

Projeto - Conversor para Módulos Solares

Lucas Paiva da Silva (202304668)

7 de dezembro de 2024

1 Introdução

A busca por fontes de energia renováveis tem se intensificado nas últimas décadas, em resposta aos desafios globais relacionados às mudanças climáticas e à necessidade de transição para uma matriz energética mais sustentável. Dentre as alternativas existentes, os sistemas fotovoltaicos têm se destacado devido à sua viabilidade técnica e econômica, além da capacidade de gerar energia limpa a partir da luz solar, um recurso amplamente disponível.

Apesar de suas vantagens, o desempenho de sistemas fotovoltaicos está diretamente relacionado à eficiência com que a energia é extraída dos painéis solares. Para maximizar essa eficiência, é necessário que os painéis operem em seu ponto de máxima potência (MPP – *Maximum Power Point*), que varia em função das condições ambientais, como a intensidade da radiação solar e a temperatura. Para isso, são empregados controladores específicos equipados com algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*). Esses algoritmos ajustam as condições de operação do sistema, otimizando a extração de energia dos painéis solares.

No contexto deste projeto, foi desenvolvido um sistema integrado composto por um conversor DC/DC e um controlador baseado em microcontrolador, com o objetivo principal de explorar o comportamento e a eficiência de conversores em aplicações fotovoltaicas. O sistema foi projetado para adaptar as características elétricas do painel solar às necessidades de diferentes aplicações, priorizando a análise e validação do algoritmo MPPT para garantir a operação no ponto de máxima eficiência. Embora o carregamento de baterias tenha sido considerado no design teórico, o foco principal foi a simulação, testes práticos e validação em ambiente de *Hardware-in-the-Loop*.

A fim de garantir a robustez e a confiabilidade do sistema, o projeto seguiu uma metodologia abrangente que incluiu as seguintes etapas: (i) simulação do comportamento do conversor e do controlador em diferentes condições operacionais, utilizando o software PSIM; (ii) validação do sistema em uma plataforma de *Hardware-in-the-Loop* (HIL), simulando cenários reais com alta precisão; (iii) testes experimentais com painéis solares reais para avaliar o desempenho do sistema em condições reais; (iv) design e fabricação de uma placa de circuito impresso (PCB) para integração e prototipagem; e (v) validação do sistema completo em bancada com baterias.

Este relatório detalha todas as etapas do projeto, desde a concepção inicial até os testes finais, apresentando uma análise aprofundada dos resultados obtidos. O texto está estruturado em seções que abordam os fundamentos teóricos, as simulações realizadas no PSIM, a validação em HIL, os testes experimentais com o painel solar e o conversor DC/DC, além do processo de design da PCB. Ao final, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

O desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos eficientes requer um entendimento detalhado dos princípios fundamentais que regem a operação dos painéis solares, bem como dos dispositivos utilizados para otimizar sua performance, como os conversores DC/DC e algoritmos MPPT. Além disso, fatores

ambientais, como irradiação solar e temperatura, têm impacto direto no desempenho dos módulos solares, tornando essencial o estudo das suas características elétricas e comportamentais.

Esta seção apresenta os conceitos teóricos necessários para compreender o funcionamento do sistema desenvolvido. Na Subseção 2.1, são discutidas as características dos módulos solares e seus parâmetros principais. Subseções posteriores abordarão o funcionamento de conversores DC/DC, algoritmos MPPT e outros aspectos relevantes.

2.1 Módulos Solares

Os módulos solares fotovoltaicos convertem energia luminosa em energia elétrica utilizando o efeito fotovoltaico, que ocorre em materiais semicondutores. O desempenho de um módulo solar é descrito por suas características elétricas, representadas por curvas de corrente-tensão ($I-V$) e potência-tensão ($P-V$). Essas curvas variam de acordo com condições ambientais, como irradiação solar e temperatura.

Parâmetros Elétricos do Módulo Solar

Os principais parâmetros elétricos de um módulo solar incluem:

- **Tensão de circuito aberto (V_{OC}):** É a máxima tensão que o módulo pode fornecer quando não há corrente elétrica fluindo (circuito aberto). Este valor ocorre no ponto onde a curva $I-V$ intercepta o eixo de tensão.
- **Corrente de curto-circuito (I_{SC}):** Representa a máxima corrente disponível do módulo quando os terminais estão conectados diretamente (curto-circuito). Este ponto é dado pela interseção da curva $I-V$ com o eixo de corrente.
- **Ponto de máxima potência (MPP):** É o ponto na curva $I-V$ onde a potência gerada ($P = V \cdot I$) é máxima. A extração de energia nesse ponto é essencial para garantir a máxima eficiência do sistema.

Influência da Irradiância e Temperatura

A **irradiação solar** (medida em W/m^2) representa a quantidade de energia solar incidente por unidade de área e afeta diretamente a corrente fornecida pelo módulo. Aumentos na irradiação resultam em maiores correntes de curto-circuito, enquanto a tensão de circuito aberto sofre alterações menos significativas.

A **temperatura** do módulo também desempenha um papel crítico. Geralmente, temperaturas mais altas reduzem a tensão de circuito aberto (V_{OC}) e, consequentemente, a potência máxima do módulo. Por isso, o desempenho de um painel solar é frequentemente especificado em condições padrão de teste (STC – *Standard Test Conditions*), com irradiação de $1000\text{ W}/m^2$, temperatura do módulo de $25^\circ C$ e massa de ar de 1,5.

Curvas Características

As curvas $I-V$ e $P-V$ ilustram o comportamento do módulo solar sob diferentes condições. A curva $I-V$ mostra a relação entre corrente e tensão, enquanto a curva $P-V$ destaca a potência em função da tensão. Ambas curvas possuem formas distintas que facilitam a identificação do ponto de máxima potência e sua sensibilidade a variações ambientais.

A Figura 1 exemplifica essas curvas para diferentes níveis de irradiação, evidenciando como a potência máxima e os parâmetros do módulo variam conforme as condições externas.

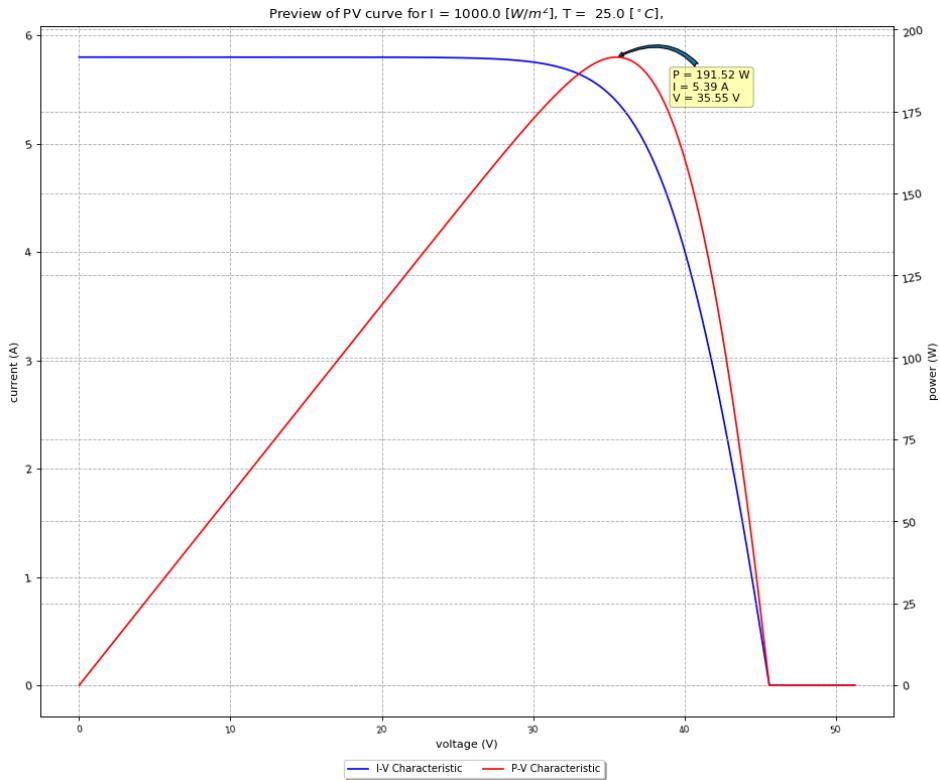


Figura 1: Curvas características de corrente-tensão (I - V) e potência-tensão (P - V) para um módulo solar sob diferentes níveis de irradiância.

Condições Padrão de Teste (STC)

Os parâmetros elétricos dos módulos solares são normalmente especificados pelos fabricantes sob as chamadas condições padrão de teste (*Standard Test Conditions – STC*). Essas condições representam um cenário ideal, definido por:

- Irradiância de 1000 W/m^2 ,
- Temperatura do módulo de 25°C ,
- Massa de ar (*Air Mass – AM*) de 1,5, que corresponde a uma atmosfera típica em locais temperados ao nível do mar.

Nessas condições, são medidos valores como:

- Tensão de circuito aberto (V_{OC}),
- Corrente de curto-círcuito (I_{SC}),
- Potência máxima (P_{MPP}).

Esses parâmetros são amplamente utilizados para comparar diferentes módulos solares. No entanto, como as condições STC raramente ocorrem em ambientes reais, os valores obtidos servem mais como referência do que como uma representação precisa do desempenho prático do módulo.

Condições Normais de Operação (NOCT)

Além das STC, muitos fabricantes também especificam os parâmetros dos módulos sob condições normais de operação da célula (*Nominal Operating Cell Temperature – NOCT*). Estas condições são mais próximas das encontradas em aplicações reais e incluem:

- Irradiância de 800 W/m^2 ,
- Temperatura ambiente de 20°C ,
- Velocidade do vento de 1 m/s .

O NOCT representa a temperatura que a célula solar atinge sob essas condições, quando o módulo não está conectado a uma carga elétrica. Na prática, a temperatura real das células solares costuma ser mais alta do que em STC, o que leva a uma redução na eficiência do módulo, devido à dependência térmica de seus parâmetros elétricos.

As condições STC e NOCT diferem principalmente em sua aplicabilidade:

- **STC**: Representa um cenário ideal para especificações e comparação entre módulos solares.
- **NOCT**: Oferece uma visão mais realista do desempenho do módulo em situações práticas.

2.2 Conversores como Rastreadores MPPT

Os conversores DC/DC desempenham um papel essencial em sistemas fotovoltaicos, adaptando as características elétricas do painel solar às exigências da carga. Além disso, quando utilizados em conjunto com algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), eles ajustam dinamicamente a tensão e a corrente do painel para operar no ponto de máxima eficiência.

Os principais tipos de conversores utilizados como rastreadores MPPT são o **buck**, **boost** e **buck-boost**, cada um com características distintas que os tornam adequados para diferentes aplicações.

Conversor Buck

O conversor buck é utilizado para reduzir a tensão de entrada para um nível inferior na saída, mantendo a mesma polaridade. No contexto de sistemas fotovoltaicos, ele é aplicado quando a tensão no ponto de máxima potência (V_{MPP}) do painel é maior do que a tensão exigida pela carga. A eficiência do conversor buck depende de seu projeto e das condições de operação, como a razão cíclica (*duty cycle*) e as perdas nos componentes.

Conversor Boost

O conversor boost, por outro lado, eleva a tensão de entrada para um nível superior na saída, mantendo também a polaridade. Este tipo de conversor é usado em sistemas fotovoltaicos quando V_{MPP} é menor do que a tensão necessária na carga. Assim como o buck, a eficiência do boost é influenciada pela razão cíclica e pelos componentes utilizados, como indutores e capacitores.

Conversor Buck-Boost

O conversor buck-boost combina as funcionalidades dos conversores buck e boost, sendo capaz de elevar ou reduzir a tensão de entrada conforme necessário. Ele é especialmente útil em sistemas onde V_{MPP} varia amplamente em relação à tensão da carga, como em condições de irradiância variável. Apesar de sua versatilidade, o buck-boost apresenta desafios adicionais no design, como maior complexidade no controle e possíveis perdas extras devido à sua topologia.

Impacto das Cargas no Desempenho

A carga conectada à saída do conversor influencia diretamente seu comportamento e a eficiência do sistema. As configurações mais comuns são:

- **Resistor como carga:** Um resistor simples na saída do conversor é frequentemente utilizado em testes laboratoriais para avaliar o desempenho do sistema. Ele representa uma carga puramente dissipativa e facilita a análise do comportamento estático e dinâmico do conversor.
- **Fonte ou capacitor como carga:** Quando uma fonte ou capacitor é usado na saída, a carga passa a ter características de armazenamento de energia. Essa configuração é comum em sistemas reais, como no carregamento de baterias ou alimentação de barramentos DC. Aqui, o conversor deve ser projetado para lidar com variações na resistência equivalente da carga e com os requisitos de corrente e tensão estáveis.

Operação com Rastreamento MPPT

Ao operar com algoritmos MPPT, o conversor ajusta seu *duty cycle* para garantir que a entrada (o painel solar) esteja no ponto de máxima potência, independentemente das condições de irradiação ou temperatura. Isso requer que o controlador monitore continuamente a tensão e a corrente do painel, calculando o ponto V_{MPP} e I_{MPP} em tempo real. O tipo de conversor utilizado influencia o alcance de V_{MPP} que pode ser rastreado:

- O conversor **buck** limita V_{MPP} a valores maiores que a tensão da carga.
- O conversor **boost** restringe V_{MPP} a valores menores que a tensão da carga.
- O conversor **buck-boost** permite rastrear V_{MPP} acima ou abaixo da tensão da carga, sendo o mais versátil para sistemas com variações amplas.

A escolha do tipo de conversor e da carga depende dos requisitos do sistema, como eficiência, faixa de operação e complexidade do controle.

2.3 Algoritmos de Rastreamento de MPPT

O rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*) é uma técnica essencial para otimizar a eficiência de sistemas fotovoltaicos. O ponto de máxima potência (*MPP*) é o ponto em que o painel solar opera com a maior eficiência, fornecendo a máxima potência possível para uma determinada irradiação e temperatura. Como essas condições variam ao longo do tempo, é necessário que o controlador do sistema ajuste dinamicamente os parâmetros operacionais para rastrear *MPP*.

Diversos algoritmos foram desenvolvidos para realizar esse rastreamento, cada um com vantagens e desvantagens específicas. A seguir, são descritos os algoritmos mais amplamente utilizados.

Rastreamento Baseado em Temperatura

Este método utiliza a relação entre temperatura e os parâmetros elétricos do painel, como tensão de circuito aberto (V_{OC}) e corrente de curto-círcuito (I_{SC}). Sabendo que o *MPP* varia linearmente com a temperatura em condições de irradiação constantes, tabelas ou equações pré-calculadas podem ser usadas para estimar o *MPP*.

Embora simples, este método depende de medições precisas de temperatura e irradiação, sendo mais adequado para sistemas em condições controladas ou estáveis.

Perturba e Observa (*Perturb and Observe* – P&O)

O algoritmo *Perturb and Observe* é um dos mais utilizados devido à sua simplicidade e eficácia em diversas condições. Ele opera perturbando a tensão ou corrente do painel e observando a mudança na potência gerada. Se a potência aumentar, o controlador continua perturbando na mesma direção; caso contrário, a direção da perturbação é invertida.

Apesar de sua simplicidade, o P&O pode apresentar oscilações ao redor do *MPP* em estado estacionário, especialmente em condições de irradiação variável.

Condutância Incremental (*Incremental Conductance* – IC)

O método de Condutância Incremental utiliza a relação entre a condutância incremental ($\Delta I/\Delta V$) e a condutância instantânea (I/V) para identificar o *MPP*. Quando $\Delta I/\Delta V = -I/V$, o sistema está operando no *MPP*.

Este algoritmo oferece maior precisão do que o P&O em condições variáveis de irradiação, porém é mais complexo e exige maior capacidade computacional.

Relação Tensão-Corrente Fixa

Algoritmos de tensão ou corrente fixa utilizam relações pré-calculadas para rastrear *MPP*. Por exemplo, em muitas aplicações, considera-se que V_{MPP} é uma fração fixa de V_{OC} , como $V_{MPP} \approx 0.8V_{OC}$. Este método é rápido e de fácil implementação, mas sua precisão pode ser limitada por variações nas características do painel.

Algoritmos Avançados

Com os avanços tecnológicos, algoritmos mais sofisticados vêm sendo desenvolvidos, como os baseados em inteligência artificial (IA), incluindo redes neurais e lógica fuzzy. Esses métodos oferecem maior precisão e adaptabilidade, mas exigem maior capacidade de processamento, o que pode limitar sua aplicação em sistemas de baixo custo.

Comparação e Escolha do Algoritmo

A escolha do algoritmo de MPPT depende de diversos fatores, como:

- **Complexidade:** Algoritmos simples, como P&O, são fáceis de implementar, enquanto métodos como Condutância Incremental e IA requerem mais recursos.
- **Custo Computacional:** Métodos mais avançados exigem maior capacidade de processamento.
- **Respostas a Variações:** Em condições de irradiação instável, algoritmos como Condutância Incremental se destacam pela precisão.
- **Aplicação Específica:** Sistemas de baixo custo geralmente empregam métodos fixos ou P&O, enquanto instalações maiores podem utilizar algoritmos mais avançados.

2.4 Hardware-in-the-Loop (HIL)

O *Hardware-in-the-Loop* (HIL) é uma técnica que permite validar sistemas de controle em tempo real, simulando o comportamento do sistema físico com alta precisão. Nesse método, o modelo do módulo solar, do conversor DC/DC e da fonte (ou bateria) é executado em um simulador em tempo real, enquanto um controlador físico externo interage diretamente com a simulação.

No contexto deste projeto, o HIL é utilizado para reproduzir condições reais de operação, como variações de irradiação e temperatura, sem a necessidade de um protótipo físico inicial. O controlador externo, quando equipado com o algoritmo de MPPT, ajusta dinamicamente os parâmetros do conversor (como o *duty cycle*) com base nos sinais gerados pelo simulador, que responde em tempo real.

Essa abordagem oferece diversas vantagens, como a possibilidade de testar o sistema de forma segura e eficiente, reproduzindo cenários complexos que seriam difíceis de implementar fisicamente. Além disso, o HIL acelera o desenvolvimento ao permitir ajustes e validações antes da implementação em campo, reduzindo custos e riscos.

3 Simulação no PSIM

A simulação no PSIM foi uma etapa crucial no desenvolvimento do projeto, fornecendo uma base sólida para a validação do algoritmo de rastreamento de máxima potência (MPPT) e o aprofundamento dos conceitos teóricos relacionados ao sistema fotovoltaico. Diferentemente da abordagem utilizada na etapa de *Hardware-in-the-Loop* (HIL), que busca validar o sistema em tempo real com um controlador físico, a simulação no PSIM teve como objetivo principal explorar o comportamento do sistema em um ambiente controlado e de alta fidelidade.

Paralelamente ao desenvolvimento deste projeto, foi cursada a disciplina EEL7204-09202 – *Processamento de Energia Fotovoltaica e Eólica*, onde foi desenvolvida uma simulação completa no PSIM. Essa simulação incluiu o modelo do módulo fotovoltaico, de um conversor boost para alimentar um barramento, e da carga, bem como a implementação de um algoritmo de rastreamento MPPT. No contexto deste projeto, a mesma simulação foi adaptada e utilizada para validar o algoritmo e consolidar os conceitos teóricos abordados.

Esta seção aborda os principais aspectos relacionados à simulação, detalhando como ela foi utilizada para validar o algoritmo MPPT e fornecer uma visão mais clara sobre o comportamento do sistema em diferentes condições operacionais. Além disso, os resultados obtidos nesta etapa serviram como base para o planejamento e a execução das etapas subsequentes, como a validação em HIL e os testes experimentais.

3.1 Descrição do Circuito

O circuito desenvolvido para a simulação no PSIM está ilustrado na Figura 2. À esquerda, encontra-se o modelo do arranjo solar, composto por uma string de 7 módulos fotovoltaicos conectados em série, utilizando o modelo ZTP-340M da ZTROON. Este arranjo foi projetado para fornecer as características elétricas necessárias ao sistema.

Após o arranjo solar, um capacitor de entrada foi adicionado para melhorar a estabilidade do sistema e atuar como desacoplamento, reduzindo variações rápidas na tensão do painel. Em sequência, são realizadas medições da tensão e da corrente do painel, seguidas pelo cálculo da potência gerada, cujos valores são plotados pelo PSIM para análise.

O circuito também inclui um conversor boost síncrono, onde o diodo convencional foi substituído por uma segunda chave, permitindo maior eficiência do sistema. Na saída do conversor, temos uma fonte de 400 V_{DC} , representando um barramento DC. Este barramento poderia ser substituído por um capacitor ou uma bateria, dependendo da aplicação final do sistema.

3.2 Descrição do Controle

O controle do sistema foi implementado utilizando dois filtros passa-baixa de primeira ordem (posicionados em 5 kHz), um para a tensão e outro para a corrente do painel. Esses filtros foram projetados

Tabela 1: Especificações do módulo fotovoltaico ZTP-340M da ZTROON.

Parâmetro	Valor
Potência máxima (P_{MPP})	340 W
Tensão no ponto de máxima potência (V_{MPP})	38,65 V
Corrente no ponto de máxima potência (I_{MPP})	8,8 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	45,2 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	9,27 A
Eficiência do módulo	20,66%
Coeficiente de temperatura de P_{MPP}	-0,4% / °K
Coeficiente de temperatura de V_{OC}	-0,37% / °K
Condições padrão de teste (STC)	1000 W/m ² , 25°C, AM 1,5
Dimensões	1870 x 880 x 30 mm
Peso	16,67 kg

para operar uma década abaixo da frequência de chaveamento (que é de 50 kHz), de modo a atenuar os harmônicos gerados pelo conversor e garantir sinais de entrada mais limpos para o controlador.

Além disso, um retentor de ordem zero foi adicionado ao modelo para simular o comportamento discreto de um microcontrolador. Este retentor representa a taxa de amostragem do sistema (500 Hz), garantindo que a simulação no PSIM reflita as limitações práticas de aquisição de dados em sistemas reais.

O método escolhido para o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) foi o da **condutância incremental**, devido à sua precisão e capacidade de lidar com condições variáveis de irradiação e temperatura. Este método utiliza a relação entre as variações de tensão (ΔV) e corrente (ΔI) do painel solar, bem como a derivada da potência em relação à tensão ($\Delta P/\Delta V$), para determinar a posição relativa ao MPPT. A Figura 3, fornecida pelos professores, ilustra o funcionamento básico do algoritmo.

O algoritmo foi implementado no PSIM utilizando o recurso de bloco C, permitindo maior flexibilidade e controle sobre os ajustes necessários para o sistema. O código da implementação pode ser encontrado em anexo, no arquivo *algoritmoPSIM.c*. A seguir, descreve-se o funcionamento do algoritmo e as adaptações realizadas para otimizar o desempenho.

Funcionamento do Algoritmo

A lógica principal do algoritmo pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Cálculo das variáveis de estado:** A cada passo de simulação, são calculados os valores de potência ($P = V \cdot I$), ΔV , ΔI e ΔP , baseando-se nos valores atuais e nos estados anteriores do sistema.
- Análise da derivada da potência:** A derivada da potência em relação à tensão ($\Delta P/\Delta V$) é utilizada para determinar a posição relativa ao MPPT:
 - $\Delta P/\Delta V = 0$: Indica que o sistema está no MPPT.
 - $\Delta P/\Delta V > 0$: Indica que o sistema está à esquerda do MPPT (necessário aumentar a tensão).
 - $\Delta P/\Delta V < 0$: Indica que o sistema está à direita do MPPT (necessário diminuir a tensão).
- Ajuste do ciclo de trabalho (D):** O ciclo de trabalho é ajustado proporcionalmente à derivada da potência. Passos maiores são aplicados em condições intermediárias para otimizar a resposta, enquanto passos menores são utilizados em regiões críticas para evitar oscilações excessivas.

Trabalho 1 - Lucas Paiva da Silva (20100417)

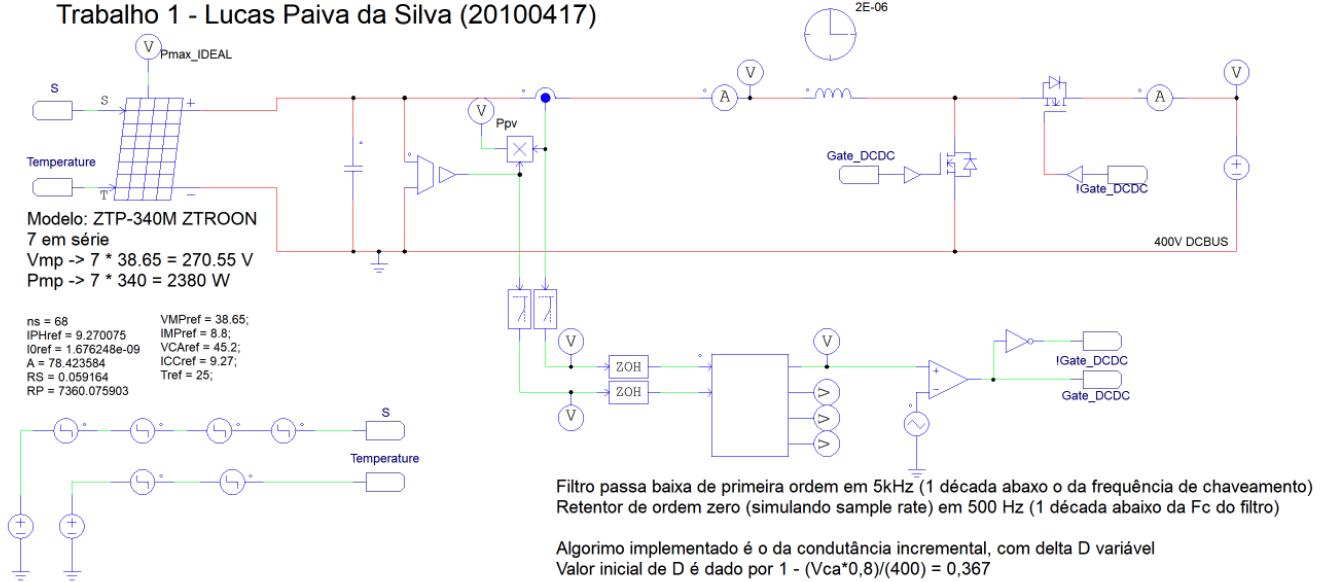


Figura 2: Circuito do PSIM

Fluxograma do método condutância incremental.

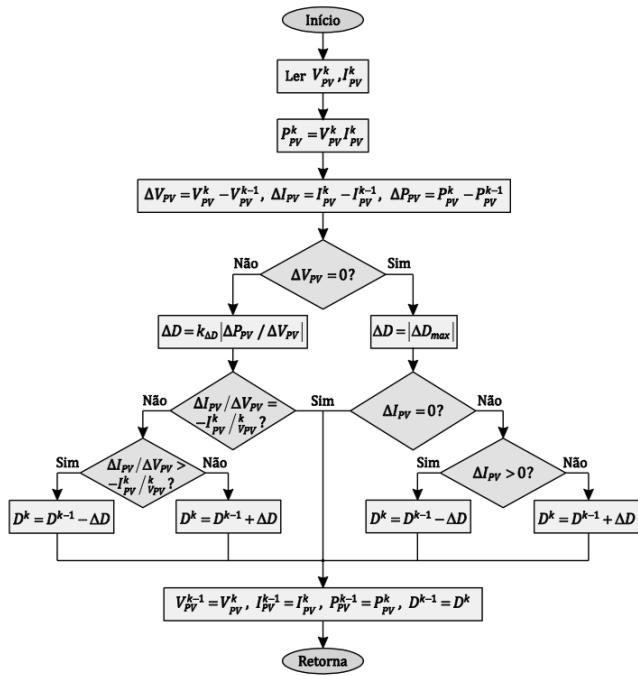


Figura 3: Diagrama do funcionamento do algoritmo de condutância incremental, fornecido pelos professores.

4. **Medições e saídas:** Variáveis adicionais, como o estado do rastreamento e a derivada absoluta da potência, são calculadas e disponibilizadas como saídas do modelo para diagnóstico e monitoramento.

Adaptações Implementadas

Algumas alterações foram realizadas no algoritmo para melhorar seu desempenho e robustez:

- O **ciclo de trabalho inicial** foi definido como $D = 0.367$, com base em uma regra prática de $1 - (V_{ca} * 0,8) / (400)$
- Foi implementado um **ajuste adaptativo** no tamanho dos passos do ciclo de trabalho (ΔD), dependendo da magnitude de $\Delta P / \Delta V$, otimizando a convergência sem comprometer a estabilidade.
- Oscilações pequenas em torno de $\Delta P / \Delta V \approx 0$ foram toleradas, dado que não comprometem a eficiência geral do sistema.

3.3 Resultados da Simulação

A simulação foi realizada por um período total de 1 segundo, utilizando um passo de cálculo de $2 \cdot 10^{-6}$ segundos, garantindo alta precisão nos resultados. Para adicionar dinâmica ao sistema, foram aplicados diversos degraus na irradiância e na temperatura do módulo fotovoltaico ao longo do tempo. Esses degraus simulam variações reais nas condições ambientais, testando a capacidade do algoritmo de rastreamento de máxima potência (MPPT) em situações dinâmicas.

As condições de irradiância variaram conforme descrito a seguir:

- Início: 1000 W/m^2 ,
- $t = 0, 1$: Redução de 300 W/m^2 ,
- $t = 0, 2$: Redução de 300 W/m^2 ,
- $t = 0, 3$: Redução de 350 W/m^2 ,
- $t = 0, 45$: Aumento de 950 W/m^2 .

As variações de temperatura também foram simuladas com os seguintes degraus:

- Início: $25^\circ C$,
- $t = 0, 25$: Aumento de $20^\circ C$,
- $t = 0, 45$: Redução de $20^\circ C$.

Nas figuras apresentadas a seguir, é possível observar a potência teórica máxima calculada para as condições de temperatura e irradiância, bem como a potência efetivamente rastreada pelo sistema. Também é possível ver as duas potências junto ao ciclo de trabalho em uma das transições, mostrando o funcionamento do passo variável (na prática um DSP provavelmente não teria uma resolução tão elevada para o passo utilizado). Essas curvas demonstram a capacidade do algoritmo de condutância incremental em ajustar o ciclo de trabalho do conversor boost para acompanhar o ponto de máxima potência, mesmo diante de condições ambientais em rápida mudança.

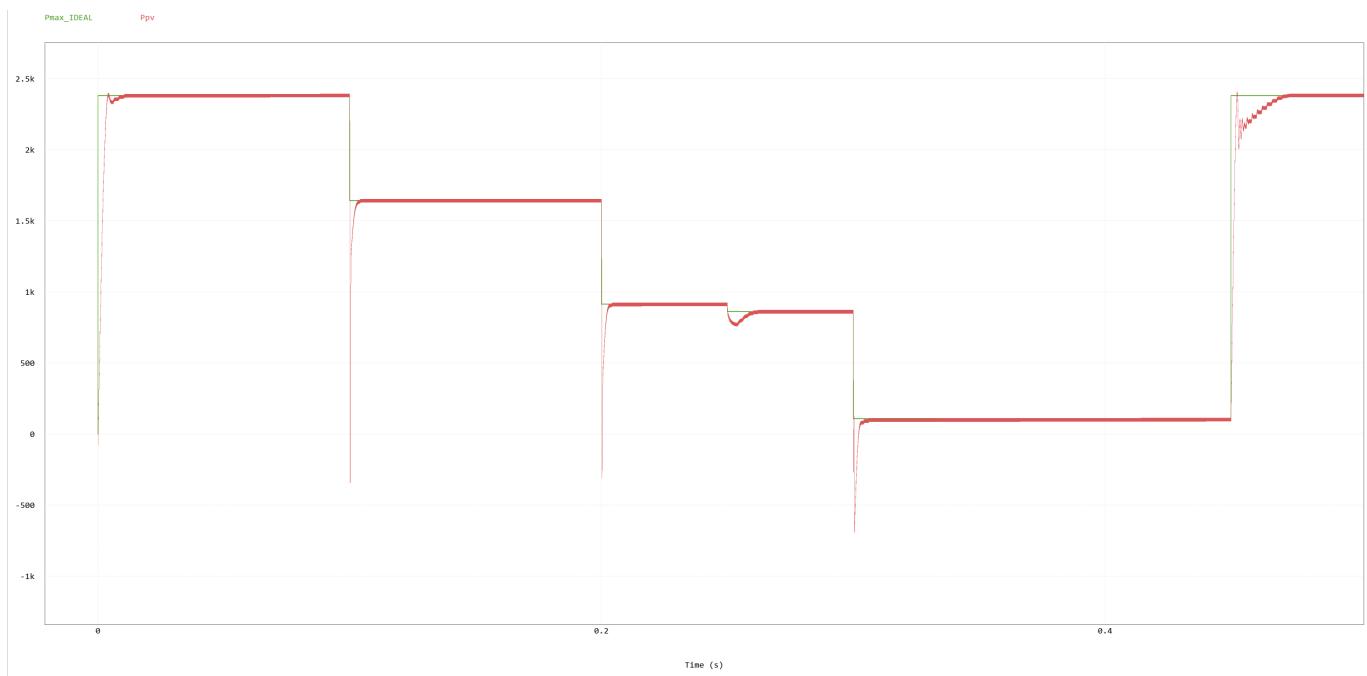


Figura 4: Comparação entre a potência teórica máxima (Verde, W) e a potência rastreada (Vermelho, W) pelo sistema ao longo do tempo.

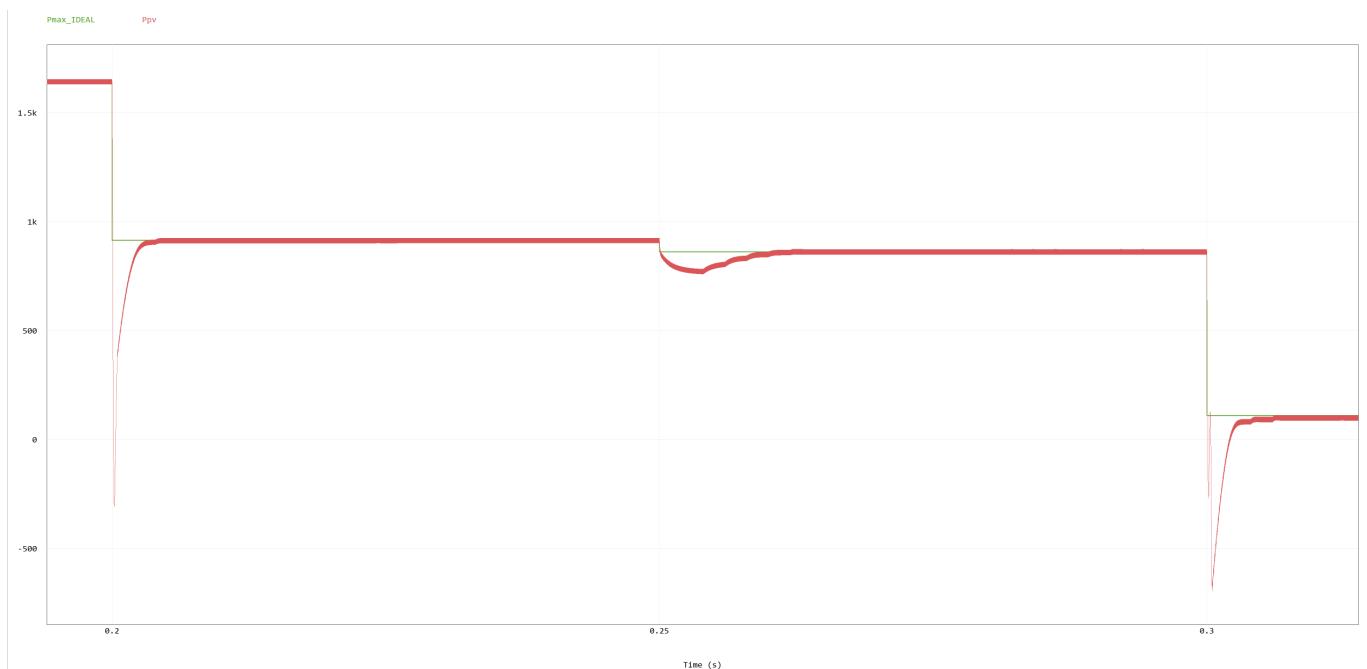


Figura 5: Comparação entre a potência teórica máxima (Verde, W) e a potência rastreada (Vermelho, W) pelo sistema ao longo do tempo.

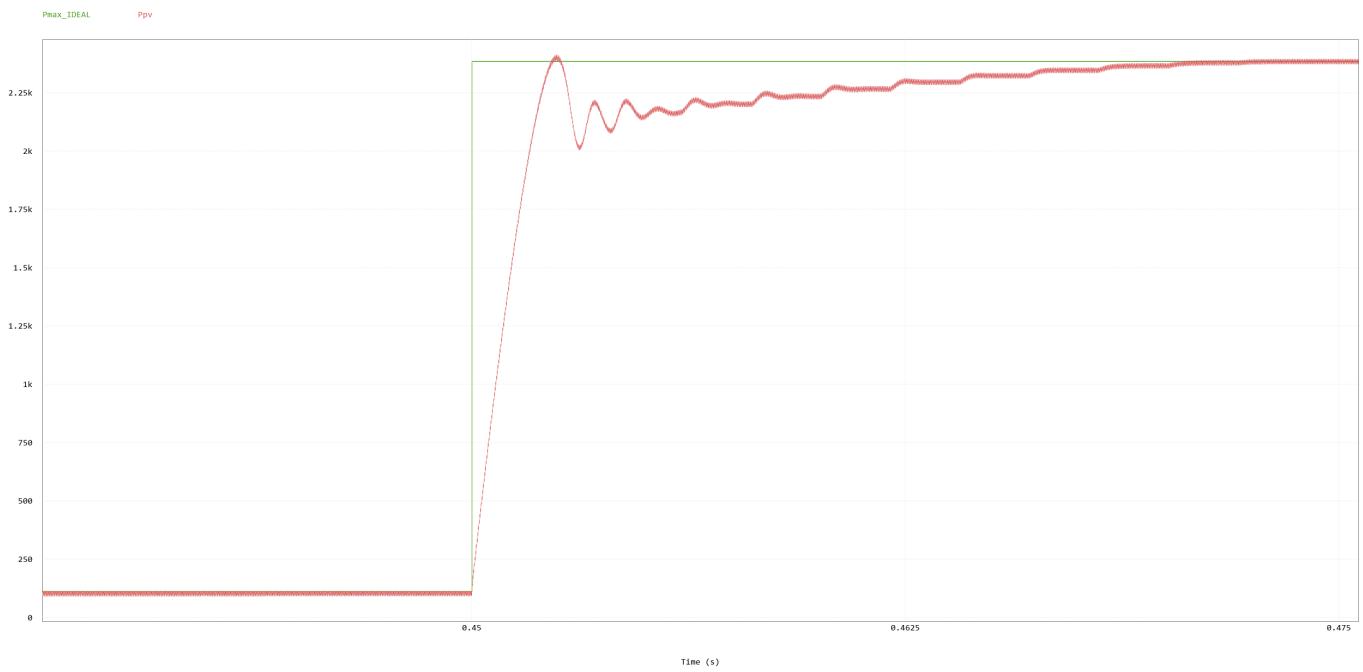


Figura 6: Comparação entre a potência teórica máxima (Verde, W) e a potência rastreada (Vermelho, W) pelo sistema ao longo do tempo.

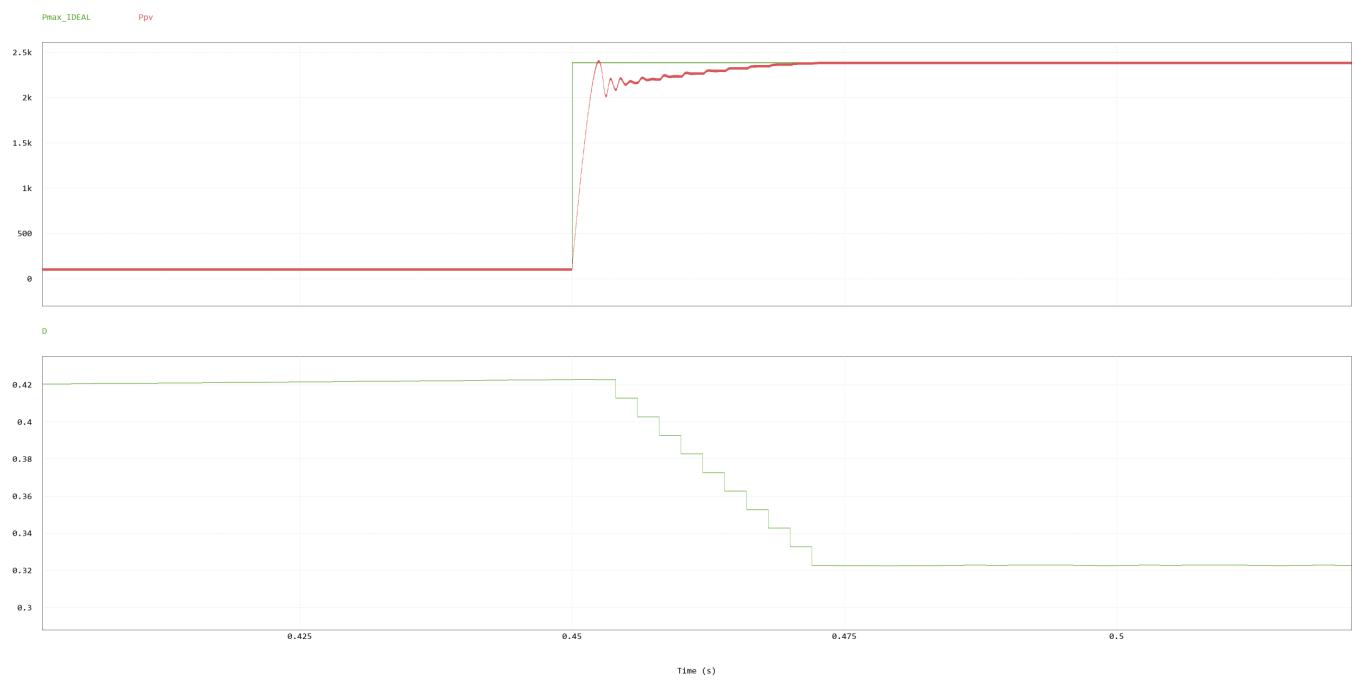


Figura 7: Potência teórica, potência rastreada e ciclo de trabalho.

4 Medições Reais com Painel Fotovoltaico

Para validar o sistema desenvolvido, foi realizada uma etapa de medição prática utilizando um painel fotovoltaico real. A escolha do painel foi baseada em critérios de potência moderada e acessibilidade, considerando os recursos disponíveis no INEP. Após avaliação, foi decidido utilizar o módulo fotovoltaico flexível da Solbian, modelo SP-100, com potência nominal de 100 W. Este painel combina alta eficiência com um design leve e flexível, sendo ideal para experimentos laboratoriais e aplicações práticas.

Os painéis da linha Solbianflex, como o SP-100, são módulos fotovoltaicos de monocristalino projetados para fornecer energia limpa e confiável para aplicações externas, incluindo ambientes marinhos, veículos recreativos (*RV*) e outras aplicações ao ar livre. Sua superfície é composta por um filme plástico inquebrável e resistente às intempéries, tornando-os adequados para montagem em superfícies planas ou suavemente curvas, como toldos, coberturas rígidas, decks e tetos de veículos.

Algumas características adicionais incluem:

- Design leve, de baixo perfil (2 mm de espessura) e totalmente resistente às intempéries.
- Painéis semirrígidos e flexíveis, adequados para superfícies curvas (até 10%).
- Proteção contra impactos e abrasão, devido ao revestimento plástico inquebrável.
- Alta eficiência na conversão de energia solar, com células de silício monocristalino de qualidade superior.
- Garantia de 5 anos para a produção de energia e 2 anos para os materiais.

A Tabela 2 apresenta as especificações principais do painel, fornecidas pelo fabricante. Já a Figura 8 apresenta uma imagem do painel utilizado nos experimentos.

Tabela 2: Especificações do painel fotovoltaico flexível Solbian SP-100.

Parâmetro	Valor
Potência máxima (P_{MPP})	102 W
Tensão no ponto de máxima potência (V_{MPP})	18,0 V
Corrente no ponto de máxima potência (I_{MPP})	5,7 A
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	21,8 V
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	6,0 A
Eficiência do módulo	22,5%
Coeficiente de temperatura de P_{MPP}	-0,38% / °C
Coeficiente de temperatura de V_{OC}	-0,27% / °C
Número de células	32
Condições padrão de teste (STC)	1000 W/m ² , 25°C, AM 1,5
Dimensões	1109 x 546 x 2 mm
Peso	1,5 kg

4.1 Testes com Caracterizador PV

Para realizar os testes práticos, foi utilizado um caracterizador PV da Gossen Metrawatt, um equipamento capaz de levantar as curvas características e dados detalhados de um ou mais módulos fotovoltaicos. Este equipamento trabalha em conjunto com uma estação de medição para registrar as condições ambientais, como irradiação solar e temperatura do módulo.



Figura 8: Painel fotovoltaico flexível Solbian SP-100 utilizado nos experimentos.

Os testes foram realizados aproximadamente às 15 horas, em uma tarde ensolarada, com a temperatura ambiente em torno de 28°C . A estação de medição registrou a irradiância incidente e a temperatura do módulo no momento do teste, permitindo uma análise mais precisa dos resultados. A Figura 9 apresenta uma foto do teste realizado com o painel.



Figura 9: Teste do painel fotovoltaico utilizando o caracterizador PV da Gossen Metrawatt.

Os dados obtidos durante o teste estão organizados nas Tabelas 3 e 4. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros elétricos do painel sob as condições registradas, enquanto a Tabela 4 resume as condições ambientais e operacionais no momento do experimento.

Tabela 3: Parâmetros elétricos do painel fotovoltaico obtidos no teste.

Parâmetro	Valor
Potência de pico (P_{max})	82,3 W
Resistência série (R_s)	0,5 Ω
Resistência paralela (R_p)	412 Ω
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	19,5 V
Corrente de curto-círcuito (I_{SC})	3,68 A
Tensão no ponto de máxima potência (V_{pmax})	14,7 V
Corrente no ponto de máxima potência (I_{pmax})	3,42 A

Tabela 4: Condições ambientais e de teste.

Parâmetro	Valor
Fator de preenchimento (<i>Fill Factor</i>)	70,2%
Duração da varredura (<i>Sweep Duration</i>)	11,64 ms
Irradiância	653 W/m ²
Temperatura do módulo (T_{mod})	50,6 °C

Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado para as condições de teste. Embora os valores registrados estejam abaixo dos especificados no *datasheet*, é importante destacar que as condições padrão de teste (*Standard Test Conditions – STC*) são praticamente impossíveis de replicar em ambientes reais. Considerando a irradiância de 653 W/m² e a temperatura do módulo registrada de 50,6°C, os valores medidos estão consistentes com o desempenho esperado do painel.

5 Projeto + Hardware-in-the-Loop (HIL)

5.1 Projeto

Com base nos resultados obtidos anteriormente, optou-se por utilizar o módulo fotovoltaico flexível Solbian SP-100 como base para a etapa de *Hardware-in-the-Loop* (HIL). Este módulo possui uma potência nominal de 100 W, o que define as especificações principais do sistema. O conversor projetado para esta etapa deve ser capaz de processar uma potência de até 100 W, garantindo a flexibilidade necessária para simular o comportamento do sistema.

Para o conversor, foi escolhido um **buck síncrono**, devido à sua eficiência superior em comparação a um buck convencional, especialmente em aplicações de baixa tensão de saída. A substituição do diodo por uma chave reduz significativamente as perdas de condução, o que é crítico em sistemas onde eficiência energética é um dos principais requisitos.

Dimensionamento do Indutor

O dimensionamento do indutor do conversor foi realizado considerando as seguintes condições: - Tensão de entrada (V_{in}): $V_{PV_{MPP}}$, assumindo aproximadamente 18 V, com base nos dados do painel Solbian SP-100. - Tensão de saída (V_{out}): 10 V, simulando o carregamento de uma bateria. - Corrente máxima de saída (I_{out}): 10 A, considerando a potência máxima do painel ($P = 100 \text{ W}$). - Fator de ripple de corrente (r): fixado em 10% da corrente de saída.

A equação para o cálculo do indutor (L) é dada por:

$$L = \frac{V_{out} \cdot (V_{in} - V_{out})}{V_{in} \cdot f_{sw} \cdot \Delta I_L}$$

onde: - f_{sw} é a frequência de chaveamento (40 kHz), - ΔI_L é o ripple de corrente no indutor, dado por:

$$\Delta I_L = r \cdot I_{out}.$$

Substituindo os valores:

$$\begin{aligned}\Delta I_L &= 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ A}, \\ L &= \frac{10 \cdot (18 - 10)}{18 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 1} \approx 111 \mu\text{H}.\end{aligned}$$

Para reduzir os impactos de transientes no sistema, o indutor foi superdimensionado para $120 \mu\text{H}$. Isso ajuda a minimizar o ripple de corrente, garantindo uma operação mais estável e reduzindo os esforços sobre os componentes passivos e o controlador.

Dimensionamento do Capacitor de Saída

O capacitor de saída (C_{out}) foi dimensionado para garantir um ripple de tensão (ΔV) aceitável na saída, utilizando a equação:

$$C_{out} = \frac{I_{out}}{f_{sw} \cdot \Delta V}.$$

Considerando um ripple de tensão de 1% em $V_{out} = 10 \text{ V}$ ($\Delta V = 0,1 \text{ V}$):

$$C_{out} = \frac{10}{40 \cdot 10^3 \cdot 0,1} \approx 250 \mu\text{F}.$$

Assim como no caso do indutor, o capacitor foi superdimensionado para $470 \mu\text{F}$, contribuindo para uma maior estabilidade e mitigando os efeitos de transientes no sistema.

5.2 Escolha do Controlador

Para implementar o controle no sistema *Hardware-in-the-Loop* (HIL), foi escolhido o microcontrolador **TMS320F28069M**, da Texas Instruments, por diversos motivos. Este controlador foi selecionado devido à familiaridade prévia com sua utilização, além da facilidade de integração com a placa de desenvolvimento **LAUNCHXL-F28069M**. Essa placa possui uma interface prática para conexão com o HIL402, simplificando o desenvolvimento e os testes no ambiente HIL.

Outro fator relevante foi o ambiente de desenvolvimento **Code Composer Studio**, que oferece ferramentas de depuração robustas, acelerando o processo de implementação e validação. Embora o TMS320F28069M esteja superdimensionado para esta aplicação, ele foi escolhido para facilitar os testes devido às suas características avançadas e à experiência prévia com a plataforma.

Especificações do TMS320F28069M

O TMS320F28069M é um microcontrolador de alto desempenho da família C2000 da Texas Instruments. Algumas de suas especificações principais incluem:

- **Processador:** CPU de 32 bits com arquitetura C28x, operando a até 90 MHz.
- **Memória:** 256 kB de memória Flash e 100 kB de RAM.
- **Periféricos para controle:** Módulos PWM de alta resolução, ADCs de 12 bits (16 canais), comparadores analógicos.
- **Comunicação:** Interfaces SPI, I2C, UART e CAN.

Embora essas especificações sejam excessivas para o controle de um conversor buck síncrono processando até 100 W, a escolha foi justificada pelo objetivo de facilitar a integração e os testes no ambiente HIL. Além disso, a placa de desenvolvimento LAUNCHXL-F28069M possui uma interface plug-and-play para o HIL402, utilizando uma placa intermediária para *launchpads*, conforme ilustrado na Figura 10.

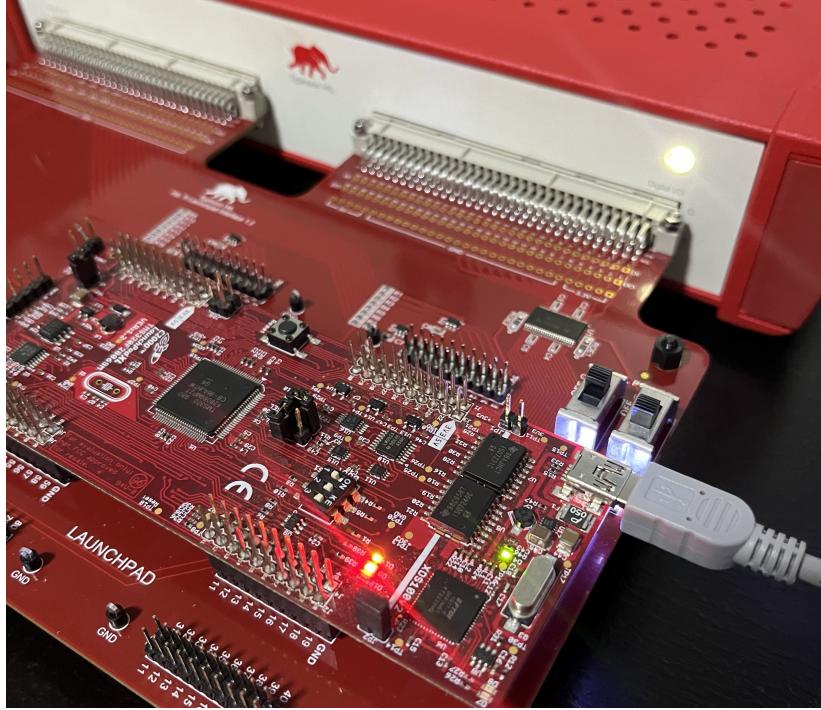


Figura 10: Interface da LAUNCHXL-F28069M com o HIL402, utilizando a placa intermediária para *launchpads*.

Na próxima seção, será apresentada uma alternativa de baixo custo e mais acessível para aplicações semelhantes, considerando situações onde o orçamento seja uma restrição.

5.2.1 Ambiente de Simulação no HIL

Para a etapa de *Hardware-in-the-Loop* (HIL), foi utilizado o sistema **HIL402** da empresa Typhoon HIL. Ele permite a modelagem detalhada do conversor e a implementação de controle em tempo real, oferecendo uma interface amigável para projetar, testar e validar sistemas eletrônicos de potência.

O ambiente de desenvolvimento do HIL402 conta com um editor de esquemáticos, onde o conversor foi modelado, conforme ilustrado na Figura 11. Nesse editor, os componentes passivos, como indutores e capacitores, são adicionados de forma similar a outros softwares de simulação, com seus valores definidos diretamente no editor. Para as chaves, no entanto, o sistema oferece funcionalidades avançadas. Utilizamos um bloco de **half-bridge**, que, ao ser configurado, permite diversas opções, incluindo:

- Modulação interna, onde o controle da chave é gerado dentro do ambiente do HIL402.
- Seleção de portas físicas, permitindo delegar o controle das chaves a um controlador externo. Neste projeto, utilizamos as portas físicas para conectar o microcontrolador **TMS320F28069M**, garantindo que o controle em malha fechada fosse realizado pelo *LaunchPad*.

Além da modelagem do conversor, o HIL402 também permite a inclusão de curvas características do painel solar, geradas em uma ferramenta específica do software Typhoon. A Figura 12 ilustra as curvas de tensão e corrente do painel, que foram configuradas para reproduzir as características do

módulo Solbian SP-100. Essas curvas são integradas ao modelo no editor de esquemáticos, permitindo uma simulação precisa das condições operacionais do sistema.

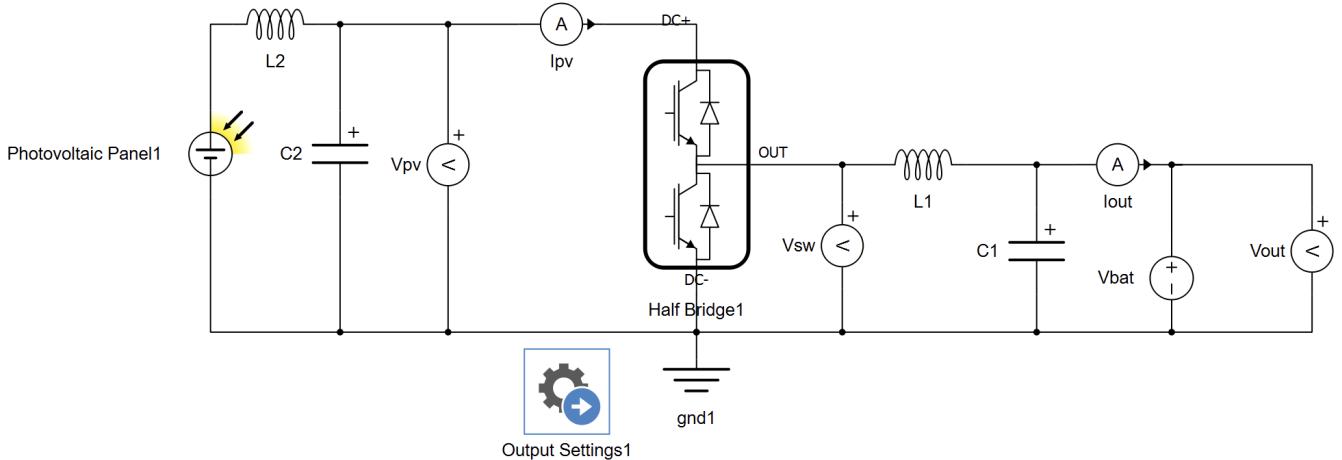


Figura 11: Modelo do conversor implementado no editor de esquemáticos do HIL402.

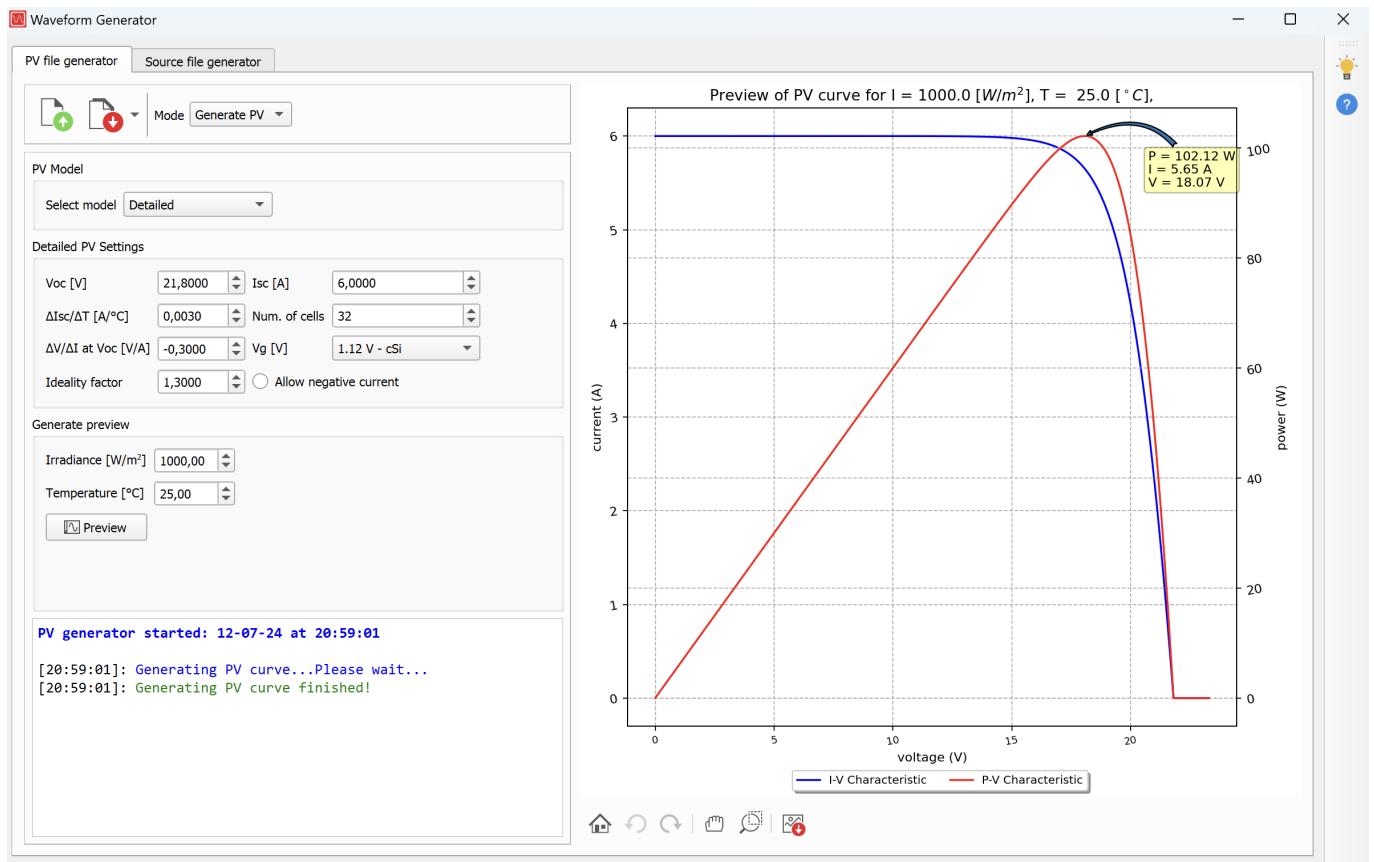


Figura 12: Curvas características do painel solar, configuradas no ambiente Typhoon HIL.

O ambiente também oferece uma interface robusta para medições. Tensão, corrente e outras grandezas podem ser monitoradas diretamente no software e, adicionalmente, configuradas no menu de *Output Settings*. Essa funcionalidade permite adicionar ganhos e *offsets* aos sinais, que são então enviados para os canais ADC do *LaunchPad*. Esse processo é fundamental para garantir que o DSP realize o controle em malha fechada com os sinais devidamente ajustados.

Modos de Operação e Ambiente SCADA

O ambiente de simulação do HIL oferece dois modos de operação principais, que atendem diferentes etapas do desenvolvimento:

- **Modo HIL Virtual:** Nesse modo, a simulação ocorre completamente dentro do computador, sem o uso do HIL402 físico. Embora essa abordagem seja mais lenta e não permita o controle em tempo real ou a interface com hardware físico, ela oferece uma solução prática para iniciar os testes e validar modelos preliminares.
- **HIL em Tempo Real:** Nesse modo, o sistema é conectado ao HIL402, onde o modelo é executado diretamente no equipamento, garantindo simulação em tempo real. Este modo permite a interface direta com hardware físico, como o *LaunchPad*, possibilitando a implementação e validação do controle em malha fechada.

Uma das ferramentas mais úteis do ambiente HIL é o sistema **SCADA**, que permite a criação de *dashboards* personalizados para monitorar e ajustar parâmetros em tempo real. Por meio do SCADA, é possível visualizar sinais como tensão, corrente e potência, além de modificar valores como ganhos de controle e limites operacionais. Os resultados a seguir vão demonstrar o uso da dashboard configurada para acompanhar a operação do sistema em tempo real.

Resultados com o HIL em Tempo Real

A seguir, são apresentadas algumas figuras ilustrando os cenários analisados. Cada figura inclui na legenda uma descrição detalhada da situação simulada, como alterações na irradiação.

Os resultados confirmam a robustez da integração entre o HIL402 e o controlador externo, validando a metodologia proposta para desenvolvimento e testes em ambiente de *Hardware-in-the-Loop*.

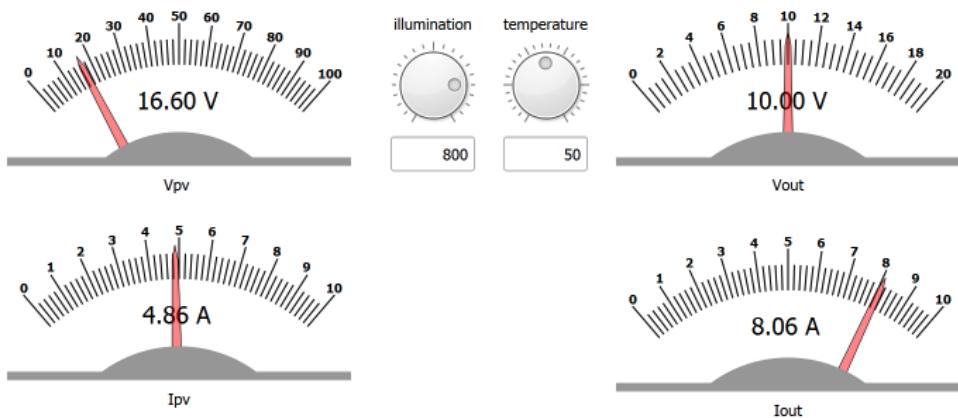


Figura 13: Módulo no STC, controlador com cilo em 57,5%, ponto máximo

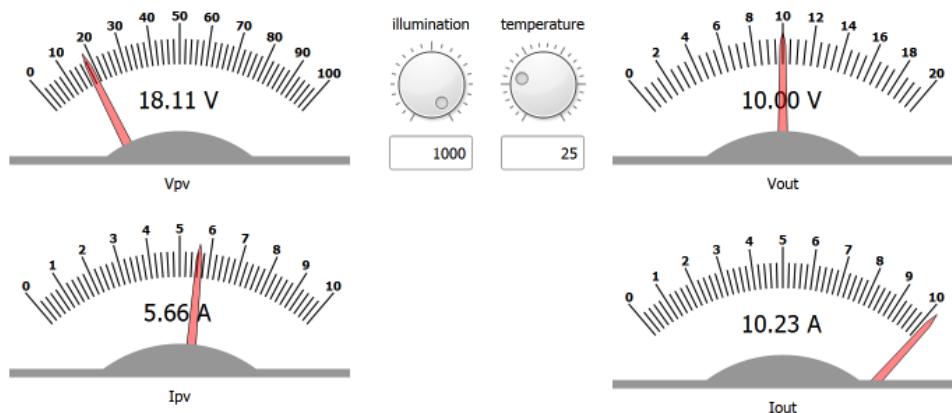


Figura 14: Módulo em outro cenário, controlador com cilo em 57,5%, ponto máximo

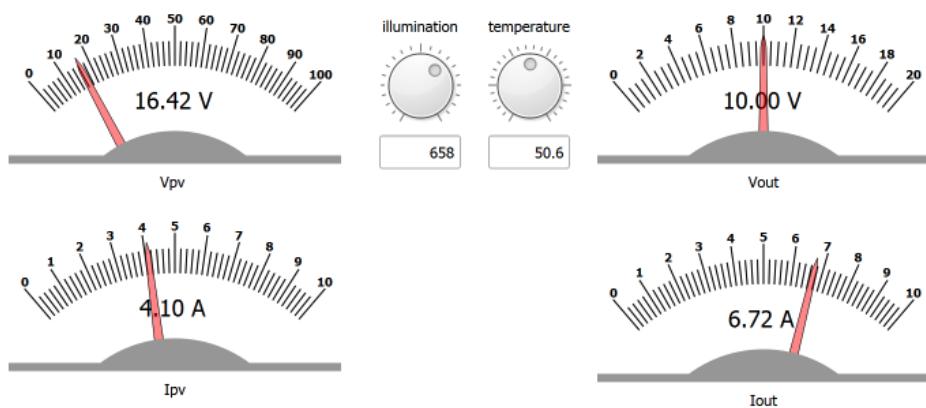


Figura 15: Módulo no cenário que o painel foi testado, ponto de potência similar ao do caracterizador

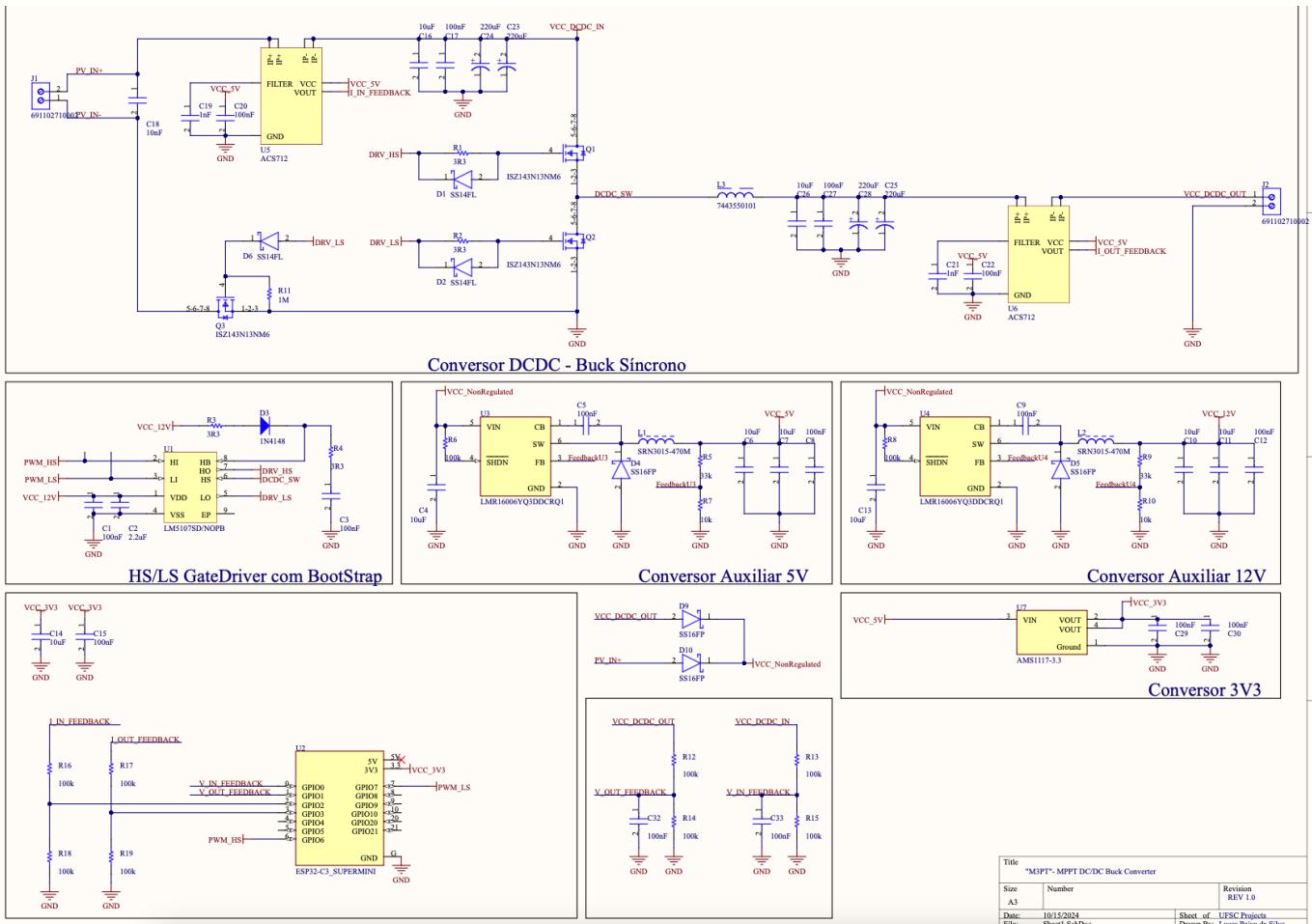


Figura 16: Esquemático no Altium

6 Projeto da Placa no Altium

Com base nos conhecimentos adquiridos e nos testes realizados durante as etapas de simulação e *Hardware-in-the-Loop* (HIL), foi decidido projetar uma placa de circuito impresso (PCB) para consolidar o sistema. O objetivo desse projeto é desenvolver uma solução prática e funcional para o controle e operação do conversor buck síncrono, incorporando as especificações e ajustes identificados ao longo do trabalho.

O software escolhido para o desenvolvimento foi o **Altium Designer**, amplamente utilizado na indústria para o projeto de PCBs. Sua interface robusta e ferramentas avançadas permitem um fluxo de trabalho integrado entre esquemático, layout e validação, garantindo um projeto de alta qualidade.

A seguir, exploraremos os principais aspectos do desenvolvimento da placa, divididos em três subseções:

- **Esquemático:** Detalhamento do circuito desenvolvido, incluindo os componentes selecionados e sua interconexão.
- **Layout:** Discussão sobre o posicionamento dos componentes, otimização do espaço e considerações relacionadas à integridade de sinal e dissipação térmica.
- **Considerações Finais sobre a PCB:** Análise das principais decisões tomadas durante o projeto, incluindo limitações, desafios enfrentados e possibilidades de melhorias.

6.1 Esquemático

O esquemático do projeto foi organizado em diversas partes funcionais, cada uma responsável por atender a um aspecto específico do sistema. A estrutura modular facilita a compreensão e a manutenção do circuito, além de garantir maior organização durante o desenvolvimento no Altium Designer. A seguir, são detalhadas as principais partes do esquemático:

Conversor DC/DC - Buck Síncrono

O conversor buck síncrono implementa o sistema de conversão discutido anteriormente. Além das duas chaves padrão do buck síncrono, foi adicionada uma terceira chave (**Q3**) para evitar o fluxo reverso de corrente caso a tensão da bateria seja maior que a do painel solar. Este recurso protege o sistema contra danos e perdas indesejadas.

Dois sensores de corrente são utilizados para monitorar o desempenho do sistema:

- **U5**: Sensor de corrente ACS712, responsável por medir a corrente de entrada.
- **U6**: Sensor de corrente ACS712, utilizado para medir a corrente de saída.

Capacitores foram amplamente utilizados no projeto, com uma combinação de capacitores eletrólíticos, cerâmicos e de poliéster devido à sua baixa ESR (Resistência Série Equivalente). Um capacitor de desacoplamento de 10 nF foi posicionado junto à entrada do conector do módulo fotovoltaico para ajudar na estabilidade.

O indutor principal do conversor é **L3**, projetado para operar nas condições de corrente e ripple discutidas anteriormente.

Gate Driver com BootStrap

O circuito de *gate driver* foi projetado utilizando uma configuração com **bootstrap** para controlar a chave *high-side*. Esse método permite gerar a tensão necessária para acionar o *MOSFET* superior, que normalmente exige uma tensão de porta mais alta do que a tensão de alimentação. O *bootstrap* utiliza um capacitor e um diodo para criar essa tensão diferencial, garantindo o acionamento correto e eficiente da chave.

Conversores Auxiliares de 5V e 12V

Dois conversores chaveados foram implementados para fornecer as tensões auxiliares necessárias ao sistema:

- **5V**: Responsável por alimentar os sensores e outros circuitos periféricos.
- **12V**: Fornece energia para o *gate driver* e outros componentes de potência.

Os diodos **D9** e **D10** permitem que esses conversores sejam alimentados pela entrada ou saída do sistema, utilizando automaticamente a fonte que estiver disponível no momento.

Conversor 3V3

O circuito de 3,3 V é implementado por meio de um *LDO* regulador linear, responsável por alimentar o microcontrolador escolhido para o projeto, o **ESP32-C3**. Este microcontrolador apresenta excelente custo-benefício, integrando Wi-Fi e Bluetooth de baixo consumo, tornando-o ideal para aplicações que exigem conectividade.

Divisores Resistivos e Filtragem

Para a medição de tensões de entrada e saída, foi projetada uma rede de divisores resistivos combinada com capacitores. Essa rede atua como um filtro capacitivo de primeira ordem, atenuando harmônicos do chaveamento e garantindo leituras mais precisas. Essas leituras são fundamentais para a operação em malha fechada do sistema.

6.2 Layout da PCB

O layout da PCB foi projetado utilizando uma placa de duas camadas, uma escolha que equilibra custo e complexidade para este tipo de aplicação. O objetivo principal foi organizar o layout de forma a otimizar a performance elétrica, reduzir interferências e garantir a dissipação térmica adequada dos componentes de potência.

Orientações Gerais para o Projeto

Segundo boas práticas de design para circuitos mistos (potência e controle), foram adotadas as seguintes estratégias:

- **Malhas e planos dedicados para alta potência:** As trilhas responsáveis por conduzir altas correntes foram dimensionadas para suportar as cargas de potência esperadas, utilizando planos de cobre e vias para melhorar a distribuição de corrente e reduzir resistências parasitas.
- **Desacoplamento entre potência e controle:** A parte de potência (MOSFETs, indutores e capacitores de alta corrente) foi posicionada em uma região separada da PCB, reduzindo o acoplamento de ruídos para os circuitos de controle. Componentes sensíveis, como o ESP32-C3 e os sensores, foram isolados da área de comutação.

Dissipação Térmica

A dissipação térmica foi uma prioridade no layout, especialmente para os MOSFETs de potência. Para isso, foram utilizados pontos de cobre expandidos diretamente conectados às áreas de dissipação dos componentes. Além disso:

- **Vias térmicas:** Adicionadas sob os MOSFETs para conectar as áreas de dissipação aos planos internos e melhorar a transferência de calor.
- **Distribuição estratégica de componentes:** O espaçamento entre os MOSFETs e outros componentes foi ajustado para evitar concentrações excessivas de calor em uma única área.

Fabricação com JLCPCB

O projeto do layout foi desenvolvido considerando as especificações e capacidades da **JLCPCB**, uma das principais empresas de fabricação de PCBs. As regras de projeto (*design rules*) e o *stackup* de camadas foram ajustados para atender aos padrões da JLCPCB, garantindo que o protótipo pudesse ser produzido com eficiência e confiabilidade.

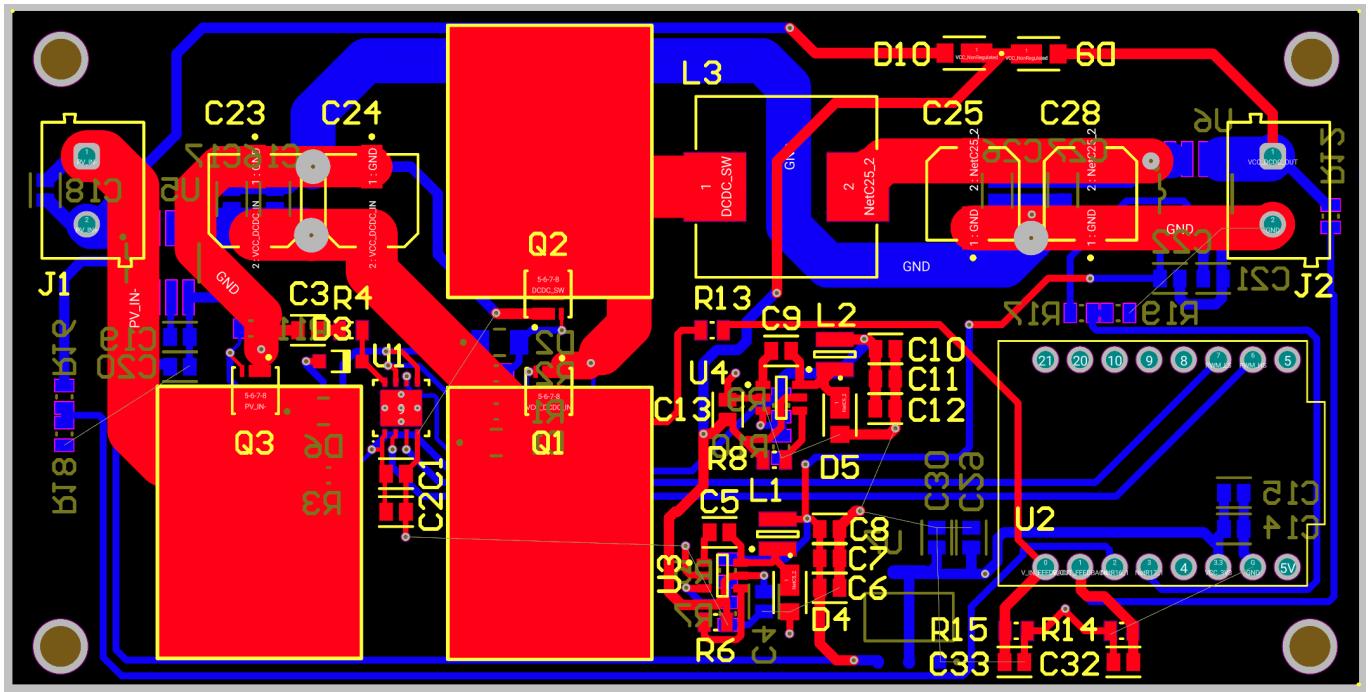


Figura 17: Roteamento da PCB, planos removidos para melhor visualização

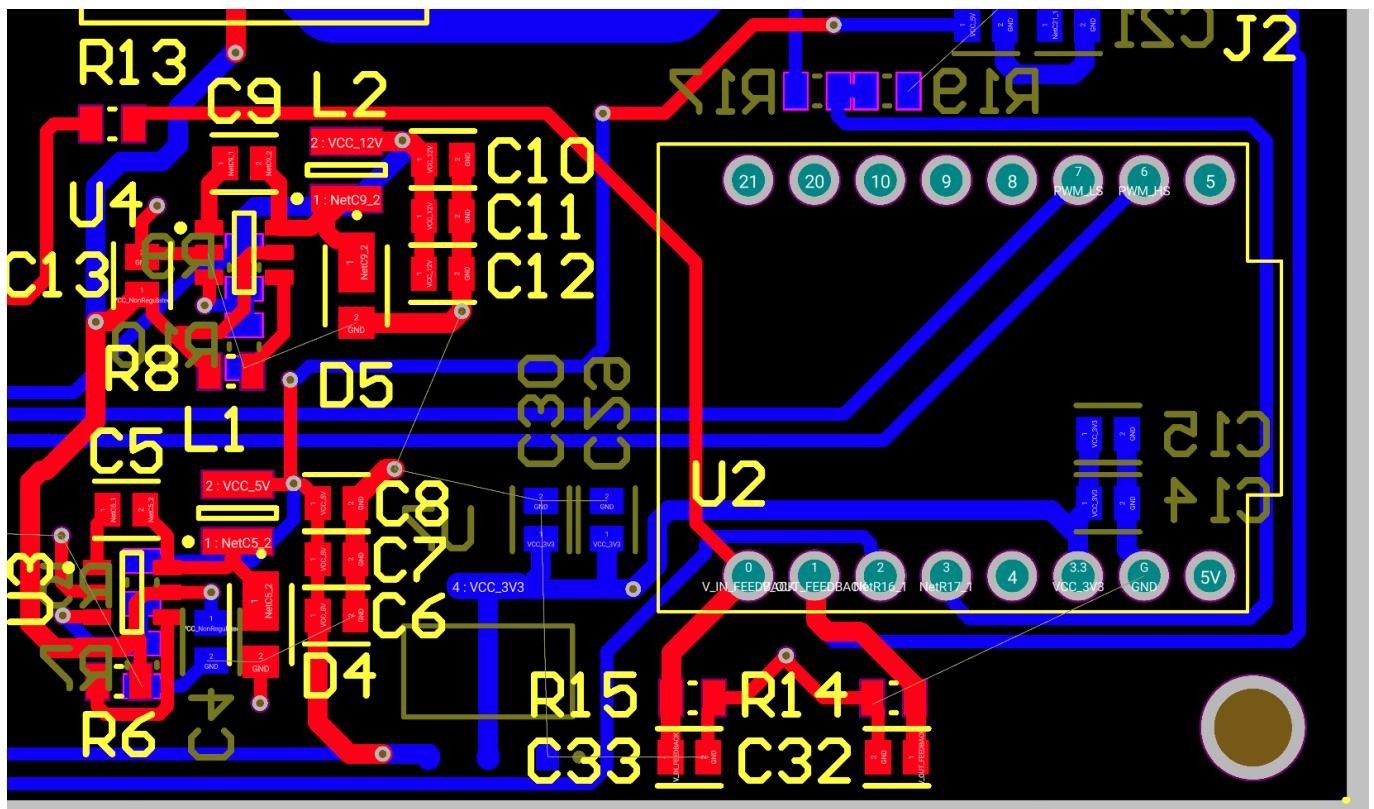


Figura 18: Datalhe do Roteamento da PCB, planos removidos para melhor visualização

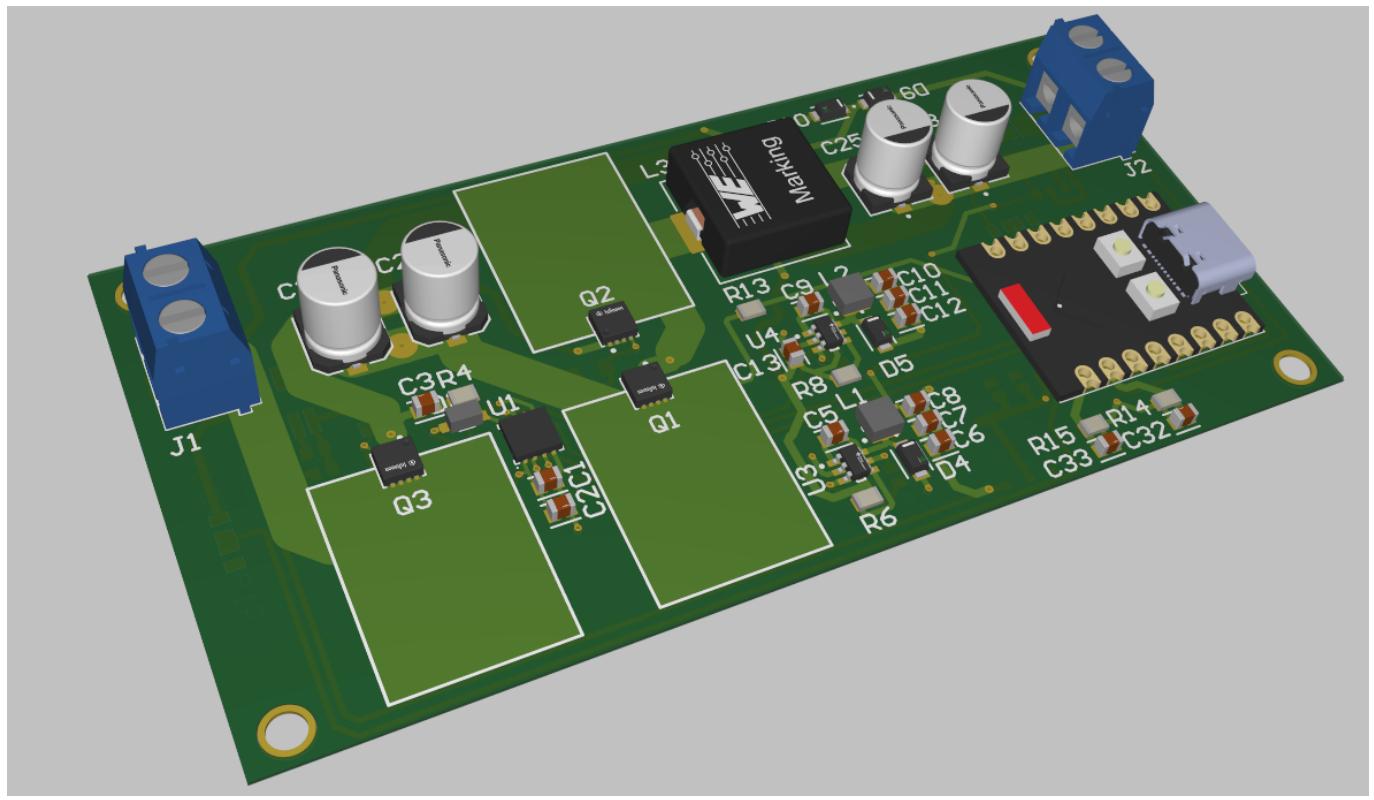


Figura 19: Vista 3D superior

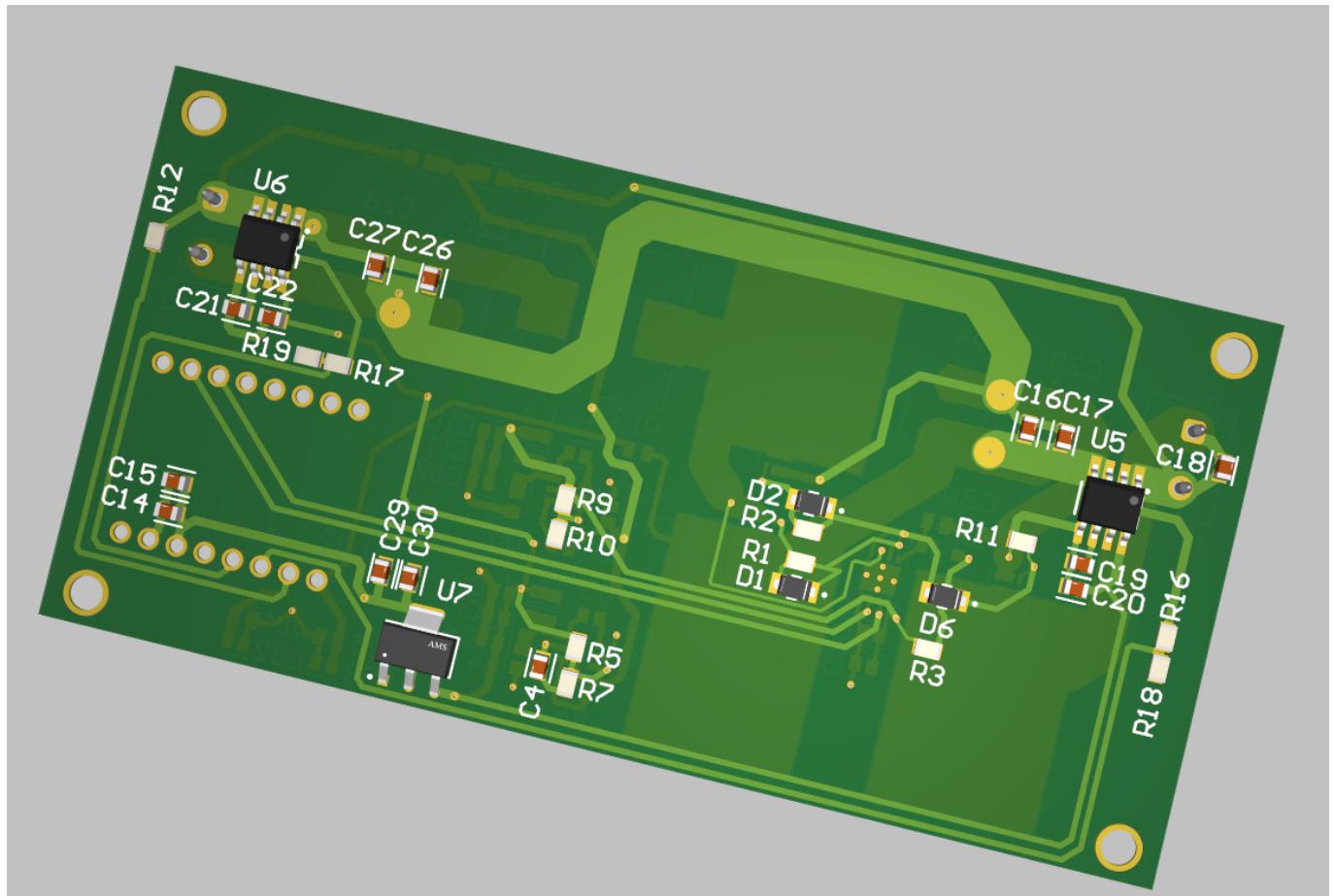


Figura 20: Vista 3D inferior

6.3 Considerações sobre a PCB

Embora o projeto do layout da PCB tenha sido finalizado e otimizado para atender às especificações do sistema, não foi possível fabricar a placa dentro do prazo disponível. Um dos fatores limitantes foi a impossibilidade de utilizar a fresadora disponível no INEP, devido ao *clearance* necessário para alguns componentes e às limitações técnicas do equipamento.

Para a fabricação, seria necessário utilizar um serviço especializado, como o oferecido pela **JLCPCB**, cujas capacidades de produção atendem aos requisitos de *clearance*, *vias* e *stackup* definidos no projeto. Apesar disso, um planejamento inadequado do tempo de execução comprometeu a viabilidade de realizar a fabricação e os testes dentro do período do projeto.

Essa limitação representa um aprendizado importante para projetos futuros. Um planejamento mais detalhado e uma alocação de tempo adequada para etapas críticas, como a fabricação e montagem da PCB, serão essenciais para garantir a conclusão completa do desenvolvimento. Apesar disso, o projeto da PCB desenvolvido é funcional e adequado para fabricação, representando um passo importante na integração de todas as etapas do sistema.

7 Teste do Conversor

Devido à impossibilidade de fabricar a PCB dentro do prazo, foi decidido, após conversa com o professor, realizar um teste prático do *driver*. Este teste complementa as etapas práticas do projeto, como a simulação, os testes com o painel fotovoltaico, o ambiente *Hardware-in-the-Loop* (HIL) e o design da PCB.

Configuração do Teste

Para os testes, foi novamente utilizado o **LAUNCHXL-F28069M**, equipado com o microcontrolador TMS320F28069M da Texas Instruments (Figura 21). Como estágio de potência para o *driver*, foi utilizada a **BOOSTXL-DRV8301**, uma placa de expansão projetada para controle trifásico, composta por três *half-bridges*. Nesse experimento, utilizamos apenas uma das *half-bridges* para operar como o conversor **buck síncrono**.

A **BOOSTXL-DRV8301** utiliza como par de MOSFETs o modelo **CSD18533Q5A NexFET™**, enquanto o *gate driver* é implementado pelo **DRV8301**. Essa placa também inclui um conversor interno que fornece alimentação para o *LaunchPad*, facilitando a integração e reduzindo a necessidade de fontes externas adicionais.

Adição de um Filtro LC

Para avaliar o comportamento do conversor, adicionamos um filtro LC na saída, com o objetivo de atenuar os componentes de alta frequência e obter um sinal mais próximo de uma tensão contínua. Esse filtro é composto por um indutor e um capacitor, dimensionados para operar na frequência de chaveamento definida e atender às condições de carga do sistema. A Figura 22 apresenta o diagrama da configuração do filtro.

Devido a limitações na fonte de alimentação disponível, os níveis de potência no teste foram reduzidos em relação aos valores projetados para o sistema final. No entanto, isso não comprometeu a análise qualitativa dos resultados.

Resultados dos Testes

Os sinais medidos durante os testes são apresentados nas seguintes figuras:

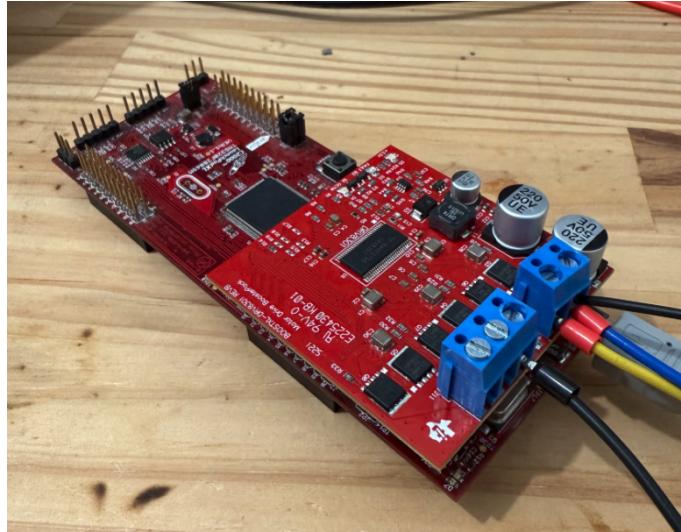


Figura 21: Configuração do teste utilizando o *LaunchPad* e a *BOOSTXL-DRV8301*.

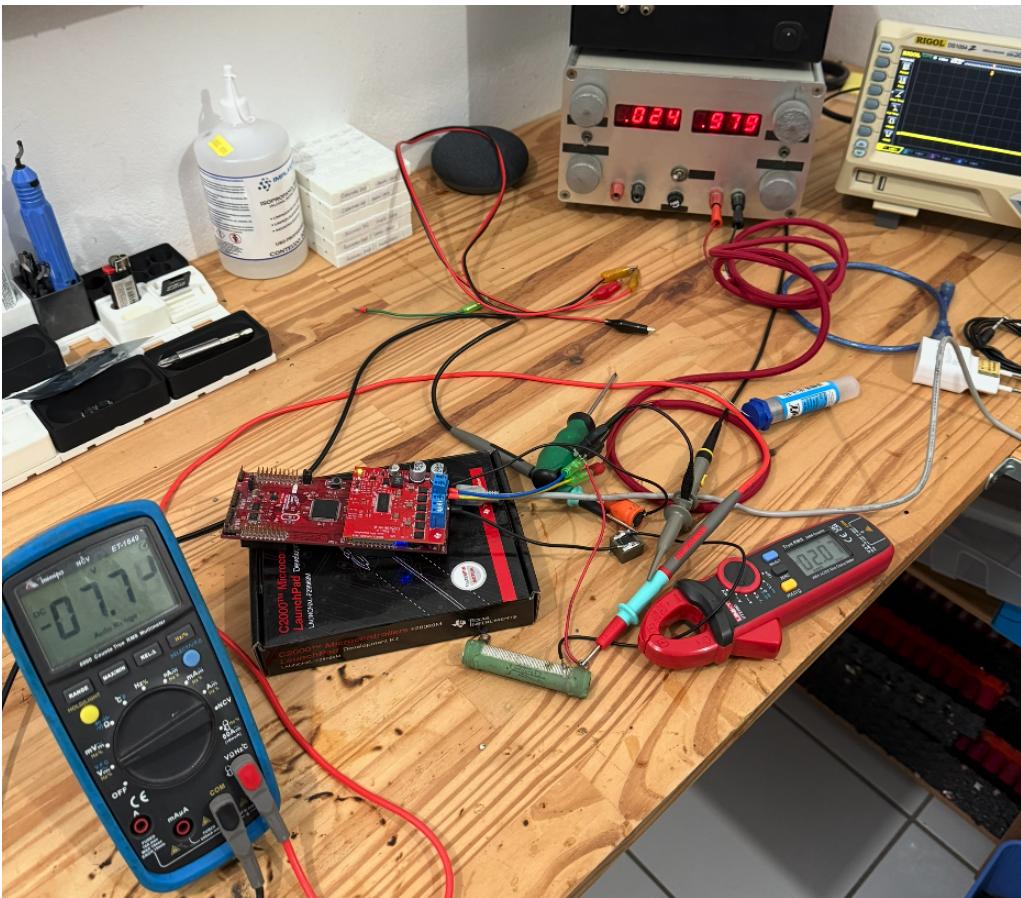


Figura 22: Imagem do teste completo.

- A Figura 23 mostra o sinal de saída do conversor sem o filtro LC, evidenciando os componentes de alta frequência gerados pelo chaveamento.
- A Figura 24 apresenta o sinal de saída após a passagem pelo filtro LC, resultando em uma tensão contínua com níveis reduzidos de ripple.

Além disso, foi calculada a eficiência do sistema em diferentes condições de potência de entrada e saída. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos:

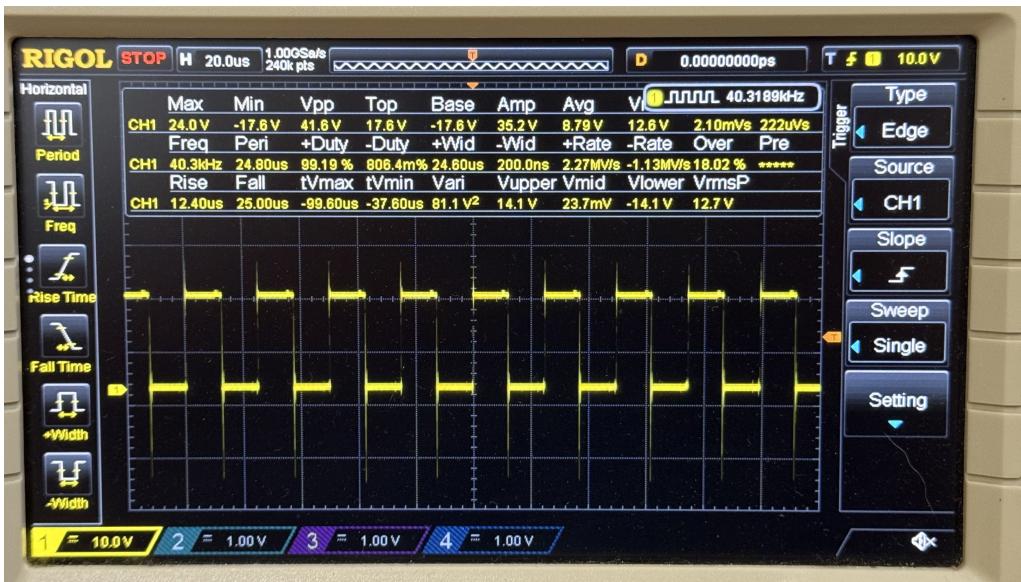


Figura 23: Sinal de saída do conversor sem o filtro LC.



Figura 24: Sinal de saída do conversor após o filtro LC.

Tabela 5: Resultados dos testes de eficiência do conversor.

Teste	Potência de Entrada (W)	Potência de Saída (W)	Eficiência (%)
1	8,2	5,7	69,51
2	14,5	11,6	80,00
3	17,15	16,02	93,40

Os resultados demonstram que o sistema, mesmo em condições limitadas de potência, foi capaz de operar com eficiência crescente em níveis mais elevados de carga. Esses testes validaram a funcionalidade básica do conversor, destacando a necessidade de melhorias para aplicações de maior potência.

8 Conclusão

Este projeto representou uma rica oportunidade de aprendizado e desenvolvimento prático, abrangendo desde a concepção teórica até a validação experimental de um sistema de conversão de energia. No entanto, é importante reconhecer que houve falhas significativas no planejamento e na gestão do tempo. Essas falhas impediram que algumas etapas fossem concluídas integralmente, como a fabricação e montagem da PCB projetada, o que teria enriquecido ainda mais os resultados obtidos. Este ponto serve como um lembrete da importância de uma alocação de tempo mais rigorosa e do estabelecimento de metas intermediárias claras para garantir a conclusão do trabalho de forma completa e satisfatória.

Apesar disso, o projeto alcançou importantes marcos. Foram realizadas simulações detalhadas no PSIM, testes práticos com um painel solar real e validações no ambiente *Hardware-in-the-Loop* (HIL), além do desenvolvimento de um design robusto para a PCB. O teste parcial do conversor utilizando o *LaunchPad* e o módulo BOOSTXL-DRV8301 também permitiu validar elementos-chave do sistema, como o controle do ciclo de trabalho e a filtragem LC, representando um progresso significativo.

Para trabalhos futuros, a montagem e teste da PCB projetada devem ser priorizados, permitindo uma validação completa do sistema em um formato integrado. Além disso, há espaço para otimizar a implementação dos algoritmos de controle, explorando técnicas mais avançadas e ajustando parâmetros para melhorar a eficiência e estabilidade do conversor. Outras possibilidades incluem a análise de novos modos de operação, como controle com base em previsão de carga, e a integração de funções adicionais no microcontrolador escolhido, como comunicação sem fio e monitoramento remoto do sistema. Esses passos podem transformar o projeto em uma solução ainda mais robusta e versátil, com aplicações práticas em sistemas reais de conversão de energia.

Em suma, este trabalho destacou tanto os desafios quanto as oportunidades de projetos complexos de engenharia, reforçando a importância de planejamento, execução consistente e aprendizado contínuo para superar limitações e alcançar os objetivos propostos.

9 Repositório e material do projeto

O material utilizado e desenvolvido pode ser encontrado no repositório criado para esse projeto:

<https://github.com/LucasPaivaSilva/MP3P>

Referências

- [1] Material da disciplina EEL7836-08202 (20242) - Projeto Nível I em Eletrônica Pot. e Acion. III.
- [2] Material da disciplina EEL7204-09202 (20242) - Processamento de Energia Fotovoltaica e Eólica.
- [3] Texas Instruments, *BOOSTXL-DRV8301*, disponível em: <https://www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8301>.
- [4] Texas Instruments, *LAUNCHXL-F28069M*, disponível em: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28069M>.
- [5] Typhoon HIL, *Material HIL/Typhoon*, disponível em: <https://www.typhoon-hil.com/>.
- [6] Texas Instruments, *Getting Started With C2000™ Real-Time Control Microcontrollers (MCUs)*, disponível em: <https://www.ti.com/lit/ug/spruiv6c/spruiv6c.pdf?ts=1733567832650>.
- [7] Solbian, *FLEX SP100*, disponível em: https://www.emarineinc.com/pdf/Solar%20Panels/Solbian_SP100.pdf.
- [8] Texas Instruments, *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*, disponível em: https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1733579608613&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.