

Vitor Hudson Rios

**Estudo e Dimensionamento de um Conversor
para *Energy Harvesting* de Luminosidade *Indoor*
Utilizando Painel Solar Fotovoltaico Orgânico**

Belo Horizonte

2020

Vitor Hudson Rios

**Estudo e Dimensionamento de um Conversor para
Energy Harvesting de Luminosidade *Indoor* Utilizando
Painel Solar Fotovoltaico Orgânico**

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Thiago Ribeiro de Oliveira

Belo Horizonte

2020

Resumo

Devido à crescente procura do mercado atual por tecnologias alternativas de geração de energia, um contratante do mercado de móveis demonstrou interesse em desenvolver um produto voltado para automação residencial, alimentado pela energia proveniente de fontes diversas de iluminação, como a luz solar difusa que entra nas residências pelas janelas e luzes artificiais de lâmpadas. Motivado por essa requisição e pela boa resposta espectral de painéis OPV (*organic photovoltaic*) na faixa de comprimento de onda da luz visível, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar as possibilidades e dificuldades da implementação do projeto de um conversor para *energy harvesting* de luminosidade *indoor*, utilizando um filme fotovoltaico orgânico. A partir de lâmpadas de LED, painéis OPV e instrumentos de medição, foram obtidas as curvas características do painel fotovoltaico para 1000 e 500 lux de iluminação e, em seguida, modelado o seu comportamento no software MATLAB. A partir de seu modelo e simulação, foi projetado um conversor buck, com controle MPPT (*maximum power point tracker*) para uma carga de 40 mWh de consumo de energia por dia e uma bateria de lítio para armazenamento, com o intuito de analisar as perdas e as exigências de um circuito voltado para níveis tão baixos de potência.

Palavras-chaves: OPV, Conversores dc, Fotovoltaico

Abstract

Due to the growing demand in the current market for alternative energy generation technologies, a company from the furniture market has shown interest in developing a product aimed at home automation, powered by energy from different indoor lights, such as diffused sunlight entering residences through windows and artificial lamp lights. Motivated by this request and the good spectral response of OPV (Organic Photovoltaic) panels in the visible light wavelength range, this work was developed with the objective of studying the possibilities and difficulties of implementing a converter for energy harvesting of indoor luminosity, using an organic photovoltaic film. Using LED lamps, OPV panels and measuring instruments, the characteristic curves of the photovoltaic panel were obtained for 1000 and 500 lux, and then its behavior was modeled in the MATLAB software. Based on its model and simulation, a buck converter was designed, with MPPT (maximum power point tracker) control for a load of 40 mWh of energy consumption per day and a lithium battery for storage, in order to analyze the losses and demands of a circuit aimed at such low power levels.

Key-words: OPV, Energy Harvesting, Photovoltaic.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Espectro da radiação solar no espaço (<i>Balck Body</i>), na superfície terrestre (<i>AM1.5G</i>) e faixa de luz visível.	14
Figura 2 – Espectro da radiação de fontes artificiais. (a) Lâmpadas xenon, (b) lâmpadas incandescente, (c) lâmpadas fluorescentes, (d) lâmpadas halógenas, (e) lâmpdas LED branco frio, lâmpadas LED branco quente.	15
Figura 3 – Resposta espectral de tecnologias fotovoltaicas.	16
Figura 4 – (a) Esquemático estrutural do OPV. (b) Fotografia de um filme OPV impresso.	16
Figura 5 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica: (a)No escuro, (b) Condição padrão AM1.5G ($1000w/m^2$).	17
Figura 6 – Exemplo de curva característica IxV (preto) e PxV (verde).	18
Figura 7 – Diagrama de circuitos de <i>energy harvesters</i>	19
Figura 8 – Topologia Buck.	19
Figura 9 – Topologia Boost.	20
Figura 10 – Topologia Buck-Boost.	20
Figura 11 – Forma de onda da tensão de saída do conversor.	21
Figura 12 – Modulador PWM. (a) Diagrama de bloco (b) Comparador de sinais	22
Figura 13 – Fotografia tirada durante a medição das curvas características do módulo fotovoltaico.	24
Figura 14 – Curvas IxV do painel OPV para 1000 lux e 500 lux.	25
Figura 15 – Formas de onda de tensão e corrente do conversor Buck.	27
Figura 16 – $(D_{min} - D_{min}^2)$ em função da tensão na bateria.	28
Figura 17 – Formas de onda de tensão e corrente no capacitor de saída do conversor Buck. Fonte:	29
Figura 18 – Formas de onda de tensão e corrente no capacitor de entrada do conversor Buck.	30
Figura 19 – Modelo de um painel solar fotovoltaico da biblioteca do SIMULINK.	31
Figura 20 – Curvas IxV simuladas em vermelho; Curvas IxV medidas em azul.	32
Figura 21 – Topologia de Buck síncrono simulada.	32
Figura 22 – Circuito de controle utilizado na simulação.	33
Figura 23 – <i>Flowchart</i> do método MPPT - Perturba e Observa.	34
Figura 24 – Curvas de tensão e corrente do arranjo fotovoltaico,na saída do conversor, curva de irradiação e <i>duty-cycle</i>	39
Figura 25 – Curvas de potência do arranjo fotovoltaico e curva de potência ideal.	40
Figura 26 – Curvas de tensão, corrente e SOC (<i>State of Charge</i>) na bateria.	40

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros elétricos considerados para a bateria do sistema.	23
Tabela 2 – Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico para 500 e 1000 lux. . . .	25
Tabela 3 – Parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico.	25
Tabela 4 – Parâmetros relevantes do MOSFET selecionado.	36
Tabela 5 – Parâmetros relevantes do indutor selecionado.	37
Tabela 6 – Parâmetros relevantes do capacitor de saída.	38
Tabela 7 – Parâmetros relevantes do capacitor de entrada.	38
Tabela 8 – Potência dissipada em cada componente, considerando operação em 1000 lux e tensão na bateria 6,4V	41
Tabela 9 – Potência dissipada em cada componente, considerando operação em 500 lux e tensão na bateria 6,4V	41
Tabela 10 – Comparativo de energia gerada e consumida por dia para 1000 e 500 lux, para $t = 8 h$	42

Lista de abreviaturas e siglas

OPV	<i>Organic Photovoltaic</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LED	<i>Led Emmiting Diod</i>
CCM	<i>Continuous Conduction Mode</i>

Lista de símbolos

η	Eficiência
ρ	Densidade de energia
I	Corrente
V	Tensão
K	Constante de Boltzmann
q	Carga do elétron
ϵ_0	Permissividade do vácuo
A	Área ativa
d	Duty-Cycle
T_s	Período de chaveamento
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
V_{max}	Tensão de máxima potência
I_{cc}	Corrente de curto circuito
I_{max}	Corrente de máxima potência
P_{max}	Máxima potência
L	Indutância
f	Frequência
C	Capacitância
Q	Carga armazenada
r	Resistência
ESR	Resistência série efetiva
N	Número de espiras
A_{cond}	Área do condutor
J	Densidade de corrente
E	Energia

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contexto Histórico e Motivação	11
1.2	Objetivo	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Luz e Energia Luminosa	13
2.1.1	Luz Solar	13
2.1.2	Luz <i>Indoor</i>	14
2.2	Tecnologias Fotovoltaicas	15
2.2.0.1	OPV (<i>Organic Photovoltaics</i>)	16
2.2.1	Modelo Elétrico	17
2.3	<i>Energy Harvesting</i>	19
2.3.1	Conversores DC-DC Não Isolados	19
2.3.1.1	Conversor Buck	19
2.3.1.2	Conversor Boost	20
2.3.1.3	Conversor Buck-Boost	20
2.3.2	Controle	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	Caracterização da Carga	23
3.2	Caracterização do Módulo Fotovoltaico	23
3.3	Dimensionamento do Conversor	25
3.3.1	Escolha da Topologia do Conversor	25
3.3.2	Projeto do Circuito de Potência	26
3.3.2.1	Cálculo do Indutor	26
3.3.2.2	Cálculo do Capacitor de Saída	28
3.3.2.3	Cálculo do Capacitor de Entrada	29
3.4	Simulação do Sistema	30
3.4.1	Modelo do Painel OPV	31
3.4.2	Circuito de Potência	32
3.5	Cálculos de Perdas	34
3.5.1	Perdas nas Chaves MOSFET	34
3.5.2	Perdas no Indutor	35
3.5.3	Perdas no Capacitor de Saída	35
3.5.4	Perdas no Capacitor de Entrada	35
3.6	Seleção de Componentes	35

3.6.1	Seleção do MOSFET	36
3.6.2	Seleção do Indutor	36
3.6.3	Seleção do Capacitor de Saída	38
3.6.4	Seleção do Capacitor de Entrada	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.0.1	Comportamento da Simulação	39
4.0.2	Potência Dissipada nos Componentes Seleccionados	41
5	CONCLUSÕES	43
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
	REFERÊNCIAS	45

1 Introdução

1.1 Contexto Histórico e Motivação

A procura da sociedade por formas alternativas de energia vem aumentando significativamente com a percepção dos severos impactos ambientais provocados pelo uso das fontes tradicionais e o provável esgotamento dos combustíveis fósseis. Com isso, novas formas de se gerar energia vem sendo pesquisadas e a energia solar fotovoltaica tem tido um papel importante na transição energética.

Apesar da inevitável transição energética, a sociedade continua se modernizando e se digitalizando cada vez mais, aumentando a demanda por energia elétrica, uma vez que aparelhos eletrônicos estão cada dia mais presentes em todos os setores, seja ele industrial com o IoT (*Internet of Things*) ou residencial com *smart homes* automatizadas.

Neste contexto, novas tecnologias fotovoltaicas estão sendo visadas, como o caso do OPV (*Organic Photovoltaic*), um filme fotovoltaico orgânico leve e semi-transparente que, por apresentar baixa pegada de carbono em sua produção, gerar energia por fonte renovável, e apresentar um design compacto e inovador tem recebido bastante atenção do mercado. O Brasil possui um fabricante da tecnologia OPV, a Sunew, que tem ganhado espaço no mercado, buscando o desenvolvimento das mais diversas aplicações.

Motivado por esse cenário, uma empresa do mercado de móveis demonstrou interesse no desenvolvimento de um produto voltado para automação residencial utilizando painel solar OPV, porém, voltado para o ambiente interno residencial. Dessa forma, o produto seria totalmente desconectado da rede elétrica, utilizando da luz existente na parte interna de residências como a luz solar difusa que entra pelas janelas e a luz artificial proveniente de lâmpadas como alimentação de energia.

1.2 Objetivo

A motivação deste trabalho está no interesse externado pela empresa do mercado de móveis, mencionada na seção anterior, no desenvolvimento de uma solução que se utilize da tecnologia OPV e a luminosidade *indoor* para alimentar um equipamento de automação residencial. Por questões de sigilo, não serão identificados o nome da empresa e nem detalhes explícitos da solução, mas o objeto do estudo reduz a um filme fotovoltaico OPV da Sunew como fonte de energia que deverá suprir um equipamento que possui uma bateria de lítio-íon de $7,4\text{ V}$ e 750 mAh e que irá demandar uma energia diária média de 40 mWh .

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise inicial da possibilidade de implementação deste sistema por meio do dimensionamento do conversor c.c/c.c que irá interfacear o filme OPV e o equipamento supracitado. Sobre o conversor, serão analisados o dimensionamento dos componentes, a seleção das chaves estáticas e estimativas de perdas de modo a se poder definir a viabilidade técnica do projeto, sem, no entanto, levar em consideração parâmetros construtivos e financeiros.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, serão abordados os conceitos básicos de iluminação *indoor*, tecnologias fotovoltaicas, e conversores eletrônicos para *energy harvesting* focados em aplicações fotovoltaicas em *low-light*.

2.1 Luz e Energia Luminosa

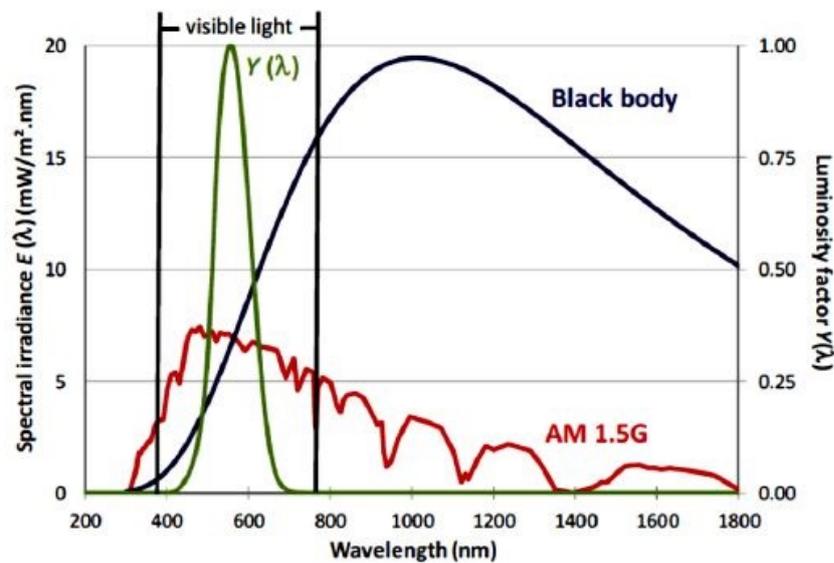
A luz, como descrita hoje pela física, é uma onda eletromagnética compreendida na região visível do espectro de frequências. Segundo [1], os olhos humanos são sensíveis a radiações com comprimento de onda na faixa de aproximadamente 400 nm a 700 nm, podendo variar conforme características individuais de cada olho.

2.1.1 Luz Solar

O sol emite radiação em todo o espectro eletromagnético, porém, dependendo do meio em que ela incide, seu espectro sofre alterações. No espaço, o espectro da radiação solar é semelhante ao de um corpo negro a 5800 K, e é caracterizado pelo padrão AM0 (*Air Mass 0*)[2]. O padrão AM é utilizado para caracterizar equipamentos fotovoltaicos que serão discutidos mais adiante.

Na superfície terrestre, após sofrer interferência da atmosfera, o espectro da radiação solar é caracterizado pelo padrão AM1.5G. A diferença espectral da radiação solar para esses dois casos pode ser vista na figura 1.

Figura 1 – Espectro da radiação solar no espaço (*Black Body*), na superfície terrestre (*AM1.5G*) e faixa de luz visível.



Fonte: [3]

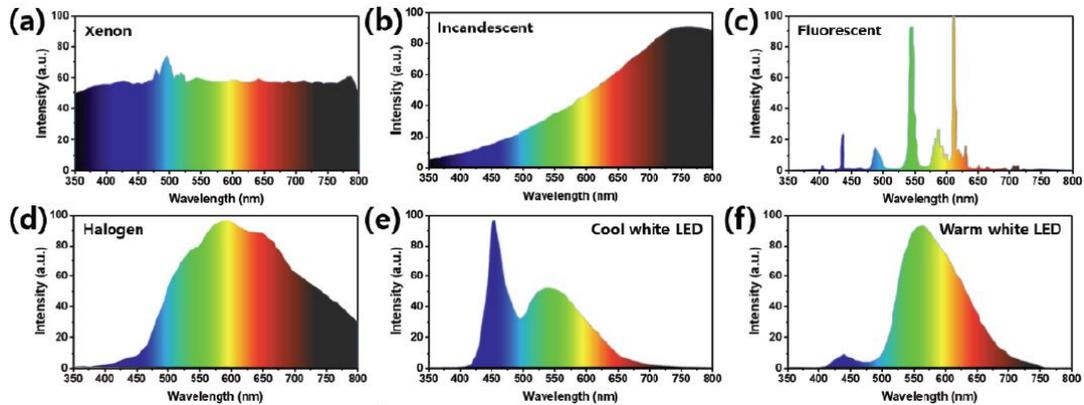
Analisando a figura 1, é possível perceber que a faixa correspondente à luz visível é a mais energética do espectro na superfície terrestre.

2.1.2 Luz *Indoor*

A iluminação *indoor* é a iluminação presente em interiores de construções domésticas ou industriais e pode ser resultante de uma mistura de várias fontes luminosas, como reflexão da luz solar e artificial, proveniente de diferentes materiais, como lâmpadas LED, fluorescentes ou incandescentes.

O espectro eletromagnético de algumas das mais comuns fontes artificiais de luz pode ser visto na figura 2.

Figura 2 – Espectro da radiação de fontes artificiais. (a) Lâmpadas xenon, (b) lâmpadas incandescente, (c) lâmpadas fluorescentes, (d) lâmpadas halógenas, (e) lâmpadas LED branco frio, lâmpadas LED branco quente.



Fonte: Adaptado de [3]

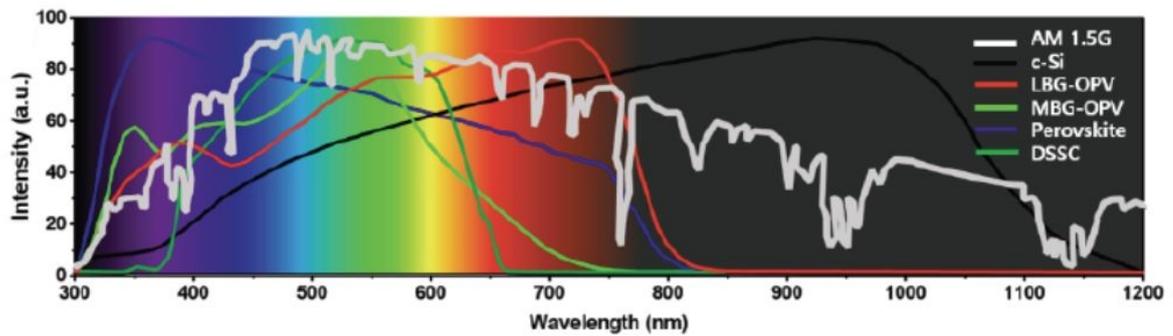
2.2 Tecnologias Fotovoltaicas

Existem vários materiais capazes de converter a energia proveniente da radiação luminosa em energia elétrica. A tecnologia mais dominante no mercado hoje em dia é baseada no silício cristalino, mas dentre as mais comuns também existem o silício amorfo, CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio), polímeros orgânicos (OPV), células solares de perovskita e DSSC (*dye-sensitized solar cells*).

Segundo[3], a potência gerada pelo fotovoltaico em ambiente *indoor* depende da intensidade da luz incidente, da área do equipamento, da distância até a fonte de luz e, principalmente, da sua resposta espectral [3]. Ou seja, o fator mais determinante para a performance de uma tecnologia fotovoltaica *indoor* é a sua capacidade de absorver os comprimentos de onda irradiados pela fonte artificial utilizada.

Na figura 3, vemos a resposta espectral de algumas tecnologias fotovoltaicas, o silício cristalino (c-Si), dois tipos de OPV (LBG e MBG-OPV), a célula de Perivskita e DSSC (*dye-sensitized solar cells*). É possível comparar as figuras 2 e 3 para ter uma noção de qual tecnologia terá melhor performance para cada fonte artificial.

Figura 3 – Resposta espectral de tecnologias fotovoltaicas.



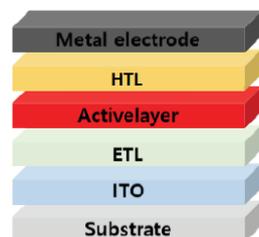
Fonte: Adaptado de [3]

Como pode ser visto, o OPV possui uma ótima resposta nos comprimentos de onda das fontes artificiais mais utilizadas em ambientes *indoor*, as lâmpadas LED, que se espera que dominem o mercado como as mais utilizadas, e as fluorescentes. Seu pico de absorção, em aproximadamente 550 nm, coincide com os comprimentos de onda com maior intensidade dessas fontes, confirmando a sua escolha para o estudo deste trabalho.

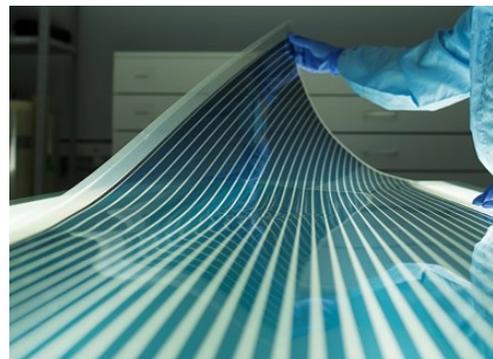
2.2.0.1 OPV (*Organic Photovoltaics*)

O OPV é um filme fotovoltaico com funcionamento semelhante às outras tecnologias, porém sua camada ativa, que absorve a energia luminosa e converte em energia elétrica, é composta por polímeros orgânicos.

Figura 4 – (a) Esquemático estrutural do OPV. (b) Fotografia de um filme OPV impresso.



(a)



(b)

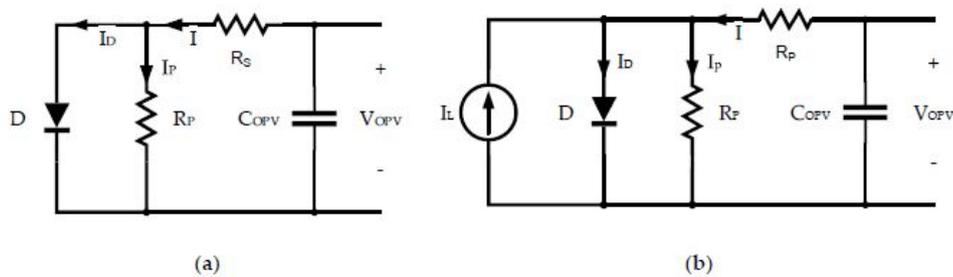
(a) Fonte: Adaptado de [3]

A figura 4(a) mostra um exemplo da estrutura de uma célula OPV. O processo produtivo consiste na deposição de 5 camadas sobre um substrato que muitas das vezes é um plástico transparente (PET). Dentre essas 5 camadas estão um ITO (*Indium Tin Oxide*) que é um óxido condutor transparente e atua como o catodo da célula; um ETL (*Eletron Transport Layer*) que atua transportando os elétrons extraídos da camada ativa; a camada ativa, polímero responsável por gerar energia por meio do efeito fotoelétrico; um HTL (*Hole Transport Layer*) que atua transportando as lacunas, ou buracos, resultantes do efeito fotoelétrico; e um condutor metálico que atua como anodo da célula fotovoltaica. Dessa forma, uma célula OPV costuma ser fina, leve e semi-transparente. Já, na figura 4(b), pode-se ver o resultado do processo de impressão das 5 camadas, resultando em um filme OPV impresso.

2.2.1 Modelo Elétrico

De acordo com [4], uma célula de fotovoltaica pode ser apresentada por dois modelos de circuitos elétricos, independentemente de sua tecnologia, um para seu comportamento no escuro e outro para seu comportamento sob o padrão AM1.5G, conforme figura 5.

Figura 5 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica: (a) No escuro, (b) Condição padrão AM1.5G ($1000w/m^2$).



Fonte: [4]

A corrente I_d que flui pelo diodo responde à equação 2.1, em que I_s é a corrente de saturação do diodo, V_d é a tensão nos terminais do diodo, n é o fator de idealidade do diodo, V_T é a tensão termal do diodo, K é a constante de Boltzmann e q é a carga do elétron[4].

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (2.2)$$

$$V_d = I \times R_s \tag{2.3}$$

A corrente entregue para a carga no escuro é 2.4 e nas condições padrão é 2.5.

$$I = I_s(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1) + \frac{V_{OPV} - IR_s}{R_p} \tag{2.4}$$

$$I = I_s(e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1) + \frac{V_{OPV} - IR_s}{R_p} - I_L \tag{2.5}$$

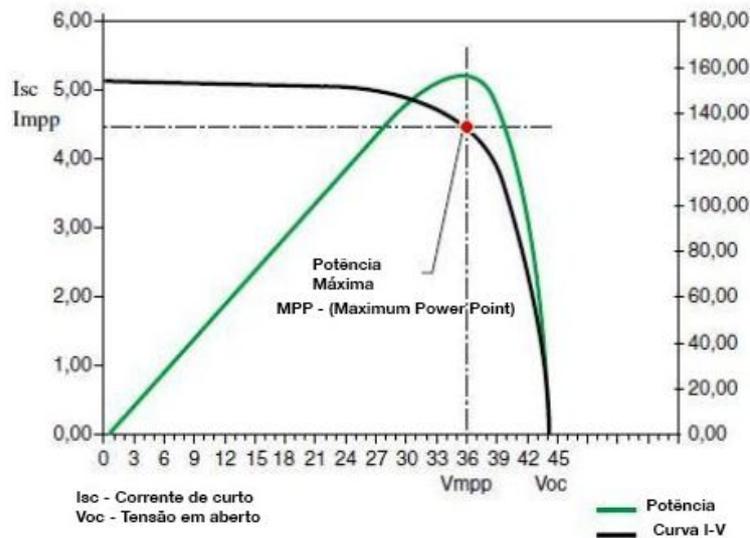
A capacitância da célula fotovoltaica segue a equação 2.6, em que ϵ_0 corresponde à permissividade do vácuo, K_s é a constante dielétrica do semicondutor, A é a área ativa da célula e d é a espessura do semicondutor.

$$C_{OPV} = \frac{\epsilon_0 K_s A}{d} \tag{2.6}$$

O modelo elétrico pode ser construído a partir da curva I-V (corrente-tensão) característica de cada célula fotovoltaica, obtida experimentalmente.

Na figura 6, vê-se um exemplo de curva característica, destacando o seu ponto de máxima potência (MPP), ponto no qual é esperado que a célula fotovoltaica opere como condição nominal, extraindo o máximo de potência possível. Para isso, é necessário uma eletrônica com algoritmos MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) que forcem a célula a operar neste ponto.

Figura 6 – Exemplo de curva característica IxV (preto) e PxV (verde).

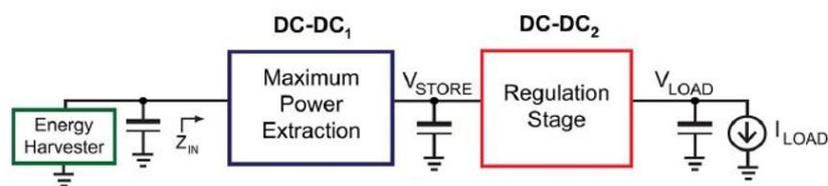


Fonte:[5]

2.3 Energy Harvesting

Para conseguir extrair energia de uma célula fotovoltaica em ambientes com pouca iluminação, é necessário implementar uma eletrônica capaz de manter o ponto de operação sempre em máxima potência, converter e controlar a tensão de saída da célula que é dependente da variação de iluminação e armazenar a energia extraída. Os circuitos padrões para realizar esses procedimentos geralmente seguem o diagrama da figura 7, as vezes sem necessitar de um segundo estágio de regulação.

Figura 7 – Diagrama de circuitos de *energy harvesters*.



Fonte:[6]

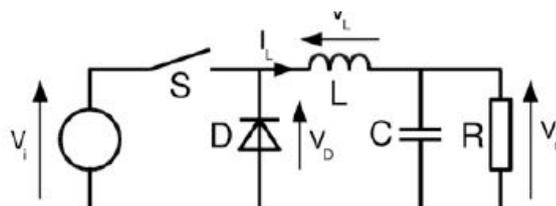
2.3.1 Conversores DC-DC Não Isolados

Os conversores DC-DC são necessários para casar a tensão de saída das células fotovoltaicas com a da carga que se deseja acionar. Para isso, é necessário aumentar ou diminuir a tensão de saída da célula.

2.3.1.1 Conversor Buck

Para abaixar a tensão de saída da célula fotovoltaica, pode ser utilizada a topologia Buck, vista na figura 8. A tensão de saída é de acordo com a equação 2.7, em que V_i é a tensão gerada pelo fotovoltaico, d é o *duty cycle* e V_o a tensão de saída para a carga.

Figura 8 – Topologia Buck.



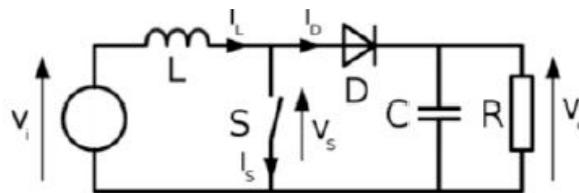
Fonte: [7]

$$V_o = d \times V_i \quad (2.7)$$

2.3.1.2 Conversor Boost

Para aumentar a tensão de saída da célula fotovoltaica, pode ser utilizada a topologia Boost, vista na figura 9. A tensão de saída é de acordo com a equação 2.8, em que V_i é a tensão gerada pelo fotovoltaico, d é o *duty cycle* e V_o a tensão de saída para a carga.

Figura 9 – Topologia Boost.



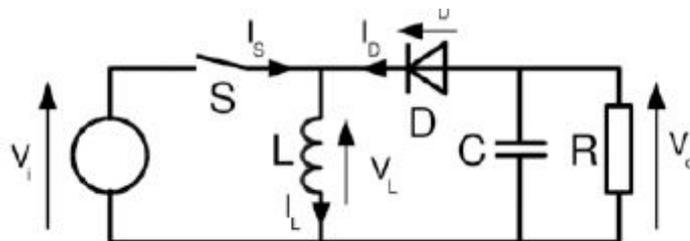
Fonte: [7]

$$V_o = \frac{V_i}{1 - d} \quad (2.8)$$

2.3.1.3 Conversor Buck-Boost

Para aumentar ou diminuir a tensão de saída da célula fotovoltaica, pode ser utilizada a topologia Buck-Boost, vista na figura 10. A tensão de saída é de acordo com a equação 2.9, em que V_i é a tensão gerada pelo fotovoltaico, d é o *duty cycle* e V_o a tensão de saída para a carga.

Figura 10 – Topologia Buck-Boost.



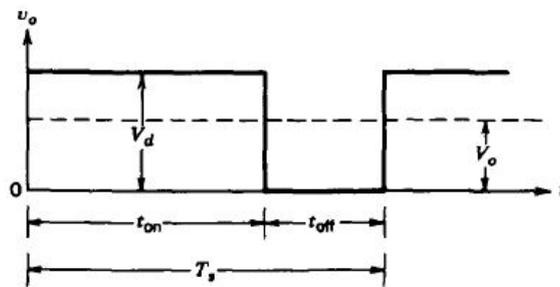
Fonte: [7]

$$V_o = \frac{-V_i d}{1 - d} \quad (2.9)$$

2.3.2 Controle

O controle da tensão de saída dos conversores DC-DC é realizado a partir da variação do tempo em que as chaves S ficam acionadas. Em muitas aplicações, as tensões de entrada e de saída são variáveis, como é o caso da aplicação de conversores para energia solar fotovoltaica. Nesse caso, a tensão de entrada é dependente da iluminação sobre o painel solar e de sua temperatura.

Figura 11 – Forma de onda da tensão de saída do conversor.



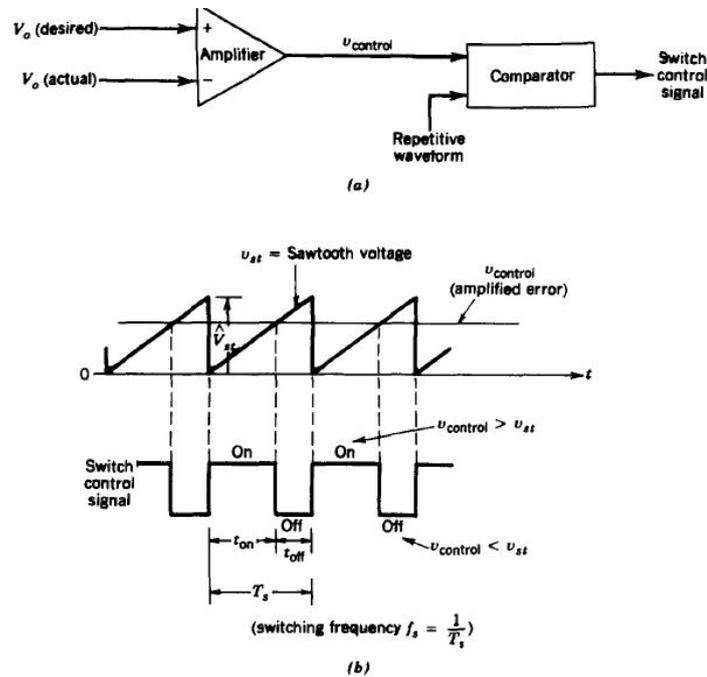
Fonte: [8]

Controlando o tempo em que a chave fica ligada e o tempo que fica desligada, controla-se também o valor médio da tensão de saída do conversor[8]. Em um período de chaveamento T_s .

Um dos métodos de controle mais utilizados é a partir da modulação PWM (*Pulse Width Modulation*), que utiliza de um período fixo T_s , mas variando o tempo que a chave fica ligada T_{on} . A razão do tempo de chave acionada pelo período de chaveamento é chamada de *Duty-Cycle*, D .

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.10)$$

Figura 12 – Modulador PWM. (a) Diagrama de bloco (b) Comparador de sinais



Fonte: [8]

A modulação PWM é realizada a partir da comparação entre o erro do valor medido com o valor de referência e uma forma de onda repetitiva, geralmente triangular. Como demonstrado no exemplo da figura 12, quando a onda triangular possui valores a baixo do valor de controle, a chave fica acionada. Dessa forma, o tempo em que a chave está ligada t_{on} é dependente do valor do sinal de controle.

Em aplicações fotovoltaicas, para o melhor aproveitamento da energia gerada pelo painel solar, o controle costuma ser realizado via MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que faz com que o sinal PWM garanta o chaveamento para que a tensão de operação do painel seja V_{max} . Existem vários métodos de controle MPPT, como por exemplo, o método Perturba e Observa, que será tratado no capítulo 3.

3 Metodologia

Este capítulo descreve a metodologia seguida para a caracterização do gerador fotovoltaico, da carga alimentada, e o projeto do conversor proposto.

3.1 Caracterização da Carga

A carga do sistema em questão será tratada como um motor DC e uma bateria de lítio de $7,4\text{ V}$ e 750 mAh . O conversor a ser projetado deverá possibilitar a recarga da bateria em ambiente *indoor*, garantindo a operação do motor, sem necessitar ser conectado à rede elétrica. O motor considerado possui 5 V como entrada e consome uma potência de $2,272\text{ W}$.

Acredita-se, a partir da especificação do contratante, que a energia consumida por dia seja de aproximadamente 40 mWh/dia , assumindo um tempo de funcionamento do motor de aproximadamente 1 min por dia. Portanto, essa premissa será tomada como base para o trabalho.

Será considerada para o projeto uma bateria com características semelhantes à da aplicação original, uma vez que não foi possível obter todas as informações sobre a mesma. A bateria considerada possui os parâmetros elétricos conforme tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros elétricos considerados para a bateria do sistema.

Tensão nominal (V)	Tensão máxima (V)	Tensão mínima (V)	Carga (mAh)
7,4	8,4	6,4	750

3.2 Caracterização do Módulo Fotovoltaico

Para iniciar o projeto do conversor, além de definir a carga que deve ser acionada, é necessário conhecer os parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico em questão. Para isso, foi utilizado um multímetro digital Keithley 2400 e um software dedicado desenvolvido em LabView pela SUNEW.

Foi realizada a leitura em varredura da tensão e corrente do módulo da marca Sunew, possibilitando traçar as curvas características $I \times V$ e $P \times V$ para determinadas condições de iluminação.

Uma vez que o painel OPV irá operar em ambiente *indoor*, com baixos níveis de irradiação incidente, seus parâmetros elétricos devem ser analisados em *low light*. Para

isso, foi construído um simulador, em ambiente totalmente escuro, com duas lâmpadas LED 2700 *Kelvin* e 1000 *lm*.

Figura 13 – Fotografia tirada durante a medição das curvas características do módulo fotovoltaico.

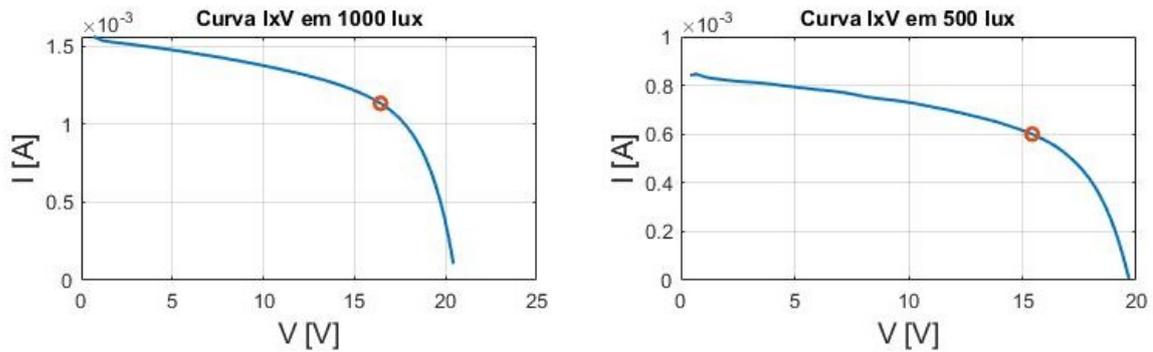


Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando um luxímetro, foi possível garantir que a incidência da luz estivesse praticamente uniforme por todo o módulo em 1000 *lux* e 500 *lux*, que foram os dois valores considerados para os extremos de iluminação na posição em que se deseja instalar o módulo, próxima à uma janela. Os valores considerados são condizentes com as recomendações para ambientes internos como residências e escritórios, principalmente próximos à entrada de luz solar difusa. [9]

Após a medição, os pontos obtidos foram plotados no software MATLAB, resultando nas curvas da figura 14 e na tabela 2.

Figura 14 – Curvas IxV do painel OPV para 1000 lux e 500 lux.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 – Parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico para 500 e 1000 lux.

	Voc (v)	Icc (mA)	Vmax (V)	Imax (mA)	Pmax (W)
500 lux	19,58	0,82	15,18	0,61	0,009
1000 lux	20,4	1,51	16,17	1,11	0,018

Por limitações físicas atreladas à aplicação do produto estudado, a ligação elétrica dos módulos OPV deve ser realizada com um arranjo fotovoltaico de dois painéis em série, logo, em todos os cálculos foram considerados os dados elétricos do arranjo.

Tabela 3 – Parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico.

	Voc (v)	Icc (mA)	Vmax (V)	Imax (mA)	Pmax (w)
500 lux	39,16	0,82	30,36	0,61	0,018
1000 lux	40,8	1,51	32,34	1,11	0,036

3.3 Dimensionamento do Conversor

Nesta seção será discutido o dimensionamento do conversor, considerando a operação do arranjo fotovoltaico com os filmes OPV da marca Sunew nos níveis de iluminação definidos na seção 3.2.

3.3.1 Escolha da Topologia do Conversor

Observando os parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico da tabela 3 e os limites de tensão de operação da bateria na tabela 1, percebe-se que o conversor necessário deve

realizar o abaixamento da tensão de entrada, uma vez que a tensão de máxima potência do arranjo (entre 30 e 32 V aproximadamente) é superior ao *range* de tensão da bateria (entre 6 e 7 V aproximadamente). Conforme analisado na seção 2.3.1, as topologias Buck e Buck-Boost atenderiam a especificação. Porém, por não haver necessidade de se elevar a tensão de entrada do conversor e, visando facilidade de implementação e eficiência, será escolhida a topologia Buck.[10]

3.3.2 Projeto do Circuito de Potência

Para o projeto do circuito de potência do conversor Buck, será considerada a operação do arranjo dos filmes OPV em 1000 *lux*, e seguida a metodologia descrita em [10].

Como visto na seção 2.3.1.1, a tensão de saída V_o do conversor, em regime permanente, é dada por [8]:

$$V_o = D.V_i \quad (3.1)$$

O menor *duty cycle* é resultado da condição em que a bateria está descarregada ($V_o = 6,4 V$) e o arranjo fotovoltaico se encontra em tensão de circuito aberto ($V_i = V_{oc} = 40,8 V$).

$$D_{min} = \frac{V_{Omin}}{V_{Imax}} = \frac{V_{Omin}}{V_{OC}} = \frac{6,4}{40,8} = 0,157 \quad (3.2)$$

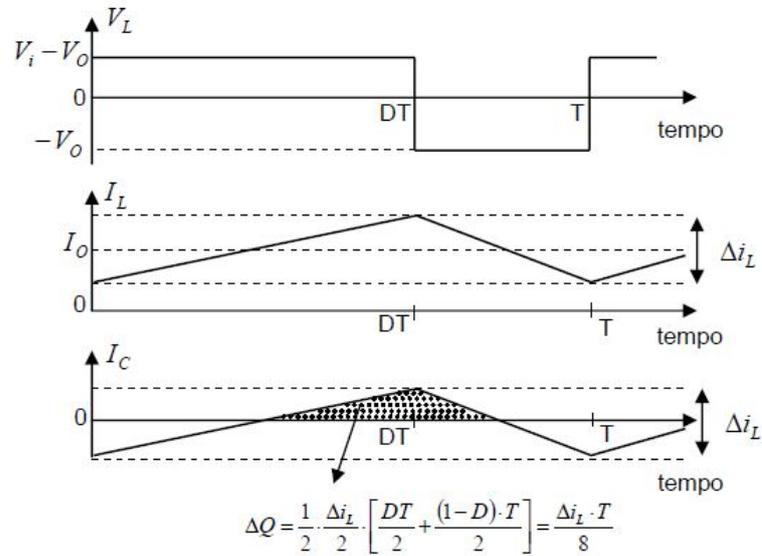
Considerando um conversor ideal, sem perdas no processo de conversão, toda a potência de entrada é convertida para a saída. A condição que resulta na maior corrente média de saída é com $P_{max} = 0,036$ e V_{Omin} .

$$I_{Omax} = \frac{P_{max}}{V_{Omin}} = \frac{0,036}{6,34} = 0,006 A \quad (3.3)$$

3.3.2.1 Cálculo do Indutor

Um conversor Buck operando em modo de condução contínuo (CCM), possui formas de onda conforme figura 15.

Figura 15 – Formas de onda de tensão e corrente do conversor Buck.



Fonte: [10]

Segundo [8], a ondulação da corrente no indutor é dada por:

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L}(1 - D)T_s \quad (3.4)$$

Em que L é o valor do indutor e T_s o período de chaveamento.

$$T_s = \frac{1}{f} \quad (3.5)$$

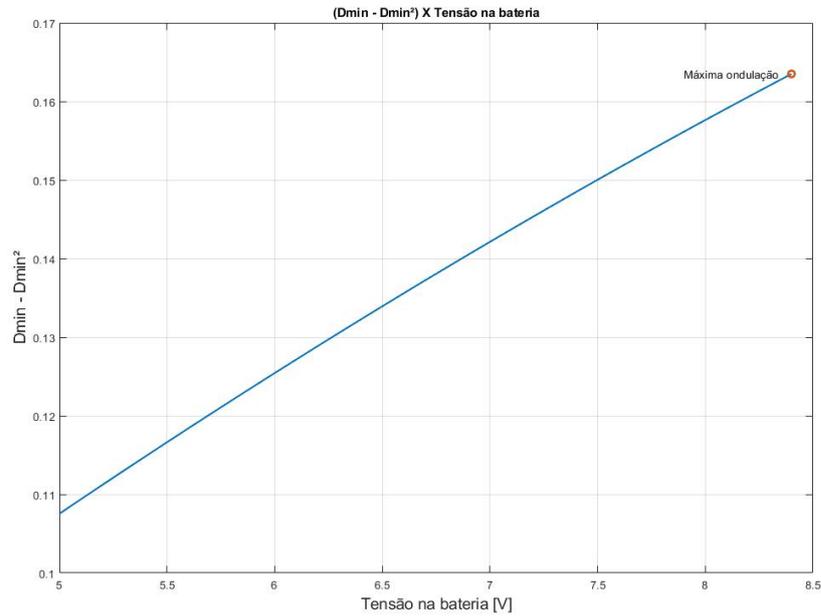
Substituindo 3.5 em 3.4, em que f é a frequência de chaveamento,

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L \cdot f}(1 - D) \quad (3.6)$$

Uma vez que o valor de V_o varia com D, substituindo 3.1 em 3.8 para descrever a maior ondulação de corrente [10], temos:

$$\Delta I_L = \frac{V_{I_{max}}}{L \cdot f}(D_{min} - D_{min}^2) \quad (3.7)$$

Onde a expressão $(D_{min} - D_{min}^2)$ deve ser a maior possível. De acordo com o gráfico da figura 16, o valor máximo para a expressão é 0,1635.

Figura 16 – $(D_{min} - D_{min}^2)$ em função da tensão na bateria.

Fonte: Elaborado pelo autor

Logo, a expressão para o indutor necessário é:

$$L = \frac{V_{I_{max}}}{\Delta I_L \cdot f} (D_{min} - D_{min}^2) \quad (3.8)$$

Pela equação 3.8, pode-se perceber que o valor do indutor é inversamente proporcional ao produto do *ripple* de corrente pela frequência de chaveamento. Uma vez que a corrente que passa pelo indutor é muito baixa, devido ao circuito operar em baixa potência, deve-se assumir valores altos tanto para a frequência quanto para o *ripple* aceitável, visando diminuir o valor da indutância L. Dito isso, foi escolhido $f = 500 \text{ KHz}$ e $\Delta I_L = 60\%$ de $I_{O_{max}}$.

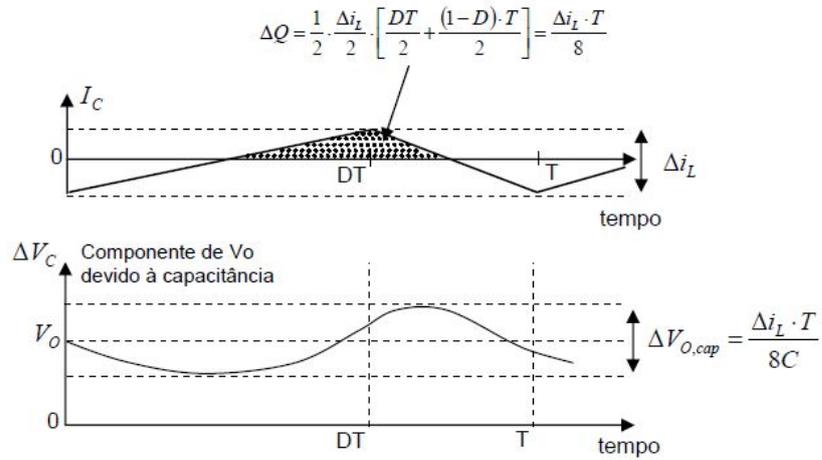
$$L = \frac{40,8 \cdot 0,1635}{0,6 \cdot 0,006 \cdot 500 \cdot 10^3} = 3,7 \text{ mH} \quad (3.9)$$

Percebe-se que, mesmo adotando um alto *ripple* de corrente e alta frequência de chaveamento, o valor do indutor ainda é muito elevado.

3.3.2.2 Cálculo do Capacitor de Saída

As equações descritas nesta seção assumem que a tensão de saída V_o é contínua, por isso, deve-se assumir um *ripple* de tensão de saída ΔV_o baixo. Será utilizado $\Delta V_o = 1\%$.

Figura 17 – Formas de onda de tensão e corrente no capacitor de saída do conversor Buck. Fonte:



Adaptado de [10]

De acordo com [8],

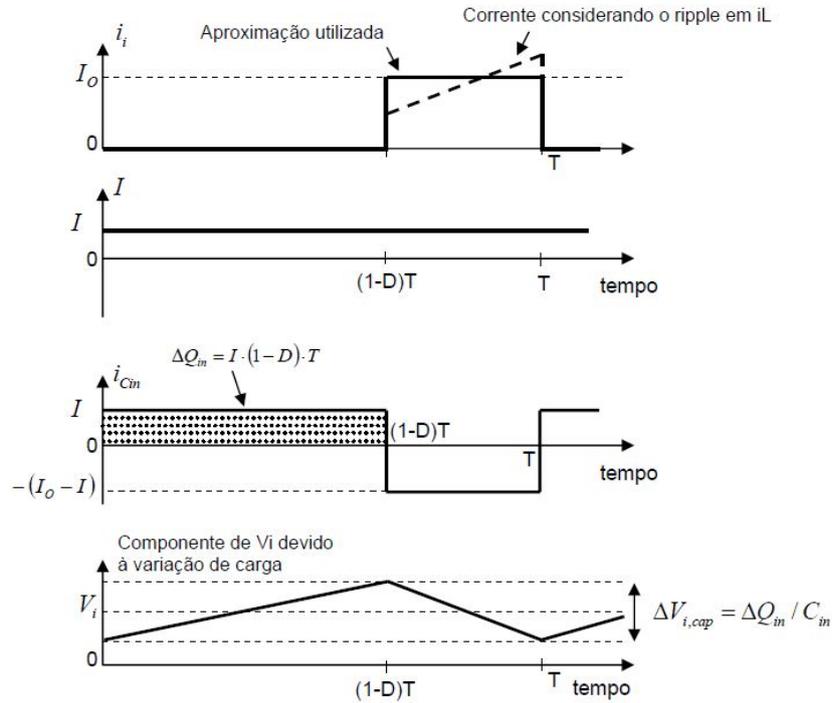
$$\Delta V_o = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C_o \cdot f} \quad (3.10)$$

$$C_o = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta V_o \cdot f} = \frac{0,6 \cdot 0,006}{8 \cdot 0,01 \cdot 6,4 \cdot f} = 14 \text{ nF} \quad (3.11)$$

3.3.2.3 Cálculo do Capacitor de Entrada

Nos momentos em que a chave não está conduzindo, o capacitor de entrada C_{in} é carregado. Nos momentos de chave fechada, a carga do capacitor fornece corrente que, somada à do arranjo fotovoltaico, resulta em I_L . [10]

Figura 18 – Formas de onda de tensão e corrente no capacitor de entrada do conversor Buck.



Fonte: Adaptado de [10]

A partir da análise da figura 18, podemos calcular C_{in} .

$$\Delta V_i = \frac{\Delta Q_{in}}{C_{in}} = \frac{I \cdot (1 - D)}{C_{in} \cdot f} \quad (3.12)$$

$$C_{in} = \frac{I \cdot (1 - D)}{\Delta V_i \cdot f} \quad (3.13)$$

Assumindo um $\Delta V_i = 5\%$ como aceitável, pela equação 3.14, a maior capacitância de entrada se dá para o menor valor de D e maior de I. Logo,

$$C_{in} = \frac{I \cdot (1 - D)}{\Delta V_i \cdot f} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - D_{min})}{0,005 \cdot 40,8 \cdot 500 \cdot 10^3} = 9,55 \text{ nF} \quad (3.14)$$

3.4 Simulação do Sistema

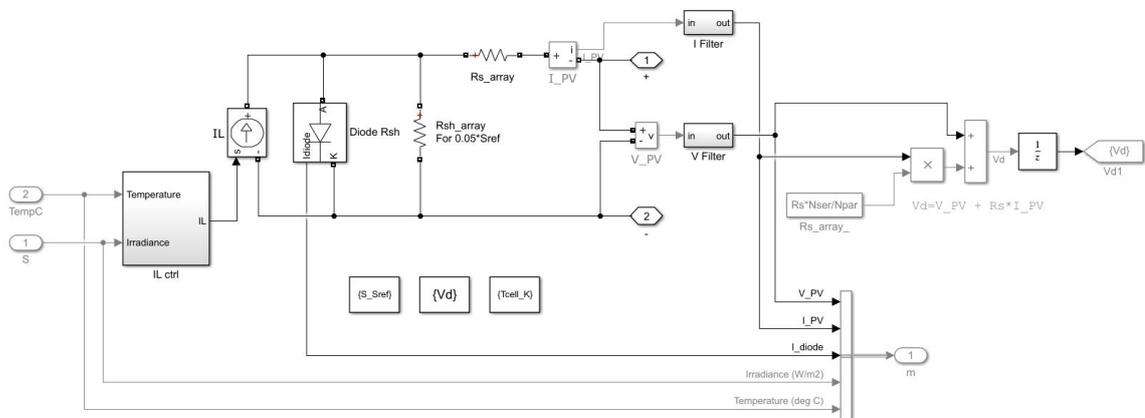
Com o objetivo de verificar o funcionamento do circuito proposto e validar os valores calculados na seção 3.3, foi elaborada uma simulação utilizando a extensão SIMULINK do software MATLAB.

3.4.1 Modelo do Painel OPV

Como pôde ser avaliado na figura 14, o comportamento de um filme fotovoltaico orgânico é o mesmo de outras tecnologias fotovoltaicas e pode ser modelada conforme visto no capítulo 2.

A própria biblioteca do SIMULINK possui um bloco, já implementado, com o circuito equivalente de um painel solar fotovoltaico, conforme figura 19.

Figura 19 – Modelo de um painel solar fotovoltaico da biblioteca do SIMULINK.

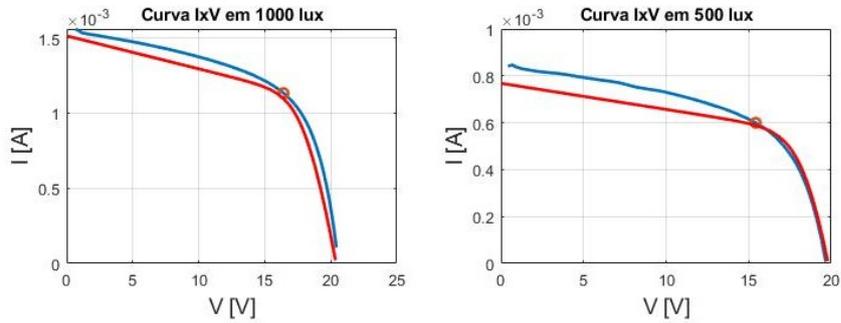


Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando a implementação da figura 19 com o modelo elétrico apresentado na figura 5, percebe-se que são semelhantes, logo, o modelo padrão da biblioteca poderá ser utilizado na simulação.

Os parâmetros do bloco foram alterados de acordo com os dados obtidos durante medição em *low-light*, resultando nas curvas em vermelho da figura 20.

Figura 20 – Curvas IxV simuladas em vermelho; Curvas IxV medidas em azul.



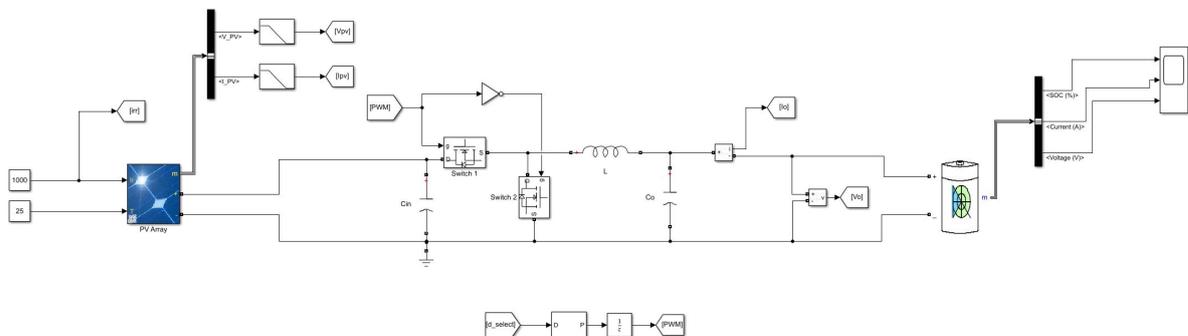
Fonte: Elaborado pelo autor

Por mais que as curvas medidas e simuladas diverjam para baixas tensões, nas proximidades do ponto de operação (MPP) as curvas são bem similares, logo, a aproximação do modelo para *low-light* poderá ser adotada.

3.4.2 Circuito de Potência

Uma vez que o circuito trabalha com baixos níveis de potência, a eficiência do conversor é bastante relevante. Com base em análises de design de conversores Buck [11], foi proposto uma topologia síncrona, substituindo o diodo por um MOSFET, sincronizado com o transistor de condução, evitando a perda de potência referente à queda de tensão no diodo. Desta forma, as duas chaves recebem o mesmo sinal PWM, porém, para a segunda chave, o sinal passa por uma porta *not*, o forçando a entrar em condução apenas quando a primeira chave estiver desligada.

Figura 21 – Topologia de Buck síncrono simulada.

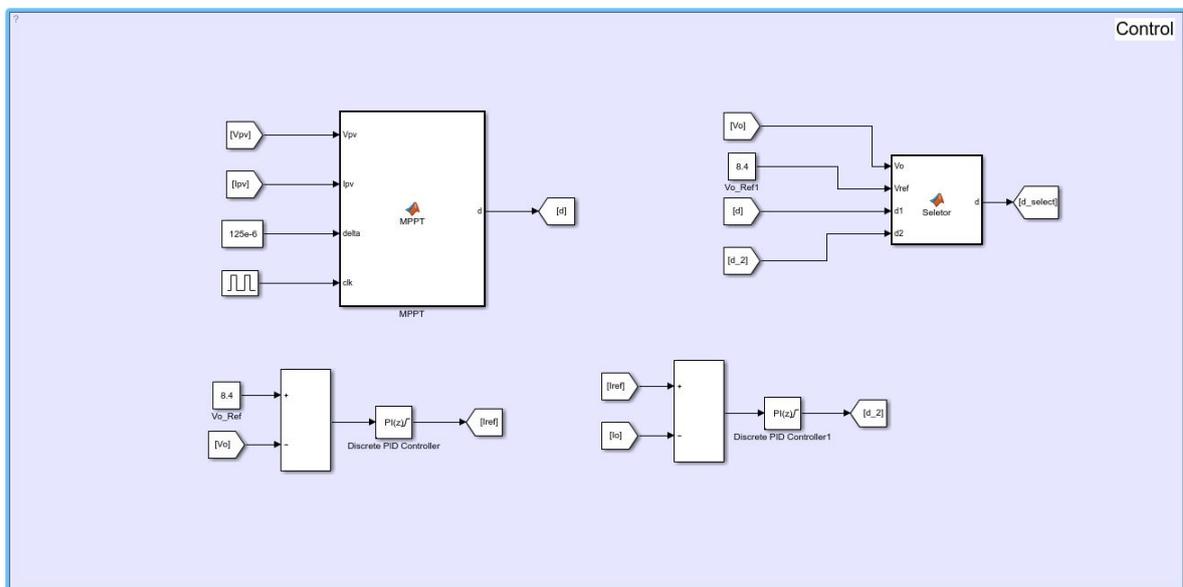


Fonte: Elaborado pelo autor

Para garantir que o arranjo fotovoltaico opere em seu ponto de máxima potência, foi elaborada uma lógica de controle que atua no *Duty-Cycle* do gerador de pulsos PWM aplicada aos transistores.

Junto ao controle MPPT, foi implementada uma malha de controle em cascata de corrente e tensão para garantir que o carregamento da bateria ocorra sem ultrapassar os limites de tensão e corrente. Porém, uma vez que os níveis de corrente são baixos, o arranjo fotovoltaico não será capaz de fornecer corrente acima da máxima de carregamento da bateria ($I_{BatMax} = 750\text{ mA}$), portanto, esse controle não é relevante, e servirá apenas para limitar a tensão de saída do conversor à máxima tensão da bateria.

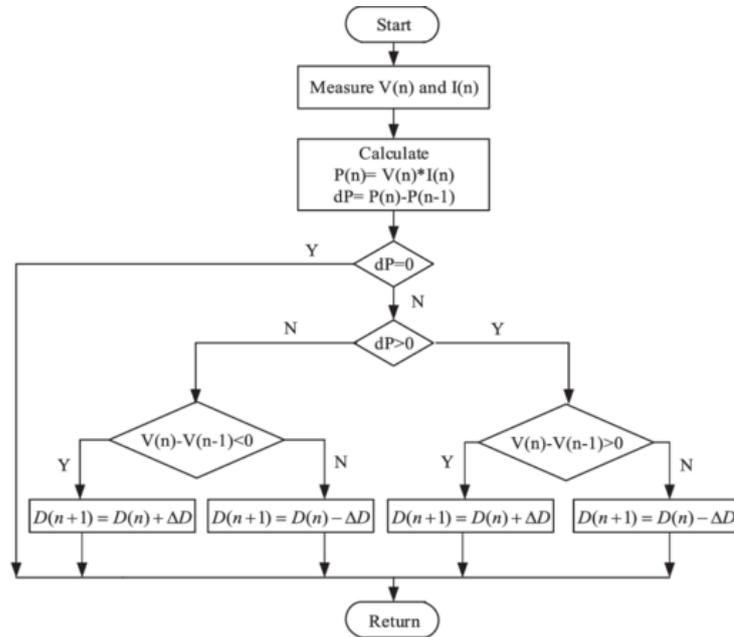
Figura 22 – Circuito de controle utilizado na simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor

O algoritmo MPPT utilizado segue implementação Perturba e Observa (PeO), conforme o diagrama da figura 23.

Figura 23 – Flowchart do método MPPT - Perturba e Observa.



Fonte: [12]

3.5 Cálculos de Perdas

Nesta seção, serão apresentadas as fórmulas utilizadas para se calcular as perdas associadas a cada componente do circuito de potência proposto.

3.5.1 Perdas nas Chaves MOSFET

A perda total nos transistores é associada a duas parcelas: Uma delas é referente à queda de tensão em sua resistência parasita entre *dreno-source* durante a condução, e a outra é a perda associada ao chaveamento, relativa à potência dissipada durante a subida e a descida da corrente no dreno e também à capacitância parasita do MOSFET.[10]

Segundo [11], as perdas no MOSFET podem ser calculadas por:

$$P_{cond} = I_d^2 \cdot r_{dson} \cdot D \quad (3.15)$$

$$P_{switch} = V \cdot \frac{I_D}{2} \cdot (T_{rise} + T_{fall}) \cdot f + (C_{oss} \cdot V^2 \cdot f) \quad (3.16)$$

Em que V é a tensão em cima da chave ($V = V_i - V_o$), T_{rise} e T_{fall} são os tempos de subida e de descida da corrente no dreno I_d , respectivamente, f a frequência de chaveamento, C_{oss} a capacitância parasita e r_{dson} a resistência *dreno-source*.

3.5.2 Perdas no Indutor

As perdas dissipadas no indutor também possuem duas origens: Perdas magnéticas no núcleo e perdas no cobre.

As perdas no cobre dependem da resistência de seu enrolamento, que pode ser calculada por:

$$P_{cobre} = r_{cobre} \cdot I_L^2 \quad (3.17)$$

Já as perdas magnéticas no núcleo são de difícil estimação, uma vez que as informações geralmente não estão disponibilizadas pelos fabricantes, se fazendo necessário ensaiar o núcleo que se pretende utilizar. Portanto, as perdas magnéticas serão desprezadas neste trabalho.

3.5.3 Perdas no Capacitor de Saída

As perdas no capacitor de saída são referentes à dissipação de potência em sua resistência parasita ESR (*Effective Series Resistance*) ao filtrar o *ripple* de corrente de saída. [11]

$$P_{Co} = \Delta I_o^2 \cdot ESR_{Co} \quad (3.18)$$

3.5.4 Perdas no Capacitor de Entrada

Semelhante ao capacitor de saída, as perdas no capacitor de entrada são referentes à dissipação de potência em sua resistência parasita ao filtrar a corrente de entrada.

$$P_{Ci} = \Delta I_L^2 \cdot ESR_{Ci} \quad (3.19)$$

3.6 Seleção de Componentes

Com o objetivo de se minimizar as perdas no conversor, que são extremamente relevantes em um circuito que opera em baixa potência, nesta seção serão selecionados os componentes que apresentam menores perdas conforme equações descritas em 3.5.

3.6.1 Seleção do MOSFET

No projeto em questão, as perdas de chaveamento são mais relevantes do que as perdas de condução, uma vez que, por se tratar de um conversor pra baixa potência, a corrente que passa pela chave é muito baixa e a frequência de chaveamento é relativamente alta. Dito isso, e analisando as equações 3.15 e 3.16, a escolha do MOSFET se deu pela busca por componentes que apresentassem, prioritariamente, rápidos tempos de subida e descida, baixa capacitância parasita C_{oss} e também pequeno valor de resistência r_{dson} .

Tabela 4 – Parâmetros relevantes do MOSFET selecionado.

MOSFET		
Marca	ON Semiconductor	
Modelo	BSS138	
R_{dson}	1	Ω
T_{rise}	9,00E-09	s
T_{fall}	7,00E-09	s
C_{oss}	1,30E-11	F

3.6.2 Seleção do Indutor

Selecionar o indutor para os valores de potência e indutância em questão é uma das partes mais delicadas do projeto. Primeiramente, foi definido que seria utilizado um núcleo de Ferrite, com densidade máxima de fluxo $B_{max} = 0,25 T$, valor recomendado para projeto, por estar em uma faixa mais linear da curva de magnetização do material[10].

O produto da área efetiva A_e do indutor pela janela disponível para o enrolamento A_w é definido por:

$$A_e \cdot A_w = \frac{L \cdot I_{Lpico} \cdot I_{rms} \cdot 10^4}{B_{max} \cdot J_{max} \cdot F_u} \quad (3.20)$$

onde:

$$I_{Lpico} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = I_o + \frac{V_o \cdot (1 - D)}{2 \cdot L \cdot f} \quad (3.21)$$

$$I_{Lrms} = I_o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta I_L}{2I_o} \right)^2} = I_o \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{V_o(1-D)}{2fLI_o} \right)^2} \quad (3.22)$$

Utilizando um valor comum para o fator de ocupação $F_u = 0,7$ e considerando uma densidade de corrente no condutor $J_{max} = 300 A/cm^2$, foi calculado o produto entre as áreas:

$$A_e \cdot A_w = \frac{3,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0075 \cdot 0,0061 \cdot 10^4}{0,25 \cdot 300 \cdot 0,7} = 3,22 \cdot 10^{-5} cm^4 \quad (3.23)$$

Foi então selecionado o núcleo encontrado com menor área efetiva, o modelo YM40502TC da Magnetics.

Tabela 5 – Parâmetros relevantes do indutor selecionado.

Indutor		
Marca	Magnetics	
Modelo	YM40502TC	
J_{max}	300	$\frac{A}{cm^2}$
F_u	0,7	
L	3,70E-03	H
B_{max}	0,25	T
$I_{Lpicomax}$	0,0075	A
I_{Lrms}	0,0061	A
$A_e \cdot A_w$ calculado	3,22E-05	cm^4
A_e	0,0105	cm^2
N calculado	105,71	
N considerado	106,00	

Após selecionado a área efetiva do núcleo, foi possível calcular o número de espiras N necessário.

$$N = \frac{L \cdot I_{Lpico} \cdot 10^4}{B_{max} \cdot A_e} = 105,71 \sim 106 \quad (3.24)$$

Devido à alta frequência de chaveamento f , é necessário levar em consideração o efeito pelicular[10], que descreve a distribuição da corrente nas extremidades do condutor, reduzindo sua área efetiva. A profundidade de penetração pode ser calculada por:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f}} \quad (3.25)$$

Para o projeto em questão:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{500 \cdot 10^3}} = 0,01 \text{ cm} \quad (3.26)$$

Segundo apresentado em [10], o diâmetro do condutor deve ser menor do que $2\Delta = 0,02 \text{ cm}$.

A área do condutor pode ser calculado por 3.27.

$$A_{cond} = \frac{I_{Lrms}}{J_{max}} = \frac{0,0061}{300} = 2,03 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \quad (3.27)$$

Que resulta em um diâmetro de condutor de $0,005 \text{ cm}$. Logo, pode ser utilizado um condutor AWG 40, que possui diâmetro $0,0079 \text{ cm}$ e resistividade $\rho = 0,034 \frac{\Omega}{\text{cm}}$, satisfazendo a condição de ser inferior a 2Δ .

Com isso, encontra-se a resistência do enrolamento de cobre utilizando a dimensão l do indutor selecionado.

$$r_{\text{cobre}} = l \cdot N \cdot \rho \quad (3.28)$$

3.6.3 Seleção do Capacitor de Saída

Com o intuito de minimizar perdas, foi selecionado um capacitor MCC (*Multilayer ceramic capacitor*) com baixo ESR.

Tabela 6 – Parâmetros relevantes do capacitor de saída.

Capacitor de Saída		
Marca	TDK	
Modelo	CGA3E2C0G1H272J080AA	
C	2,7	nF
Tensão	50	V
ESR em 500 KHz	0,565	Ω

3.6.4 Seleção do Capacitor de Entrada

O capacitor de entrada foi selecionado seguindo os mesmos critérios do capacitor de saída.

Tabela 7 – Parâmetros relevantes do capacitor de entrada.

Capacitor de entrada		
Marca	TDK	
Modelo	CGA3E2X7R1H103M080AA	
C	10	nF
Tensão	50	V
ESR em 500 KHz	0,391	Ω

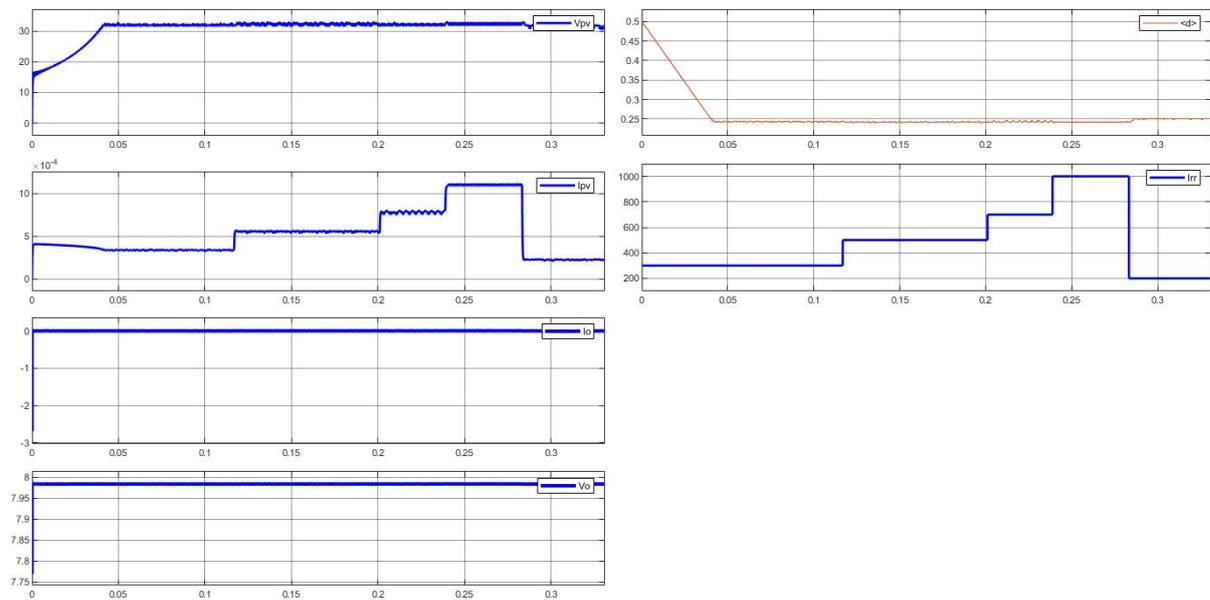
4 Resultados e Discussão

Neste capítulo será apresentado o comportamento da simulação proposta na seção 3.4 e os resultados de potência dissipada atingidos, bem como discussões a respeito da implementação.

4.0.1 Comportamento da Simulação

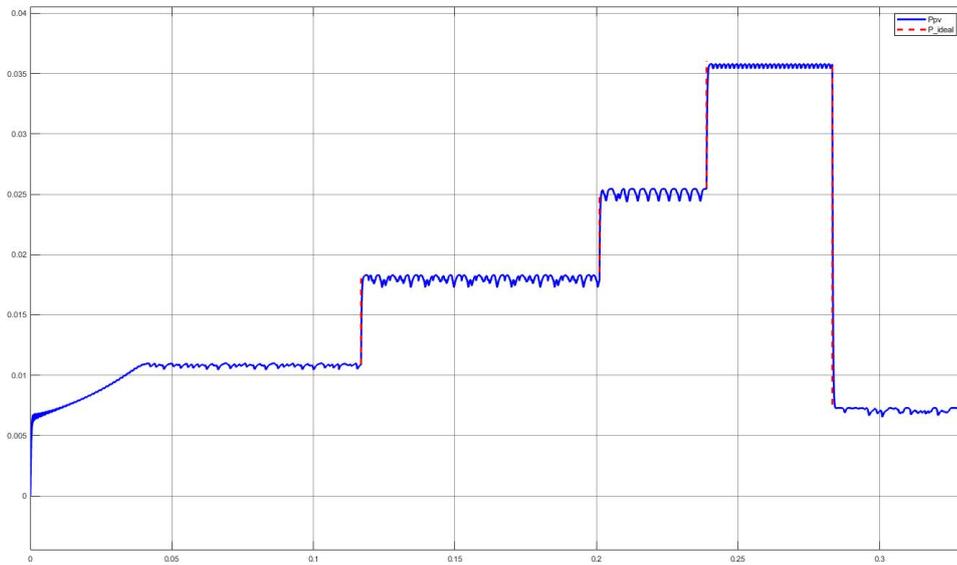
Para verificar o correto dimensionamento dos componentes do circuito de potência e a lógica de controle MPPT, foram gerados os gráficos a seguir. A simulação foi realizada com a bateria com 60% de carga inicial e valores de iluminação incidentes no arranjo fotovoltaico de 200, 500, 700 e 1000 lux.

Figura 24 – Curvas de tensão e corrente do arranjo fotovoltaico, na saída do conversor, curva de irradiação e *duty-cycle*.



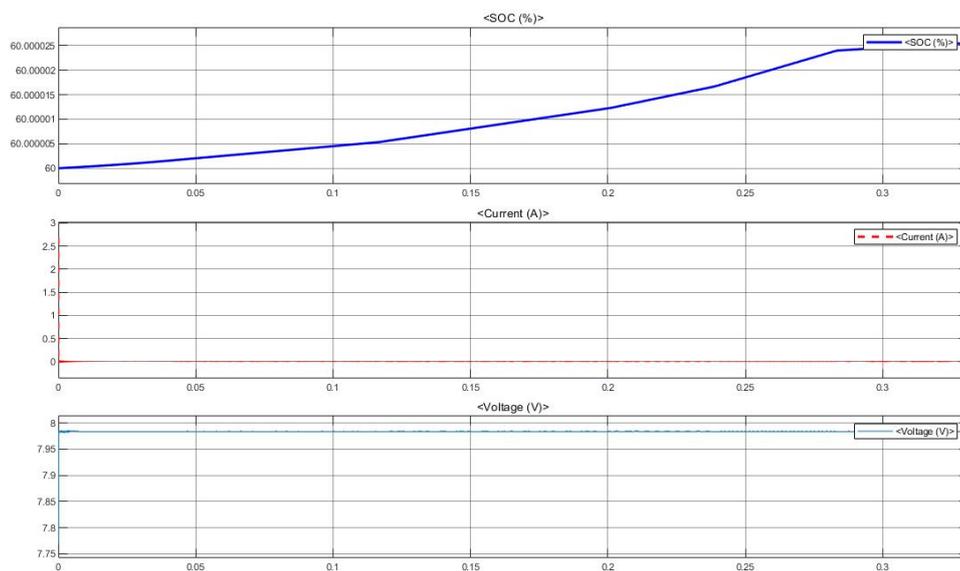
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 – Curvas de potência do arranjo fotovoltaico e curva de potência ideal.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Curvas de tensão, corrente e SOC (*State of Charge*) na bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nas curvas simuladas da figura 24, pode-se verificar que o arranjo fotovoltaico opera na tensão V_{max} esperada, de aproximadamente 32 V, para todos os valores de irradiação, indicando operação no ponto de máxima potência. Isso pode ser confirmado

confirmado na figura 25, onde se verifica que a potência dos módulos fotovoltaicos segue bem a curva ideal de potência para cada nível de irradiação simulado.

Na figura 26, é possível perceber o nível de carga da bateria (SOC) em crescimento, ainda que lentamente, indicando o carregamento da mesma.

4.0.2 Potência Dissipada nos Componentes Seleccionados

Realizando os cálculos descritos na seção 3.5 com base nos valores seleccionados na seção 3.6, foi possível determinar a potência dissipada em cada um dos componentes:

Tabela 8 – Potência dissipada em cada componente, considerando operação em 1000 lux e tensão na bateria 6,4V

C_{in}	$4,45 \cdot 10^{-12}$	W
L	$1,23 \cdot 10^{-4}$	W
MOSFET 1	$3,99 \cdot 10^{-3}$	W
C_o	$6,44 \cdot 10^{-12}$	W
MOSFET 2	$3,99 \cdot 10^{-3}$	W
P_{total}	$8,09 \cdot 10^{-3}$	W

Tabela 9 – Potência dissipada em cada componente, considerando operação em 500 lux e tensão na bateria 6,4V

C_{in}	$1,11 \cdot 10^{-12}$	W
L	$3,19 \cdot 10^{-5}$	W
MOSFET 1	$3,88 \cdot 10^{-3}$	W
C_o	$1,61 \cdot 10^{-12}$	W
MOSFET 2	$3,88 \cdot 10^{-3}$	W
P_{total}	$7,79 \cdot 10^{-3}$	W

A partir dos resultados das tabelas 8 e 9, pode-se calcular a eficiência do conversor para as duas condições estudadas, conforme equação 4.1.

$$\eta = 1 - \frac{P_{total}}{P_{max}} \quad (4.1)$$

$$\eta_{1000} = 1 - \frac{8,09 \cdot 10^{-3}}{0,036} = 78\% \quad (4.2)$$

$$\eta_{500} = 1 - \frac{7,79 \cdot 10^{-3}}{0,018} = 57\% \quad (4.3)$$

É possível perceber que a maior parcela das perdas do conversor se encontra nos transistores, devido, principalmente, às perdas por chaveamento.

Analisando em termos de energia, a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico ao longo do dia, é o produto entre a potência de saída do conversor e o tempo de funcionamento.

$$E = P_o \cdot t \frac{Wh}{dia} \quad (4.4)$$

Para cada situação, temos:

$$E = P_{max} \cdot \eta \cdot t \quad (4.5)$$

Assumindo um tempo conservador de irradiação constante para 1000 e 500 lux de $t = 8 h$ e, levando em consideração o consumo da carga definido em 3.1, é possível avaliar se o sistema proposto é possível de ser implementado.

Tabela 10 – Comparativo de energia gerada e consumida por dia para 1000 e 500 lux, para $t = 8 h$

	1000 lux	500 lux	
P_o	0,0279	0,0102	W
E_o	0,223	0,0817	Wh
E_{carga}	0,040	0,040	Wh
ΔE	0,183	0,0417	Wh
$\Delta E\%$	82%	51%	

5 Conclusões

Os gráficos expostos na seção 4.0.1 demonstram o comportamento esperado, seguindo a curva de máxima potência teórica para diversos valores de iluminação, proporcionando o carregamento da bateria, ainda que lento, devido à baixa potência de saída do conversor.

Foi possível perceber, a partir da análise do capítulo 4, que o circuito de potência do conversor apresentou eficiência bem abaixo do que normalmente ocorre, principalmente, em aplicações fotovoltaicas, em que a eficiência dos conversores costuma ser sempre superior a 90%. Porém, apesar de pouco eficiente, atende à demanda de energia da carga considerada, mesmo em um cenário conservador, assumindo 8h de iluminação constante.

Os excedentes de energia gerada para o melhor caso, de 82% e para o pior caso de 52%, apontam para a possibilidade de se reduzir o tamanho do módulo OPV ou do arranjo fotovoltaico, o que impactaria bastante no custo da solução, uma vez que a tecnologia OPV ainda possui preços bastante elevados.

Com isso, conclui-se que a topologia proposta pode ser implementada, desde que os circuitos de *driver* e de controle, que não foram abordados neste estudo, não dissipem energia além dos excedente dispostos na tabela 10.

6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão de continuidade do estudo, sugere-se:

- Avaliar implementação de circuitos de *driver* para o conversor proposto;
- Avaliar implementação de um circuito discreto para o controle MPPT do conversor proposto;
- Estudar a utilização de outros transistores visando aumento de eficiência do conversor
- Comparar desempenho de outras tecnologias fotovoltaicas para a aplicação *indoor* estudada;
- Avaliar experimentalmente as perdas do conversor proposto;
- Propor diferentes topologias para a aplicação estudada.

Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick, and K. Krane, *Física*, ~. 5• ed, 2004. Citado na página 13.
- [2] C. Carvalho and N. Paulino, “On the feasibility of indoor light energy harvesting for wireless sensor networks,” *Procedia Technology*, vol. 17, pp. 343–350, 2014. Citado na página 13.
- [3] S. Kim, M. Jahandar, J. H. Jeong, and D. C. Lim, “Recent progress in solar cell technology for low-light indoor applica-tions.” Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 16.
- [4] D. Batista, L. B. Oliveira, N. Paulino, C. Carvalho, J. P. Oliveira, J. Farinhas, A. Charas, and P. M. dos Santos, “Combined organic photovoltaic cells and ultra low power cmos circuit for indoor light energy harvesting,” *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1803, 2019. Citado na página 17.
- [5] ECycle, “Componentes do sistema solar fotovoltaico: controladores de carga.” [Online]. Available: <http://www.ecycle.com.br/component/content/article/69-energia/\3385-controladores-carga-solar-termica-fotovoltaicas-como-funciona-captacao-kit-geracao-\energia-eletrica-eletricidade-vantagem-fontes-renovavel-limpa-meio-ambiente-eficiencia-\sustentavel-onde-c> Citado na página 18.
- [6] S. Bandyopadhyay and A. P. Chandrakasan, “Platform architecture for solar, thermal, and vibration energy combining with mppt and single inductor,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, no. 9, pp. 2199–2215, 2012. Citado na página 19.
- [7] K. Woods, F. Ashrafzadeh, and H. Rathnayake, “Organic solar cell energy harvesting, control, optimization, and commerialization—challenges and opportunities,” in *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, 2013, pp. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- [8] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. John wiley & sons, 2003. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 26, 27 e 29.
- [9] B. Minnaert and P. Veelaert, “A proposal for typical artificial light sources for the characterization of indoor photovoltaic applications,” *Energies*, vol. 7, no. 3, pp. 1500–1516, 2014. Citado na página 24.

-
- [10] J. I. L. Seguel, “Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica mppt e controle digital,” Master’s thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Citado 7 vezes nas páginas [26](#), [27](#), [29](#), [30](#), [34](#), [36](#) e [37](#).
- [11] A. Rights, B. Converter, and D. Example, “Buck Converter Design Example,” pp. 1–17, 2006. Citado 3 vezes nas páginas [32](#), [34](#) e [35](#).
- [12] A. Gupta, Y. K. Chauhan, and R. K. Pachauri, “A comparative investigation of maximum power point tracking methods for solar pv system,” *Solar energy*, vol. 136, pp. 236–253, 2016. Citado na página [34](#).