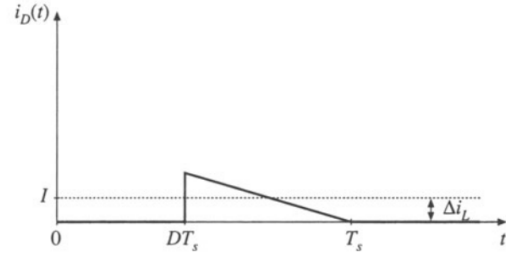


Figura 3. Corrente no diodo $i_D(t)$

sendo Δi_L magnitude da ondulação, que pode ser entendida como o valor máximo dessa variação durante um ciclo de comutação, ou seja, a diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo da corrente no indutor. Dessa forma, a relação entre indutância e capacitância, fundamentada nos princípios do eletromagnetismo, é crucial para suavizar as flutuações de corrente e tensão no conversor buck, garantindo um fornecimento de energia contínuo e eficiente.

2.3. Arduino

O emprego do microcontrolador Arduino é crucial no contexto do desenvolvimento de um sistema de carregador solar de bateria orientado à eficiência energética. Este dispositivo é responsável pelo gerenciamento avançado do estado de carga da bateria e pela aquisição de dados essenciais como percentual de carga, tensão e corrente, funções estas que são vitais para a manutenção da integridade da bateria e para a otimização do processo de carregamento. [Kung et al. 2018]

O Arduino é programado para executar várias funções críticas dentro do sistema: monitora continuamente o estado da bateria para prevenir condições de sobrecarga ou descarga profunda e ajusta o fluxo de energia para a bateria empregando componentes como reguladores de tensão e conversores buck. Estas operações são fundamentais para assegurar que o carregamento seja realizado de forma eficiente e eficaz.

No âmbito do software, o Arduino é configurado para integrar a interface com os sensores e para implementar algoritmos de carregamento que se ajustam dinamicamente às variações nas condições do ambiente e do estado da bateria. A utilização de nanotecnologia no desenvolvimento de componentes do Arduino contribui significativamente para essa adaptabilidade e precisão. Materiais em escala nanométrica são empregados na fabricação de circuitos e sensores, o que permite a miniaturização dos dispositivos e a melhoria da eficiência energética e da sensibilidade dos sensores. Essa integração de nanotecnologia facilita a comunicação mais eficaz e o processamento de dados em tempo real, elevando a funcionalidade do sistema a um nível superior de controle e gestão [Mushtaq and Pearce 2018]. Adicionalmente, o microcontrolador pode ser programado para comunicar-se com dispositivos externos, possibilitando o monitoramento e ajustes em tempo real.

2.4. Tipos de Cargas de Bateria

No contexto de sistemas de carregamento de baterias, é fundamental compreender os métodos de carga utilizados para otimizar a eficiência e prolongar a vida útil das baterias. Existem principalmente dois tipos de carga de bateria que são amplamente utilizados em aplicações tecnológicas: carga de bateria com tensão constante e carga de bateria com corrente constante [Qu et al. 2015]. Cada método possui características específicas que o tornam adequado para diferentes cenários e tipos de bateria.

2.4.1. Carga de Bateria com Tensão Constante

A carga com tensão constante é uma técnica onde a tensão aplicada à bateria é mantida fixa durante todo o processo de carga. À medida que a bateria é carregada, a corrente de carga diminui gradualmente à medida que a bateria atinge seu potencial de tensão [Lee and Park 2013]. Esse método é comum em baterias de íon de lítio e chumbo-ácido, pois ajuda a maximizar a capacidade da bateria e evitar o sobrecarregamento, que pode ser prejudicial.

Esse sistema previne a sobrecarga da bateria, protegendo-a contra possíveis danos, além de Maximizar a vida útil da bateria ao garantir que ela seja carregada até sua capacidade máxima sem ultrapassar a tensão de segurança. A grande desvantagem é que inicialmente, quando a bateria está descarregada, a corrente de carga pode ser alta, o que exige um sistema de controle cuidadoso para evitar danos. A fase final de carga pode ser mais lenta, à medida que a corrente diminui para manter a tensão constante.

2.4.2. Carga da Bateria com Corrente Constante

O método de carga com corrente constante envolve a aplicação de uma corrente fixa à bateria até que a tensão da bateria atinja um valor predeterminado. Este método é particularmente eficaz durante a fase inicial de carregamento, quando a bateria está mais descarregada, permitindo uma recarga rápida e eficiente. Esse método é vantajoso pois apresenta um carregamento inicial rápido, o que é ideal para baterias profundamente descarregadas, além de facilitar o controle do processo de carregamento. A grande desvantagem desse método é que pode levar uma sobretensão se não for adequadamente controlado após atingir o limite de tensão da bateria [Chen and Lai 2012].

No desenvolvimento de sistemas de carregamento de baterias, é crucial entender os métodos empregados para otimizar a eficiência e prolongar a vida útil das baterias [Serhan and Ahmed 2018]. Existem dois métodos principais: carga de bateria com tensão constante e carga de bateria com corrente constante. A carga com tensão constante mantém a tensão aplicada à bateria fixa, permitindo que a corrente de carga diminua gradualmente à medida que a bateria atinge seu potencial de tensão, prevenindo a sobrecarga e maximizando a vida útil da bateria. No entanto, pode inicialmente induzir altas correntes quando a bateria está descarregada e tornar a fase final do carregamento mais lenta. Por outro lado, o carregamento com corrente constante aplica uma corrente fixa até que a tensão da bateria atinja um valor específico, oferecendo um carregamento inicial rápido, ideal para baterias profundamente descarregadas, e facilitando o controle preciso do processo de carregamento.

Nos carregadores solares desenvolvidos neste projeto, optou-se predominantemente pelo método de carregamento com corrente constante (CC) devido à sua eficácia em carregar rapidamente as baterias durante as fases iniciais. Este método não apenas maximiza a entrada de energia solar mas também permite um controle eficiente para evitar riscos de sobretensão, garantindo uma operação segura e eficiente do sistema. O carregamento CC é estrategicamente utilizado para elevar a tensão da bateria de maneira rápida e segura, com sistemas de monitoramento ajustando a corrente após atingir o ponto crítico de tensão para evitar danos à bateria [Chen and Lai 2012], demonstrando uma abordagem prática e adaptada às necessidades energéticas do projeto.

3. Desenvolvimento do Circuito

Neste tópico, será abordado os aspectos de estruturação do circuito, seguindo uma modelagem pré-existente². Nesse sentido, para a estruturação do circuito, teve-se a fomentação do circuito baseado na escolha do painel fotovoltaico, como pode ser visto na Tabela 1.

Característica	Especificação
Marca	MJ
Tensão de operação	12V
Potência nominal	3W
Corrente de saída	250mA
Comprimento x Largura	145 mm x 145 mm
Peso	120 g

Tabela 1. Especificações Técnicas do Painel Solar

3.1. Implantação do Circuito de Comutação

A construção de um carregador solar de bateria eficiente requer um circuito de controle que seja capaz de gerenciar o fluxo de energia entre o painel solar e a bateria. Esse circuito é frequentemente baseado em componentes como MOSFETs de canal P, que atuam como chaves eletrônicas, e transistores NPN, que ajudam a controlar a ativação e desativação do MOSFET. O presente circuito, Figura 4, que utiliza um MOSFET IRF9540N e um transistor NPN 2N2222, é ideal para controlar o fluxo de corrente de forma precisa.

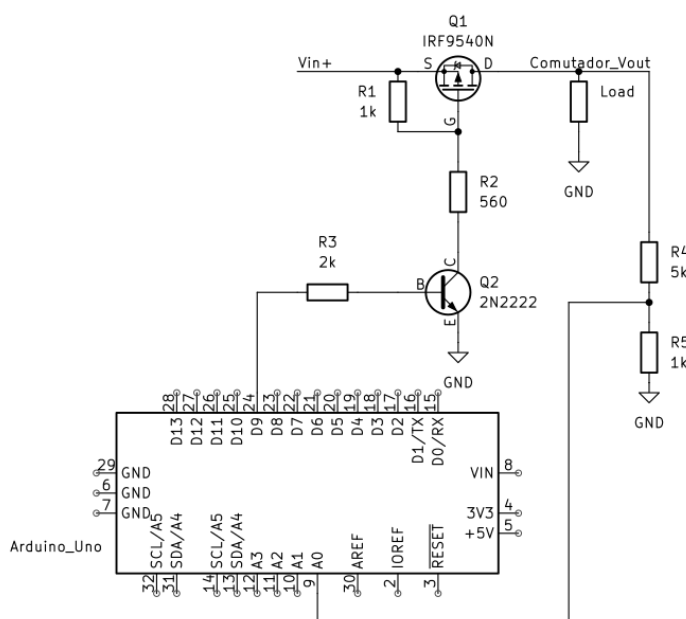


Figura 4. Esquemático do Circuito de Comutação

O *duty cycle* (ciclo de trabalho) desempenha um papel crucial nesse contexto. O *duty cycle* é definido como a relação entre o tempo em que o circuito está ativo (ON) e o tempo em que está inativo (OFF) [Gray 2019]. Isso é expresso como uma porcentagem do tempo em que o circuito está ligado. Por exemplo, um *duty cycle* de 50% implica que o circuito estará ativado por metade do tempo, controlando a energia entregue à bateria.

²<https://www.portalsolar.com.br/energia-renovavel/>; Acesso: 09/09/2024

A corrente de carga I pode ser calculada usando a fórmula básica da potência:

$$P = V \cdot I \quad (16)$$

Onde P é a potência (em watts), V é a tensão (em volts) e I é a corrente (em amperes). Considerando um painel solar com tensão de saída de 12V e uma potência de 3W, a corrente de carga I é calculada como:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3W}{12V} = 0,25A = 250mA \quad (17)$$

Se o circuito operar com um duty cycle de 50%, a corrente média $I_{\text{média}}$ entregue à bateria será metade da corrente total:

$$I_{\text{média}} = 250mA \times 0,5 = 125mA \quad (18)$$

Essa abordagem é útil para evitar sobrecarga, especialmente quando a bateria está perto de atingir sua capacidade máxima. O duty cycle é ajustado dinamicamente para garantir que a corrente seja limitada conforme necessário, prolongando a vida útil da bateria [Jain 2020].

A seguir, apresentamos a tabela de componentes do circuito, adaptada para o carregador solar:

Componente	Descrição/Especificação
Q1	MOSFET Canal P, IRF9540N, controla o fluxo de corrente
Q2	Transistor NPN, 2N2222, controla a ativação do MOSFET
R1	Resistor, 1k, limita a corrente de gate do MOSFET
R2	Resistor, 560, limita a corrente do coletor do transistor
R3	Resistor, 2k, protege o microcontrolador e controla a base do transistor
R4	Resistor, 5k, parte do divisor de tensão
R5	Resistor, 1k, parte do divisor de tensão
Microcontrolador	Arduino ou controlador dedicado, gerencia o duty cycle

Tabela 2. Componentes do Circuito Comutador para Carregador Solar

Esse circuito, ao utilizar resistores para limitar a corrente e componentes semicondutores para controlar o fluxo de energia, oferece uma solução eficaz para a construção de um carregador solar. O controle dinâmico do duty cycle é essencial para otimizar a eficiência do processo de carga, protegendo a bateria contra danos e garantindo que o carregamento seja feito de maneira segura e sustentável [Raju 2018].

3.2. Implementação do Conversor Buck

O conversor buck reduz a tensão dos painéis solares para níveis adequados ao carregamento da bateria. A capacitância de 100 μF estabiliza a tensão, e a indutância de 330 μH controla a corrente, garantindo eficiência e segurança no processo de carregamento.

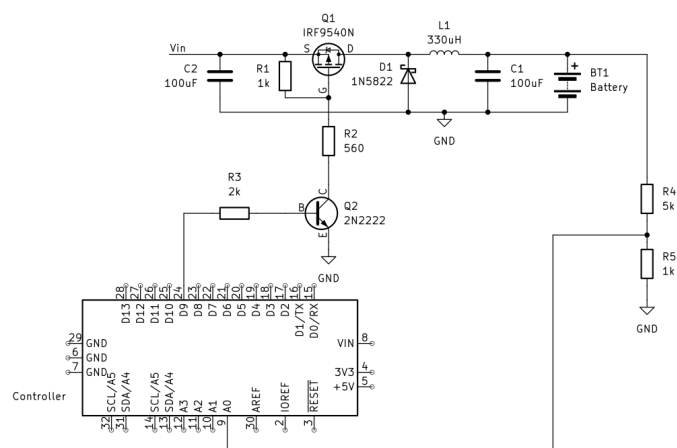


Figura 5. Esquemático do Circuito com o Conversor Buck

A operação do conversor buck em proximidade à sua frequência de ressonância, calculada em 876 Hz, promove um regime de oscilação natural que maximiza a eficiência energética e a estabilidade do sistema. Nesse ponto, a impedância do circuito é significativamente reduzida, otimizando a transferência de energia e minimizando perdas, o que é essencial para a robustez de conversores em aplicações de carregamento. [Mohan et al. 2003]

Dentre as principais vantagens obtidas, destacam-se a eficiência energética aprimorada, decorrente da diminuição das perdas por dissipação, e a melhoria na filtragem das oscilações de tensão e corrente, assegurando um processo de conversão suave e preciso. Além disso, operar nessa frequência reduz a interferência eletromagnética (EMI), mitigando o ruído gerado durante as transições de comutação. A redução do estresse elétrico sobre os componentes é outro fator relevante, contribuindo para a longevidade e confiabilidade do sistema, conforme explicado no [Erickson and Maksimovic 2001].

Abaixo é mostrado a tabela dos componentes do circuito buck:

Componente	Descrição/Especificação
D1	Díodo Schottky, 1N5822, garante o fluxo contínuo de corrente
L1	Indutor, 330uF, armazena energia e estabiliza a corrente
C1	Capacitor, 100uF, estabiliza a tensão de saída
BT1	Bateria, 5V, armazena a energia convertida
C2	Capacitor, 100uF, filtro contra ruído vindos do painel solar

Tabela 3. Componentes do Conversor Buck/Filtro de entrada para Carregador Solar

4. Metodologia

5. Análise dos Resultados de Tensão com Controle de Duty Cycle

Nesta seção, aborda-se a metodologia adotada para a construção e avaliação do carregador solar, como ilustrado na Figura 5. O objetivo central deste estudo foi investigar o comportamento do sistema de carregamento solar em duas condições distintas: com uma fonte ideal e com um painel solar integrado. A imagem à esquerda da Figura 5 representa a montagem do circuito para análise em laboratório utilizando uma fonte ideal, enquanto a imagem à direita exibe a montagem com o painel solar real. Vale destacar que, em ambos os testes, foi utilizado um conversor buck integrado, responsável pela modulação da tensão de saída.

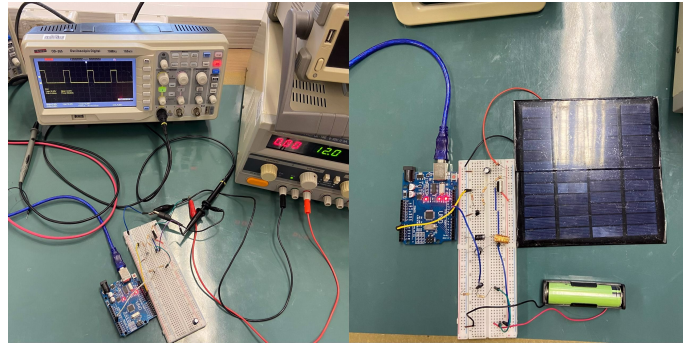


Figura 6. Representação do Circuito Montado com a Fonte Ideal e com o Painél Solar

Primeiramente, faz-se necessário sobrelevar os testes realizados com a fonte de alimentação ideal sem o buck, que representam a abordagem teórica e controlada para analisar o comportamento do sistema em condições ideais, onde utilizou-se um arduino para gerenciar o algoritmo que realiza o processo de duty cycle. Posteriormente, na seção de resultados, apresenta-se a análise prática com o painel fotovoltaico e o buck implementado, que considera as condições reais de operação e variabilidade da intensidade luminosa ao longo do dia que foram feitas com base em medir a intensidade luminosa com um sensor LDR e medir a tensão de saída com um multímetro.

5.1. Teste com Duty Cycle de 25%

Neste experimento, o ciclo de trabalho foi ajustado para 25%, o que significa que a fonte ideal permaneceu ativa por um quarto do tempo total do ciclo. O objetivo deste teste foi simular uma baixa transferência de energia, como pode ser visto na Figura 7.

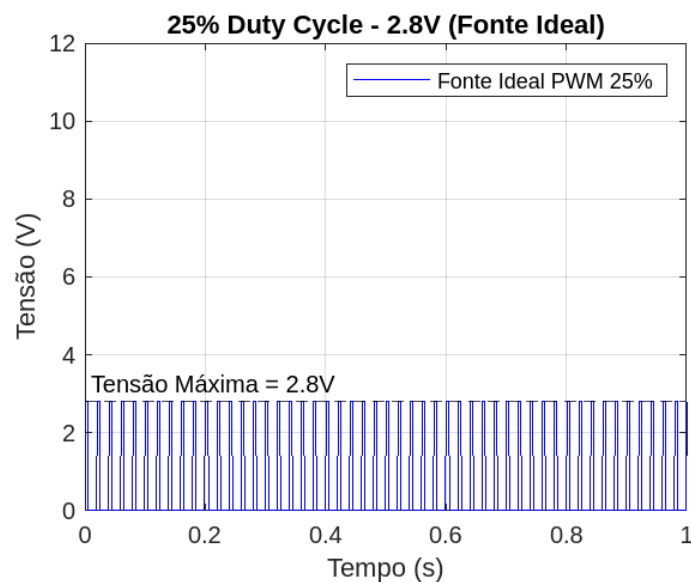


Figura 7. Saída gráfica do Duty Cycle de 25%

A configuração de 25% permitiu observar como o circuito responde a condições de saída com menor fornecimento de energia e a eficiência do sistema em converter essa energia limitada para o carregamento da bateria. A configuração do sinal PWM foi ajustada para manter 25% do tempo ativo, com a expectativa de que a transferência de energia fosse limitada, simulando momentos de menor irradiação solar, como os observados no início e fim do

dia. Durante o teste, observou-se o comportamento do circuito, em especial a estabilidade e a tensão fornecida ao sistema.

5.2. Teste com Duty Cycle de 50%

Para o duty cycle de 50%, a fonte ideal ficou ativa por metade do ciclo total, fornecendo uma quantidade moderada à saída de energia ao sistema. Este teste foi projetado para avaliar o desempenho do circuito sob condições intermediárias, como visto na Figura 8.

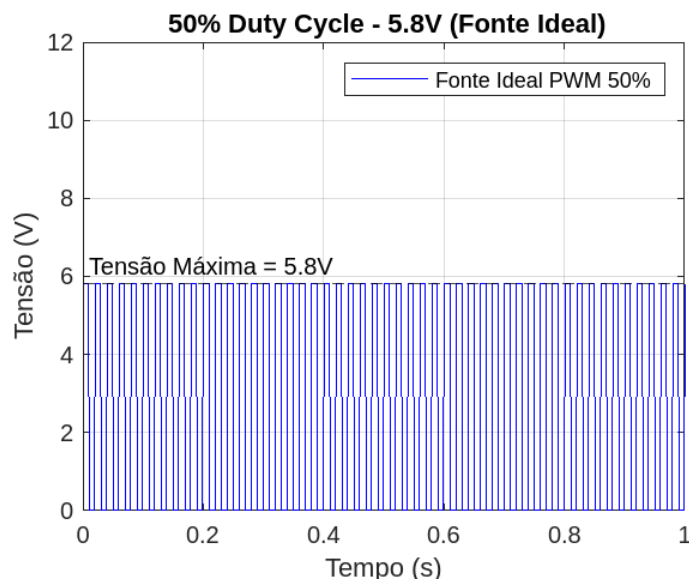


Figura 8. Saída gráfica do Duty Cycle de 50%

Com o sinal PWM ajustado para 50% de tempo ativo, a expectativa era observar uma transferência de energia moderada, mesmo com o poder de potência máxima de 12V. O foco estava em avaliar o equilíbrio entre a eficiência do carregador e a eficiência com que uma bateria pode receber energia, observando se o sistema conseguia otimizar a entrega de energia sem desperdiçar capacidade.

5.3. Teste com Duty Cycle de 75%

No teste com *duty cycle* de 75%, a fonte ideal forneceu energia ao sistema por 75% do tempo do ciclo total. Este cenário foi projetado para simular condições de alta intensidade de transmissão de tensão. O objetivo do teste era avaliar a eficiência do carregador solar sob condições favoráveis, verificando se o sistema poderia operar de maneira otimizada, sem sobrecarregar o circuito ou comprometer sua estabilidade.

O sinal de modulação PWM foi ajustado para 75% de tempo ativo, permitindo uma maior transferência de energia para o sistema. Com isso, esperava-se que o carregador aproveitasse ao máximo o tempo de ciclo ativo. Essa configuração é especialmente importante em momentos de alta irradiância solar, onde a eficiência do carregamento pode ser maximizada. Neste contexto, a alta porcentagem de *duty cycle* reflete um ambiente ideal para a operação do sistema, permitindo que ele extraia mais energia do painel solar e a converta eficientemente para o processo de carregamento.

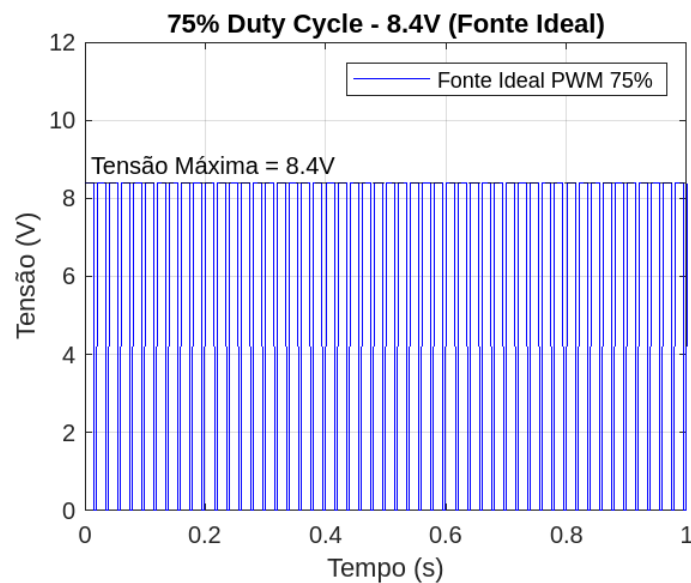


Figura 9. Saída gráfica do Duty Cycle de 75%

Durante o teste, foi observado, como ilustrado na Figura 9, que o sistema operou de maneira estável, mesmo com o aumento da transferência de energia. A escolha do *duty cycle* de 75% foi crucial para otimizar narrativas de carregamento sem causar sobrecarga no circuito, o que poderia resultar em instabilidade ou falha no funcionamento. A aplicação de um ciclo ativo mais prolongado aumenta significativamente a quantidade de energia transferida para a bateria, especialmente em horários de pico solar, o que contribui para uma redução no tempo necessário para completar o carregamento.

Outro ponto importante deste teste foi avaliar como o sistema lidaria com as condições de alta irradiância sem comprometer a segurança e a integridade dos componentes. Embora a energia disponível fosse maximizada, o circuito do carregador, incluindo o conversor *buck*, demonstrou capacidade de regular eficientemente a tensão de saída, mantendo os parâmetros dentro dos limites operacionais. Essa regulação é fundamental para evitar picos de tensão que poderiam prejudicar a vida útil da bateria ou causar danos ao sistema de carregamento.

Além disso, o teste com *duty cycle* de 75% também permitiu avaliar a resposta do sistema em termos de dissipação de calor, já que a transferência de energia em maior quantidade tende a aumentar o aquecimento dos componentes. No entanto, os resultados indicaram que o circuito foi capaz de gerenciar o calor gerado sem comprometer a eficiência do carregamento ou apresentar riscos de sobreaquecimento. Esse comportamento é especialmente relevante para carregadores solares em ambientes com alta exposição solar, como o estado do Ceará, onde o estudo foi conduzido, dado que a alta intensidade de luz solar pode influenciar diretamente na operação térmica do sistema.

Portanto, o teste com *duty cycle* de 75% comprovou a capacidade do carregador solar de operar eficientemente em condições de alta irradiância, aproveitando a maior parte da energia disponível sem comprometer a estabilidade do sistema. Os resultados obtidos reforçam a importância de se ajustar o *duty cycle* conforme a quantidade de irradiância solar disponível, permitindo a maximização da energia transferida ao longo do dia e, ao mesmo tempo, garantindo a segurança e a integridade do circuito e da bateria.

6. Resultados

Os resultados obtidos a partir do carregador solar com controle de *duty cycle* de 50% indicam o comportamento eficaz do sistema na modulação da tensão de saída. A partir dos valores de irradiância solar coletados em diferentes horários do dia com base nos dados de um sensor LDR e um multímetro, foi possível observar que, apesar da tensão nominal do painel ser de 12V, o sistema atingiu valores máximos de até 14.3V durante as horas de maior incidência solar, por volta do meio-dia. No final da tarde, por volta das 16h, a tensão foi registrada em 13.6V, mantendo a eficiência em condições de alta irradiância.

Ao aplicar um *duty cycle* de 50%, a tensão de saída foi reduzida pela metade, com uma leve defasagem, devido a possíveis ruídos no circuito físico. Apesar disso, Este comportamento foi consistente com a simulação em fonte ideal apresentado na sessão de metodologia, onde, por exemplo, uma tensão de 12V resultou em uma saída de 5.77V. Isso demonstra a capacidade do sistema em controlar a tensão de forma eficiente com o painel solar integrado, garantindo que o processo de carregamento da bateria seja regulado conforme as necessidades de sua tensão de carregamento.

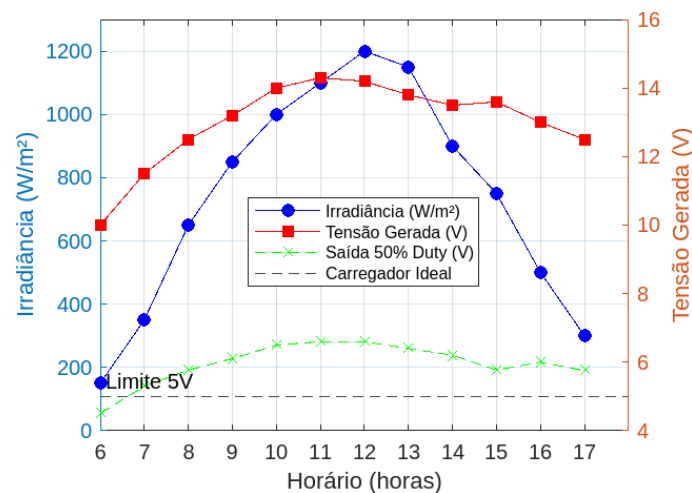


Figura 10. Resultados do Circuito com o Painel Solar Integrado em Diferentes Horários

Esses resultados são cruciais para o desenvolvimento de carregadores solares controlados, uma vez que a modulação da tensão por PWM permite adaptar a energia fornecida ao estado de carga da bateria, otimizando o processo de carregamento e evitando sobrecarga ou desperdício de energia. A implementação de um controle preciso do *duty cycle* em carregadores solares contribui para a longevidade e eficiência do sistema, mesmo em condições de elevada exposição solar, como observado no estado do Ceará, onde o estudo foi realizado.

7. Conclusão

O presente estudo apresentou o desenvolvimento e a análise de um carregador solar com controle de *duty cycle*, projetado para otimizar o processo de carregamento de baterias em condições de variação de irradiância solar. Através de experimentos conduzidos tanto com uma fonte ideal quanto com um painel solar real, verificou-se que o sistema é capaz de regular eficientemente a tensão de saída, garantindo um processo de carregamento seguro e eficiente.

Os testes realizados demonstraram que a modulação por PWM permite ajustar o *duty cycle* conforme a disponibilidade de energia solar, maximizando a quantidade de energia transferida ao sistema sem comprometer a estabilidade ou a integridade dos componentes. Além

disso, o estudo demonstrou que o carregador pode operar de forma confiável em regiões de alta incidência solar, como o estado do Ceará, onde as condições de irradiância são variáveis e intensas ao longo do dia.

Em suma, a regulação eficiente da tensão, a gestão térmica adequada e a capacidade de evitar sobrecargas destacam o potencial do sistema para ser utilizado em aplicações práticas, garantindo uma vida útil prolongada para as baterias e um uso eficiente da energia solar disponível.

8. QR Code de Acesso ao Repositório de Dados



Referências

- Ashcroft, N. W. and Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Chen, B.-Y. and Lai, Y.-S. (2012). New digital-controlled technique for battery charger with constant current and voltage control without current feedback. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(3):1545–1553.
- Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., and Laloë, F. (1992). *Quantum Mechanics (Volume 1 and 2)*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Cummings, F. W. (2013). Journal of physics b. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 46:220202.
- Einstein, A. (1917). Zur quantentheorie der strahlung (on the quantum theory of radiation). *Physikalische Zeitschrift*.
- Eisberg, R. and Resnick, R. (1979). *Física Quântica*. Elsevier Campus, Rio de Janeiro.
- Erickson, R. W. and Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic Publishers.
- Freitas, G. S. and Dathein, R. (2013). As energias renováveis no brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. *Nexos Econômicos*, 7(1):71–94.
- Goldemberg, J. and Lucon, O. (2007). Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, (72):6–15.
- Gray, P. (2019). Analysis and design of switching power supplies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(8):689–702.
- Griffiths, D. J. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall, 3rd edition.
- Izidoro, E. S., da Silva, H. N. S., and Soares, R. (2010). Painel solar: uma alternativa para a geração de energia. *Bolsista de Valor*, 1:81–84.
- Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons.
- Jain, A. (2020). Renewable energy and power electronics. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5(3):210–225.

- Jaynes, E. T. and Cummings, F. W. (1963). Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam maser. *Proceedings of the IEEE*, 51(1):89–109.
- Kung, C.-C., Luo, S.-X., and Liu, S.-H. (2018). Implementation of the state of charge estimation with adaptive extended kalman filter for lithium-ion batteries by arduino. In *2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, pages 1–6. IEEE.
- Lee, Y.-D. and Park, S.-Y. (2013). Rapid charging strategy in the constant voltage mode for a high power li-ion battery. In *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 4725–4731.
- Lima, A. A., Menezes, N. P., Santos, S., Amorim, B., Thomazi, F., Zanella, F., Heilmann, A., Burkarter, E., and Dartora, C. A. (2020). Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. *Rev. Bras. Ensino Fís.*, 42.
- Loudon, R. (2000). *The Quantum Theory of Light*. Oxford University Press, Oxford, 3rd edition.
- Marques, R. C., Krauter, S. C. W., and de Lima, L. C. (2009). Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. *Rev. Tecnol. Fortaleza*, 30(2):153–162.
- Mohan, N., Undeland, T. M., and Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley, Hoboken, NJ, 3rd edition.
- Mushtaq, U. and Pearce, J. M. (2018). Open source appropriate nanotechnology. In *Nanotechnology and global sustainability*, pages 220–245. CRC Press.
- Qu, X., Han, H., Wong, S.-C., Tse, C. K., and Chen, W. (2015). Hybrid ipt topologies with constant current or constant voltage output for battery charging applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11):6329–6337.
- Raju, P. (2018). *Solar Energy Management Systems: Theory and Practice*. Springer.
- Rocha, M. A. M. (2015). Tecnologias de geração de energia solar.
- Sakurai, J. J. (1994). *Modern Quantum Mechanics*. Addison Wesley, Boston.
- Serhan, H. A. and Ahmed, E. M. (2018). Effect of the different charging techniques on battery life-time: Review. In *2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, pages 421–426.
- Zettili, N. (2009). *Quantum Mechanics: Concepts and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2nd edition.