

Análise de Célula Fotovoltaica para Aumento de Autonomia de Voo de VANTS

Amanda Stage dos Santos



Análise de Célula Fotovoltaica para Aumento de Autonomia de Voo de VANTS

Aluno(a): Amanda Stage dos Santos

Orientador: Eduardo Costa da Silva

Trabalho requerido para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

Quero muito agradecer primeiramente a mim mesma por não ter desistido.

Agradeço especialmente a minha mãe, Márcia Stage, por todo apoio, incentivo e amor que sempre me deu. Agradeço a minhas avós, Percyvanda Stagi e Vilma dos Santos, ao meu avô, Fúlvio Stagi, ao meu irmão, Pedro Stage, e a minha namorada, Suellen Góes, pois todos de alguma forma foram essenciais pra que eu acreditasse na minha capacidade.

Agradeço ao meu orientador, professor Eduardo Costa da Silva, por todo o conhecimento e aprendizado que proporcionado, não apenas para a realização desses trabalhos como também ao longo dos últimos 3 anos. Gostaria de agradecer aos meus orientadores da primeira iniciação científica, Gustavo Amaral, Pedro Tovar e Guilherme Temporão, e aos colegas do laboratório de optoeletrônica, Felipe Calliari e Breno Perlingeiro, por todos os trabalhos que desenvolvemos juntos e pelos ensinamentos muito que vão além do que aprendemos em sala de aula.

Aos meus amigos Rodrigo Camargo e Mike Valente que, em momentos diferentes do curso, foram minha dupla de estudos e trabalhos, e amigos que tenho certeza que posso contar pra tudo, muito obrigada. Agradeço também aos meus amigos da época de escola, Pedro Paulo Souza e Bruna Leticia Seixas, e aos amigos feitos ao longo da faculdade Matheus Santana, Nicole Lopes, Leonardo Rocha, Daniel Luca, Erico Lopes, Victoria Palhares, por todos os momentos de estudos, trabalho e principalmente os de descontração.

Análise de Célula Fotovoltaica para Aumento de Autonomia de Voo de VANTs

Resumo

Os veículos aéreos não tripulados, conhecidos como VANTs, estão cada vez mais sendo usados nas mais diversas aplicações, da agricultura ao setor militar. Porém, seus curtos tempos de voo, limitados pela duração das baterias, ainda são um fator limitante para algumas aplicações. Atualmente, o desenvolvimento da tecnologia de células fotovoltaicas tem possibilitado que as mesmas tornem-se cada vez mais leves e flexíveis, possibilitando o emprego dessas em VANTs, por exemplo. Para tanto faz-se necessário o uso de um circuito intermediário que permita que a célula solar seja capaz de carregar a bateria de um VANT em voo.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta um estudo sobre células fotovoltaicas, começando pela história desde sua criação até os dias de hoje, seguindo para a apresentação das características e funcionamento de uma célula solar genérica e passando para avaliação experimental do comportamento de um modelo específico de célula (RC7.2). Por fim, foram feitas análises de circuitos destinados ao carregamento de baterias de LiPO através de energia fotovoltaica, por meio de simulações computacionais.

Palavras-chave: célula fotovoltaica, célula solar, VANT, bateria de LiPO

Photovoltaic Cell Analysis for Increased Flight Autonomy of UAVs

Abstract

Unmanned aerial vehicles, commonly known as UAVs, are increasingly being used in various applications, from agriculture to the military sector. However, their short flight times, limited by battery life, are still a limiting factor for some applications. Nowadays, the development of photovoltaic cells technology has made them lighter and more flexible, enabling the use of these devices in UAVs, for example. Therefore, it is necessary to use an intermediate circuit allowing the solar cell to charge the battery during the flight.

Thus, the current work shows a study on photovoltaic cells, beginning with their history from its creation to the present days, following by the description of main characteristics and operation of a generic solar cell and experimental evaluation of the behavior of a specific model (RC7.2). Finally, there were performed analysis of circuits for charging LiPO batteries by means of photovoltaic energy through computational simulations.

Keywords: photovoltaic cell, solar cell, UAV, LiPO battery

Lista de Figuras

1	Estrutura de Uma Célula Fotovoltaica Comercial	3
2	Representação Esquemática do Circuito Elétrico de uma Célula Fotovoltaica	3
3	Gráficos de Corrente x Tensão e Potência x Tensão de Uma Célula Fotovoltaica	4
4	Gráficos de Corrente x Tensão - Datasheet	6
5	Setup para Caracterização da Célula Fotovoltaica RC7.2	7
6	Gráficos de Corrente x Tensão	8
7	Gráficos de Potência X Resistência	8
8	Resultados Medida 1	12
9	Resultados Medida 2	13
10	Resultados Medida 3	14
11	Circuito Utilizado no Experimento	16
12	Montagem do Experimento	16
13	Varição ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 1	18
14	Varição ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 2	18
15	Varição ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 3	19
16	Varição ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 4	19
17	Varição ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 5	20
18	Simulação da Célula Fotovoltaica no LTSpice	22
19	Simulação da Bateria no LTSpice	22
20	Simulação do Carregamento de Bateria 1s - CI LT3652	23
21	Simulação do Carregamento de Bateria 3s - CI LTC3119	24
22	Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 1s - CI LT3652	26
23	Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 2s - CI LTC3119	26
24	Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 3s - CI LTC3119	27
25	Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 4s - CI LTC3119	27

Lista de Tabelas

1	Condições Iniciais por Medida - Caracterização	7
2	Resultado das Medidas x Especificação do Datasheet	9
3	Variação de Temperatura na Cidade do Rio de Janeiro	10
4	Condições Iniciais por Medida - Medida Curta	11
5	Comparação Entre as 3 Medidas de Potência Gerada e Intensidade de Irradiação Solar	15
6	Condições Iniciais por Medida - Medida Completa	17
7	Tensão e Status da Bateria por Quantidade de Células	21

Sumário

1	Introdução	1
a	Motivação	1
b	Objetivo	1
2	A Célula Fotovoltaica	2
a	A História	2
b	O Efeito Fotovoltaico	2
c	Características de Uma Célula Fotovoltaica	3
3	Características da Célula Fotovoltaica RC7.2	6
a	Método de Caracterização	6
1	Resultados	7
4	Varição ao Longo do Tempo de Geração da Célula Fotovoltaica	11
a	Medidas Curtas	11
1	Resultados	11
2	Comparação: Valores Medidos x Valores Calculados	15
b	Medida Diária	15
1	O Circuito	16
2	A Programação do Arduino	17
3	Resultados	17
5	Bateria	21
6	Simulação do Circuito de Carregamento da Bateria	22
a	A Célula Solar no LTSpice	22
b	A Bateria no LTSpice	22
c	CI LT3652	23
d	CI LTC3119	24
e	Resultados da Simulação	25
7	Conclusão	28
a	Trabalhos Futuros	28
A	Apêndice	30
a	Códigos Arduino	30
1	Código de Inicialização	30
2	Código Principal	30

1 Introdução

a Motivação

VANTs (veículo aéreo não tripulado) são definidos como: “veículos capazes de voar na atmosfera, fora do efeito de solo, que foram projetados ou modificados para não receber um piloto humano e que são operados por controle remoto ou autônomos”. As aplicações possíveis para tais veículos são comumente limitadas pela curta duração das baterias empregadas, sendo que, mesmo utilizando-se baterias de alta densidade energética, como as de lítio-polímero (LiPo), o tempo de autonomia de voo normalmente não consegue ultrapassar poucas horas.

Uma maneira de aumentar o tempo de autonomia de voo destas aeronaves é utilizando células fotovoltaicas para recargar da bateria durante o voo. Com os recentes avanços no campo da energia fotovoltaica foram desenvolvidas células fotovoltaicas leves e flexíveis, permitindo o emprego destas em algumas aeronaves de teste. Em tais aeronaves, seriam acoplados conjuntos de células solares responsáveis por recarregar as baterias que fornecem energia para os motores elétricos. Como o incremento do peso total da aeronave reduz a autonomia de voo, é importante garantir que estas células sejam as mais leves possíveis. Além disso, a utilização de células flexíveis possibilita uma melhor distribuição das mesmas ao longo das asas da aeronave, por possibilitar que as células fotovoltaicas possam ser aderidas ao longo de curvaturas da asa.

b Objetivo

O presente estudo pretende contribuir para o aumento da autonomia de voo do VANT por meio de emprego de células fotovoltaicas. Foram realizados estudos de caracterização de células solares, análise do comportamento de geração da célula fotovoltaica ao longo de um dia e simulações do projeto de desenvolvimento de circuitos eletrônicos destinados a recarga de baterias de lítio-polímero.

2 A Célula Fotovoltaica

a A História

A conversão de energia solar em energia elétrica, o chamado efeito fotovoltaico, foi observada pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel. Ele verificou, ao expor uma estrutura semicondutora à luz, que havia uma pequena diferença de potência nas suas extremidades.

No início do século XX, os estudos sobre energias fotovoltaicas foram impulsionados. Isso se deu devido ao advento da mecânica quântica, mais precisamente com a explicação do funcionamento do efeito fotoelétrico, e da teoria das bandas, além do surgimento de técnicas de dopagem de semicondutores.

Em 1953, Calvin Fuller, químico do Bell Labs, desenvolveu uma técnica para controlar as propriedades elétricas do silício através da dopagem. Junto ao físico Gerald Pearson, também da Bell Labs, produziram uma junção P-N de silício. Posteriormente, Pearson notou que quando a amostra era exposta à luz, produzia-se uma corrente elétrica. Essa foi a primeira célula fotovoltaica de silício produzida, com cerca de 4% de conversão de energia solar em energia elétrica, eficiência superior a encontrada em células fotovoltaicas de selênio, produzidas anteriormente.

Com ajuda do engenheiro Daryl Chapin, os processos de dopagem do silício tipo p e do tipo n foram alterados de modo a melhorar a eficiência da célula e a facilitar a soldagem (com a soldagem simplificada, reduziu-se a resistência-série da célula). À vista disso as células fotovoltaicas, na época, chegaram a uma eficiência de 6% de conversão de energia.

Ainda assim, a baixa eficiência das células e o alto custo de produção tornavam a sua utilização inviável, exceto para casos específicos em que o custo de produção não era um fator limitante, como por exemplo o fornecimento de energia para satélites no espaço.

Já em 1973, com a crise do petróleo, o interesse por novas alternativas de fonte de energia impulsionou as pesquisas na área de energia fotovoltaica para aplicações diversas.

Nas décadas seguintes, com a consciência das ameaças das alterações climáticas, governos de países mais desenvolvidos passaram a investir em programas de financiamento para energia fotovoltaica. Por exemplo, os programas de telhados solares da Alemanha e do Japão, além da instalação da primeira central de grande porte na Califórnia, com capacidade de geração pico de 1 MW.

Neste momento, a pesquisa na área de células fotovoltaicas está voltada para as chamadas células de 3ª geração, com maior eficiência e custos mais baixos do que as células de silício (2ª geração) utilizadas atualmente. Para a 3ª geração estão sendo desenvolvidas células com tecnologias diversificadas como, por exemplo, células orgânicas, células solares sensibilizadas por corrente e células solares baseadas em pontos quânticos. No entanto, ainda não é possível encontrar no mercado nenhuma dessas.

b O Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores e é caracterizado pelo surgimento de uma tensão elétrica causada ao expor o material à luz visível.

Os materiais semicondutores têm características similares aos materiais isoladores: banda de valência totalmente preenchida por elétrons enquanto a banda de condução é totalmente vazia. Já diferença entre ambos os tipos de materiais está na energia de separação entre banda de valência e banda de condução (gap). O gap de materiais isolantes tem ordem de 6eV e o gap de materiais semicondutores tem ordem de 1eV. Isto é, é necessária energia muito menor em materiais semicondutores para que um elétron passe da camada de valência para a camada de condução, permitindo que uma corrente elétrica seja conduzida no material.

O átomo de silício, material mais utilizado para fabricação de células fotovoltaicas, em estado puro possui 4 elétrons na camada de valência e se conecta com outros 4 átomos de silício formando uma estrutura cristalina tetraédrica. Dessa forma, todas as ligações estão completas e a estrutura comporta-se como um isolador, pois não possui elétrons livres na última camada.

Para que a estrutura formada por átomos de silício passe a ser um semicondutor, acrescentam-se à estrutura elementos com 3 ou 5 elétrons na última camada, esse processo é denominado de dopagem. Ao acrescentar elementos com 3 elétrons na última camada, faltará 1 elétron na estrutura formada, portanto esse material terá carga positiva (tipo P). Por outro lado, se for acrescentado à estrutura de silício um elemento com 5 elétrons na última camada, o material terá 1 elétron livre, formando um material de carga negativa (tipo N).

Ao juntar materiais semicondutores do tipo P com materiais de estrutura tipo N, forma-se a junção P-N. Comumente os processos de dopagem do silício para fabricação de células fotovoltaicas utilizam fósforo, obtendo material tipo N, e boro, obtendo material tipo P.

c Características de Uma Célula Fotovoltaica

A célula solar comercializada tem a estrutura conforme mostra a Figura 1 [1].

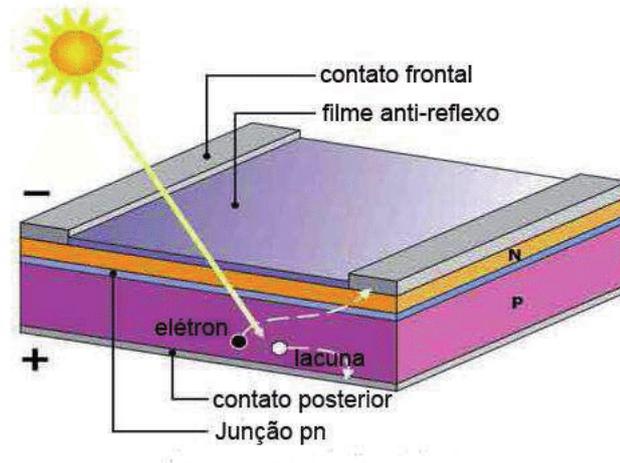


Figura 1: Estrutura de Uma Célula Fotovoltaica Comercial

- Contatos Frontal e Posterior - são contatos ôhmicos entre uma parte da junção P-N e um material metálico. O contato frontal, também chamado de grelha, é o terminal negativo da célula fotovoltaica, enquanto o contato posterior é o terminal positivo;
- Filme Antirreflexo - reduz a reflexão da radiação incidente para valores de 5%. Sem a camada antirreflexo a radiação refletida chega a $\frac{1}{3}$ do total da radiação incidente;
- Junção P-N - formada por uma fina camada, aproximadamente 300 nm, de material tipo N (silício dopado com fósforo) e uma espessa camada, aproximadamente 250 μm , de material tipo P (silício dopado com boro).

Na Figura 2 está representado o modelo esquemático do circuito elétrico de uma célula fotovoltaica, onde a fonte de corrente representa a corrente gerada pela radiação luminosa, o diodo representa a junção P-N e a resistência R_C a carga externa.

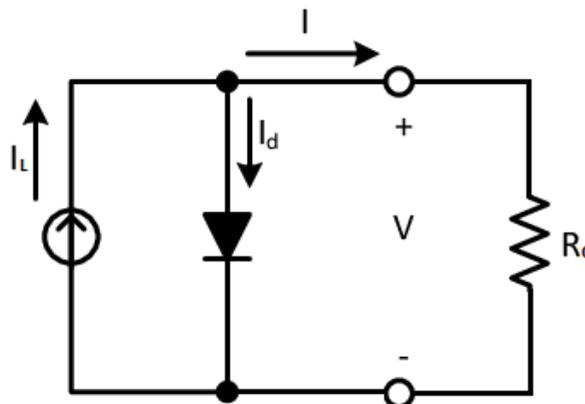


Figura 2: Representação Esquemática do Circuito Elétrico de uma Célula Fotovoltaica

Parte da corrente gerada pela radiação luminosa (I_L) é dissipada na junção P-N e o restante equivale a corrente

gerada pela célula fotovoltaica (I). A corrente que atravessa a junção P-N (I_D) pode ser calculada utilizando a fórmula de corrente para um diodo não ideal dada na eq. (1).

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{Vq}{mkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

- I_S - corrente de fuga do diodo
- V - tensão sobre o diodo que será considerada igual a tensão nos terminais da célula fotovoltaica
- m - fator de idealidade do diodo,, para $m = 1$ o diodo é ideal, para $m > 1$ o diodo é não ideal
- $\frac{kT}{q} \approx 25mV$ - potencial térmico
 - k - constante de Boltzmann
 - T - temperatura
 - q - carga de um elétron

Logo a corrente total gerada pela célula solar pode ser calculada pela eq. (2). O comportamento da corrente total e da potência gerada pela célula em função da tensão pode ser visto na Figura 3.

$$I = I_L - I_D = I_L - I_S \left(e^{\frac{Vq}{mkT}} - 1 \right) \quad (2)$$

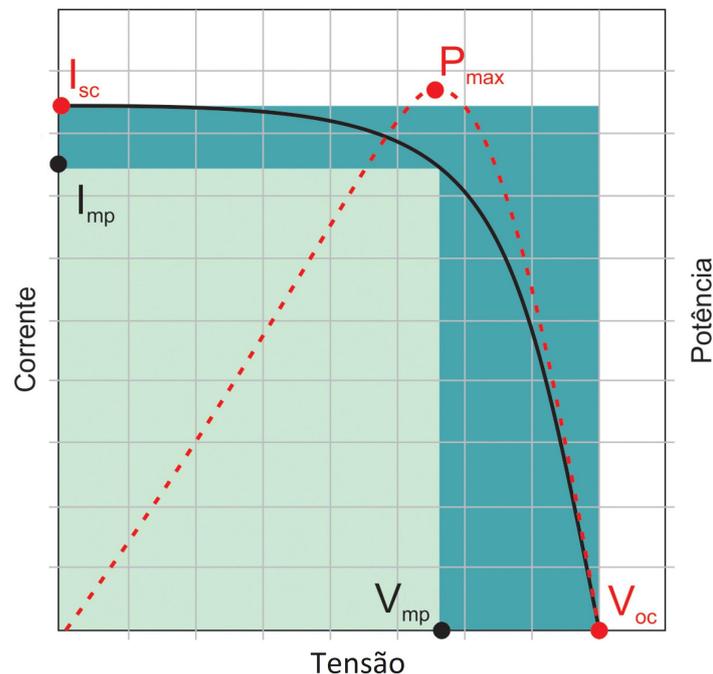


Figura 3: Gráficos de Corrente x Tensão e Potência x Tensão de Uma Célula Fotovoltaica

Dessa forma podemos analisar 2 pontos de interesse: quando a tensão da célula solar é 0 e quando a corrente da célula é igual a 0. Esses pontos equivalem, respectivamente, a corrente de curto circuito (I_{cc}), considera-se que a carga externa é nula, e a tensão de circuito aberto (V_{ca}), nesse caso a carga externa é considerada infinita.

Quando a tensão da célula fotovoltaica é 0, a corrente na junção P-N também é nula, enquanto a corrente gerada pela célula é máxima e igual a corrente gerada pela radiação luminosa, como pode ser visto no desenvolvimento a seguir.

$$V = 0 \rightarrow I_D = I_S(e^{\frac{0q}{mkT}} - 1)$$

$$I_D = I_S(e^0 - 1) = I_D = I_S(1 - 1) = 0$$

$$I_{cc} = I_L - I_D = I_L - 0 \rightarrow I_{cc} = I_L$$

Quando a corrente gerada pela célula solar é nula, a tensão da célula é máxima e a corrente gerada pela radiação luminosa é inteiramente dissipada pela junção P-N, conforme desenvolvimento a seguir.

$$I = 0 \rightarrow 0 = I_L - I_D \rightarrow I_L = I_D$$

$$I_D = I_S(e^{\frac{V_{ca}q}{mkT}} - 1) = I_L$$

Não é possível encontrar uma fórmula direta para calcular a V_{ca} .

A célula fotovoltaica possui um ponto ótimo de operação onde fornece máxima potência, isto é, a melhor configuração tensão (V_{op}) x corrente (I_{op}), este ponto varia de acordo com a carga enxada pela mesma. A tensão de operação (V_{op}), a corrente de operação (I_{op}) e a potência máxima gerada (P_{max}) são importantes parâmetros de desempenho de uma célula fotovoltaica, além desses, outro parâmetro de destaque é o fator de preenchimento (FF).

A potência gerada pela célula pode ser calculada pela eq. (3) e o fator de preenchimento pela eq. (4).

$$P = V \times I = \frac{V^2}{R_c} \quad (3)$$

Para os casos de I_{cc} e V_{ca} a potência da célula é nula, já para a potência é máxima:

$$P_{max} = V_{op} \times I_{op}$$

O fator de preenchimento é o parâmetro de desempenho da célula fotovoltaica usado para determinar a proximidade dos valores de V_{ca} e V_{op} e de I_{cc} e I_{op} .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{ca}I_{cc}} \quad (4)$$

As células solares podem ser classificadas quanto ao fator de preenchimento: células com $FF > 0,7$ são células de alta qualidade, chamadas de Grade A; células com fator de preenchimento entre 0,4 e 0,7 são células de segunda linha e são chamadas de Grade B. Ao se tratar de células para uso comercial, o fator de preenchimento fica em torno de 0,7 a 0,85.

3 Características da Célula Fotovoltaica RC7.2

O objetivo inicialmente proposto foi de utilizar para o carregamento das baterias de alimentação de um VANT apenas uma célula fotovoltaica com as dimensões próximas as dimensões do VANT, ao invés de um arranjo com diversas células menores. O modelo de célula foi escolhido devido à combinação dos fatores: disponibilidade comercial, dimensões e capacidade de geração. Na época em que se iniciou o projeto, entre os modelos disponíveis que melhor se encaixavam nas dimensões do VANT, o modelo RC7.2 foi o que apresentou o maior valor de potência máxima.

Dados obtidos do datasheet:

- Potência: 0,72W
- Tensão de operação: 7,2V
- Tensão de circuito aberto: 10,5V
- Corrente de operação: 100mA
- Corrente de curto circuito: 120mA
- Dimensões: 27cm x 9cm

A Figura 4 apresenta a curva Corrente x Tensão da célula fotovoltaica RC7.2.

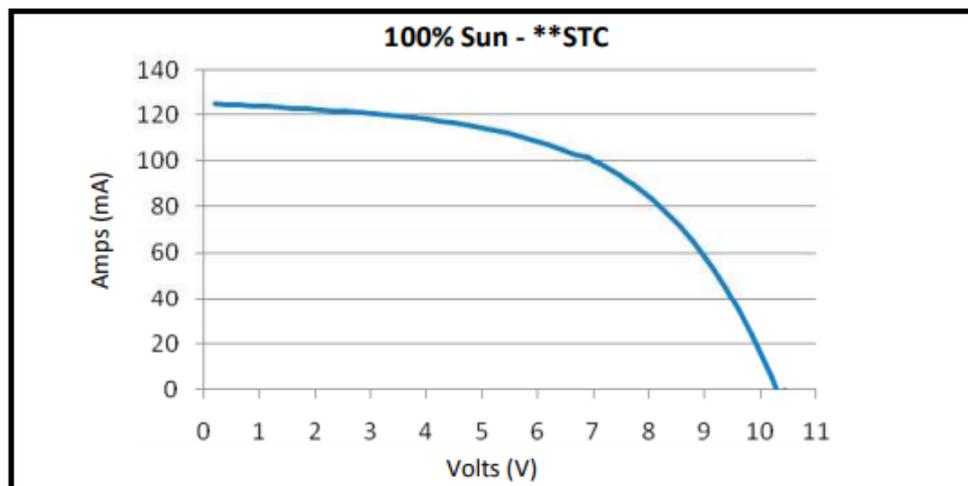


Figura 4: Gráficos de Corrente x Tensão - Datasheet

Os valores apresentados no datasheet foram obtidos mediante teste em condições padrões: irradiação solar a 1000 W/m^2 e temperatura da célula a 25°C .

a Método de Caracterização

Muitas vezes os dados do datasheet, obtido através de testes em laboratório, não coincidem com o funcionamento em aplicações reais em condições não ideais. Dessa forma, para que possamos entender o funcionamento em condições não ideais do modelo RC7.2 de célula solar, o primeiro passo tomado foi a caracterização dos parâmetros de desempenho: tensão de circuito aberto (V_{ca}), corrente de curto circuito (I_{cc}), tensão de operação (V_{op}), corrente de operação (I_{op}), potência máxima gerada e fator de preenchimento.

O método consiste em conectar a célula fotovoltaica a um amperímetro, um voltímetro e uma carga externa variável, utilizando resistências de laboratório em série. Para obter o valor de tensão de circuito aberto, utilizou-se apenas o voltímetro conectado às duas extremidades da célula. Já para obter o valor de corrente de curto circuito os terminais da célula foram conectados diretamente aos terminais do amperímetro, em ambos os casos não foram utilizadas resistências externas. Além disso, ao início de cada medida foi registrada a intensidade de radiação solar (em W/m^2) utilizando um Solar Power Meter. O setup do experimento pode ser visto na Figura 5.

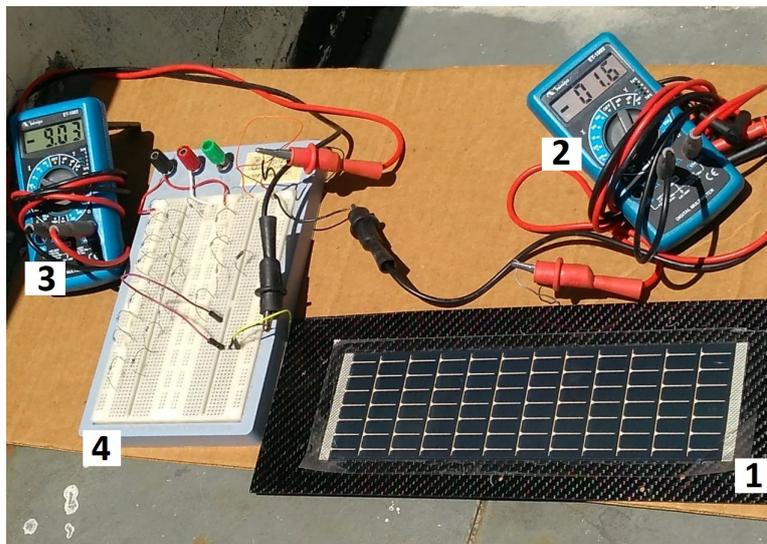


Figura 5: Setup para Caracterização da Célula Fotovoltaica RC7.2

Na imagem acima os itens apontados são: 1 - célula fotovoltaica; 2 - amperímetro, 3 - voltímetro; 4 - protoboard (onde é feita a conexão da célula com as cargas externas).

1 Resultados

Em cada medida foram registrados os valores de tensão e corrente correspondentes a cada valor de carga externa. Desse modo, foram obtidos, posteriormente, os valores de máxima potência gerada, do fator de preenchimento da célula e da carga externa necessária para chegar ao ponto ótimo de operação.

A Tabela 1 contém as condições iniciais como dia, hora e intensidade de radiação solar ao início da medida, com exceção da medida 2 quando não foi possível utilizar o Solar Power Meter. Apesar da distância de datas, todas medidas foram feitas no mesmo local da PUC-Rio.

Tabela 1: Condições Iniciais por Medida - Caracterização

Medida	Dia	Hora	Irradiação Solar (W/m^2)
1	13/12/2018	09:55	1011,5
2	20/02/2019	10:50	-
3	11/06/2019	11:16	1248,7
4	26/07/2019	10:11	866,7
5	29/07/2019	11:05	1083,4
6	11/09/2019	09:37	1021,1
7	29/10/2019	12:30	1147,4

Na primeira medida foram consideradas cargas externas variando entre 100Ω a $10k\Omega$, como resultado os pontos da curva corrente x tensão estão muito concentrados próximos a tensão de circuito aberto. O ponto mais próximo da corrente de curto circuito é $5,89V - 62,1mA$, correspondente a carga de 100Ω , este é o ponto de máxima potência para esta medida. A curva 1, portanto, não é uma boa curva para caracterização da célula, porém com estes resultados pode-se concluir que eram necessárias cargas menores que 100Ω e não havia necessidade de utilizar cargas tão altas (acima de $5k\Omega$) para a realização de novas medidas. Nas medidas seguintes os valores de cargas foram sendo ajustados de acordo com a necessidade percebida para o experimento.

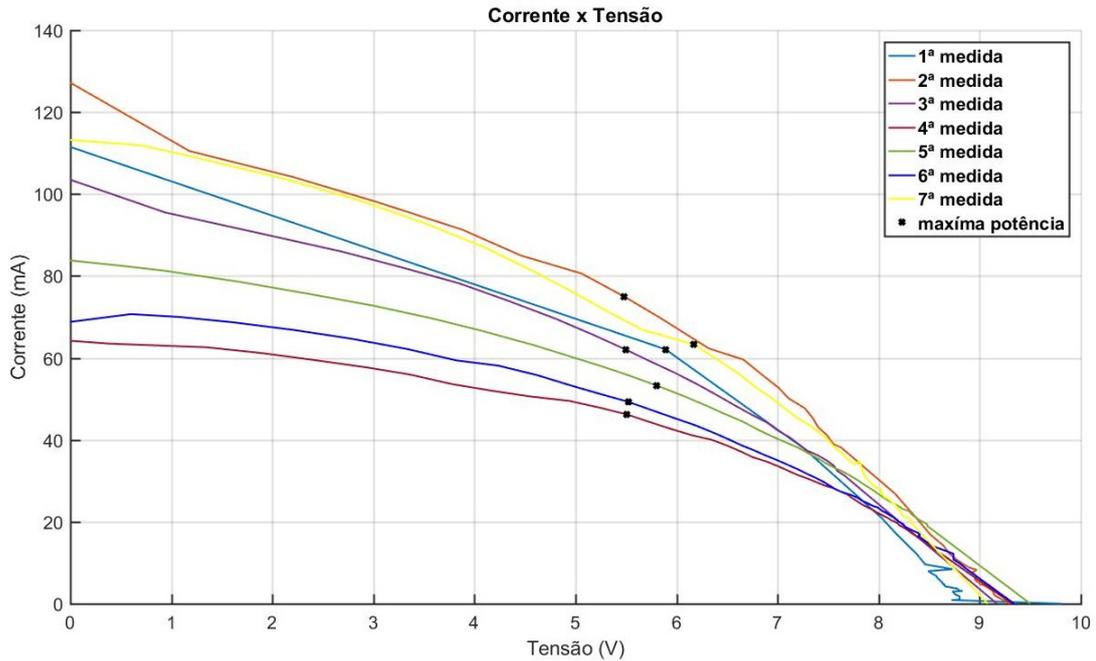


Figura 6: Gráficos de Corrente x Tensão

Na Figura 6 a curva mais acima, ou seja, com maior relação corrente x tensão, é a curva 2, da medida feita no verão. Já as três curvas mais abaixo (menores valores de potência para uma mesma carga) são referentes as medidas feitas no inverno. Considerando que, independente da época do ano, todas as medidas foram feitas em dias ensolarados.

Apesar da baixa potência, as curvas referentes as medidas 4 e 5 são as mais próximas de uma curva corrente x tensão característica de uma célula solar e por estarem bem parecidas, representam bem o efeito intensidade de radiação solar sobre a potência gerada pela célula fotovoltaica.

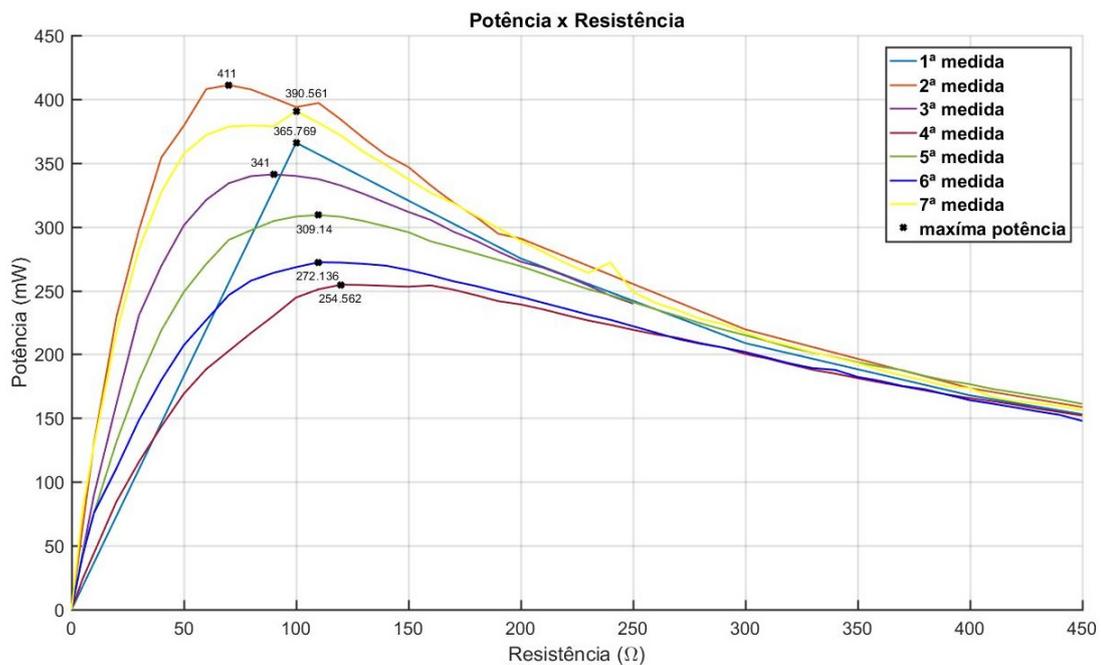


Figura 7: Gráficos de Potência X Resistência

Na Figura 7, além das curvas de potência x resistência, foram marcados e explicitados os valores de máxima potência para cada medida. É interessante notar que todas as curvas tendem ao mesmo valor de potência, aproximadamente 150mW, quando a carga externa é de 450Ω . Isso ocorre pois tensão de circuito aberto das sete medidas é muito próxima da média entre elas. Melhor dizendo, a variação da tensão de circuito aberto é muito baixa, com variação máxima em relação à média de 5%. Enquanto a corrente de curto circuito chega a variar 33% em relação à média entre as medidas. Por conseguinte, as curvas potência x resistência tendem a um mesmo valor de potência gerada e as curvas corrente x tensão são mais espaçadas próximas a tensão 0 e vão ficando mais próximas conforme se aproximam da tensão de circuito aberto.

Outra observação é que em todas as curvas o ponto de ótimo de operação ocorre para valores de resistência próximos a 100Ω , variando de 70Ω a 120Ω . Esse resultado é importante dado que ao utilizar a célula fotovoltaica, deseja-se que ela opere com máxima geração, para isso é necessário que a carga externa vista por ela fique próxima dos valores de resistência do ponto ótimo obtidos durante o processo de caracterização.

Os parâmetros de desempenho da célula fotovoltaica podem ser vistos na Tabela 2. Ademais nessa tabela ainda pode ser visto os valores previstos pelo datasheet.

Tabela 2: Resultado das Medidas x Especificação do Datasheet

Medida	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	V_{mp} (V)	I_{mp} (mA)	P_{max} (mW)	R_{Pmax} (Ω)	FF
1	9,81	111,5	5,89	62,1	365,77	100	0,334
2	9,30	127,2	5,48	75,0	411,00	70	0,347
3	9,17	103,5	5,50	62,0	341,00	90	0,359
4	9,32	64,2	5,51	46,2	254,56	120	0,425
5	9,50	83,8	5,80	53,3	309,14	110	0,388
6	9,34	68,8	5,52	49,3	272,14	110	0,423
7	9,08	113,2	6,17	63,3	390,56	100	0,380
Datasheet	10,50	120,0	7,20	100,0	720,00	-	0,571

Em nenhuma das sete medidas os valores obtidos ficaram próximos dos valores dados no datasheet. A média entre as potências máximas obtidas experimentalmente (334,88mW) chega a ser menor que a metade da potência máxima esperada (metade da potência máxima = 360mW). Entre os resultados da experiência, os valores de tensão de circuito aberto e tensão no ponto de operação estão bem próximos, tendo como média, respectivamente, 9,36V e 5,70V. Os valores referentes as correntes de curto circuito e corrente no ponto de operação variam muito a cada medida.

É compreensível que haja diferença entre os valores do datasheet e os resultados obtidos experimentalmente, pois os experimentos não foram feitos em condições ideais, sendo essas condições de grande influência nos resultados. A variação da irradiação solar, medida nos experimentos com o Solar Power Meter, influencia diretamente a variação de corrente de curto circuito e da potência máxima e tem pouca influência na variação da tensão de circuito aberto, que é afetada principalmente para valores baixos de irradiação solar. A variação da temperatura da célula influencia inversamente a tensão de circuito aberto e a potência máxima e tem influência quase nula na corrente de curto circuito. Ou seja, com o aumento da irradiação solar a potência máxima aumenta e com o aumento da temperatura da célula potência máxima diminui.

No geral, a irradiação solar foi ainda maior que os $1000W/m^2$ das condições ideais de teste e apesar de não ter sido possível monitorar a temperatura da célula, é possível encontrar registros da temperatura ambiente média no Rio de Janeiro nas datas em que as medidas foram realizadas. Como a célula fotovoltaica não é capaz de converter a irradiação solar em energia elétrica, parte dessa irradiação transforma-se em calor e aumenta a temperatura da célula que, conseqüentemente, tem a temperatura maior que a do ambiente.

Tabela 3: Variação de Temperatura na Cidade do Rio de Janeiro

Dia	Temperatura (°C)	
	Máx	Mín
13/12/2018	36	24
20/02/2019	34	24
11/06/2019	28	18
26/07/2019	27	18
29/07/2019	25	18
11/09/2019	30	20
29/10/2019	36	23

Como visto na Tabela 3, as máximas ultrapassaram 25°C e em alguns casos até mesmo mínima também ficou muito próxima de 25°C. Esses dados são suficientes para estimar que a temperatura da célula ultrapassou os 25°C das condições padrões de teste, afetando então o desempenho da mesma.

4 Variação ao Longo do Tempo de Geração da Célula Fotovoltaica

Inicialmente o objetivo deste método era analisar a variação de tensão e corrente ao longo de um dia inteiro, de 8h as 18h, utilizando um microcontrolador para salvar os dados automaticamente a cada 10 minutos. O resultado deste experimento seria utilizado para a modelar a célula fotovoltaica nas simulações dos CI's conversores.

Devido à dificuldade de encontrar sensores de corrente com precisão o suficiente para medir valores de corrente abaixo de 100mA, visto que a máxima corrente de operação obtida no experimento anterior foi de 75mA, foram feitas algumas medidas curtas como teste de 1h com intervalo de 5 minutos e posteriormente a medida completa com duração de aproximadamente 10h, porém sem coletar diretamente os valores de corrente gerada.

a Medidas Curtas

As medidas testes foram feitas com o objetivo de averiguar a necessidade de registrar os valores de corrente em alternativa a medir com precisão o valor da carga externa a ser utilizada e registrar apenas a variação de tensão. O setup para este experimento foi semelhante ao setup utilizado no método anterior (célula solar, voltímetro, amperímetro, Solar Power Meter e carga externa), representado na Figura 5, com a diferença somente na carga utilizada. Como objetivo é analisar o ponto de operação, a carga externa foi mantida constante durante todo o experimento, variando apenas entre uma medida e outra.

1 Resultados

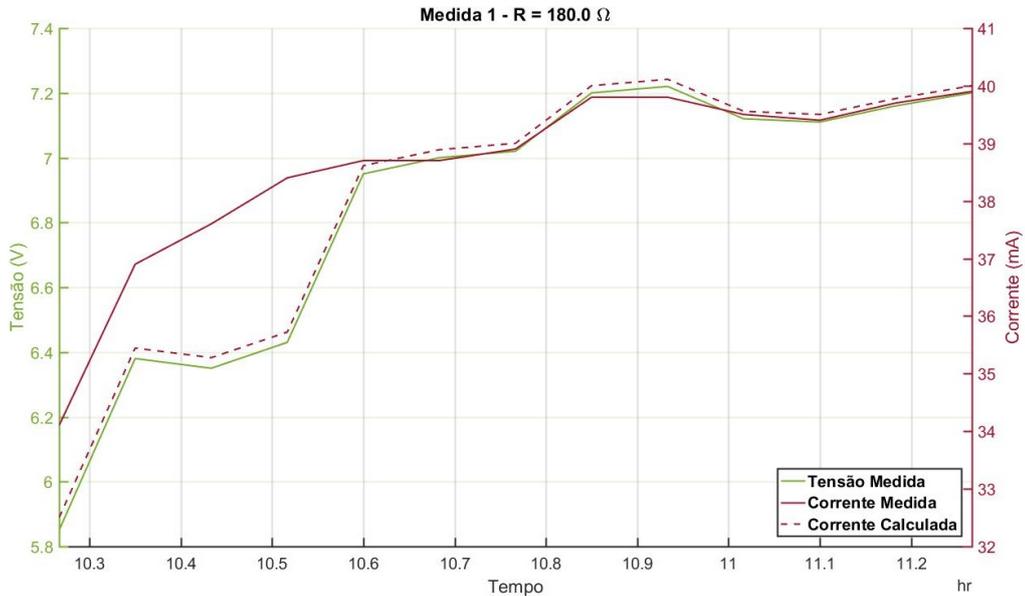
A Tabela 4 contém as condições iniciais do experimento tais quais local onde foi realizado, dia, horário de início, horário de termino e a carga externa utilizada.

Tabela 4: Condições Iniciais por Medida - Medida Curta

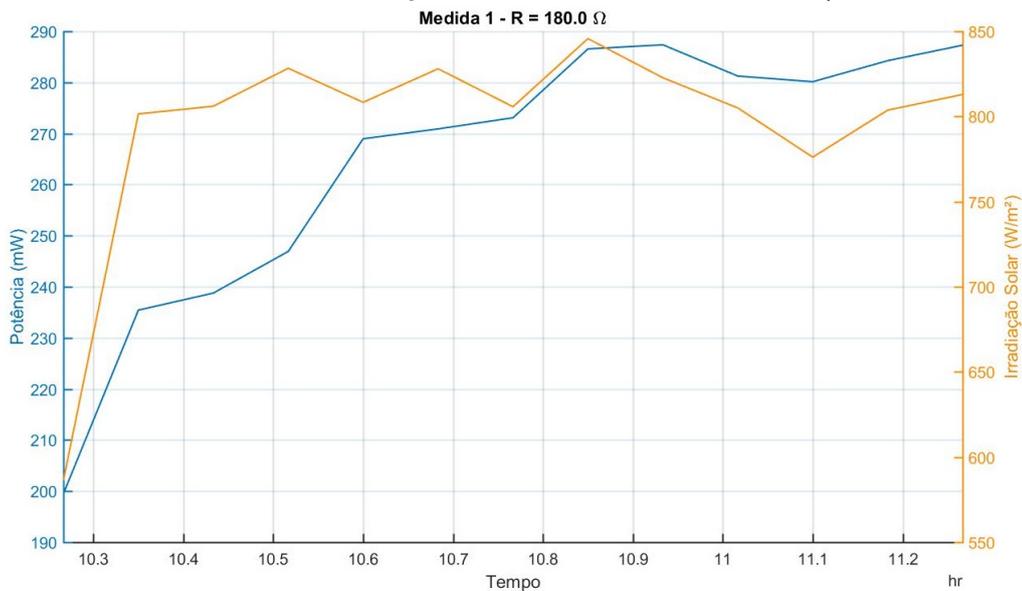
Medida	Dia	Início	Fim	Carga(Ω)	Local
1	21/05/2019	10:16	11:16	180,0	PUC
2	25/07/2019	10:23	11:23	81,6	PUC
3	30/07/2019	11:03	12:03	109,0	PUC

Os critérios para escolha das cargas foram baseados nas medidas e nos resultados da metodologia anterior. Para a primeira medida o critério utilizado foi: a carga que proporcionou a tensão mais próxima a 7,2 V (tensão do ponto de operação segundo o datasheet da célula). Posteriormente, percebendo a diferença de tensão no ponto de operação entre o real e o esperado pelo datasheet, o critério da segunda medida passou a ser a média entre as cargas do ponto de operação, 86 Ω (média entre 100 Ω , 70 Ω e 90 Ω - referente as três primeiras medidas do método anterior). Adaptando para valores comerciais de resistência, foi usado resistor de 82 Ω , utilizando um ohmímetro verificou-se que a resistência real era de 81,6 Ω .

Para a terceira medida, a carga de 109 Ω (resistor de 100 Ω em série com resistor de 10 Ω - sendo 109 Ω a resistência total real vista pelo ohmímetro) foi escolhida baseada na última medida do método anterior, onde a resistência no ponto ótimo foi de 110 Ω . A escolha do critério foi baseada na época do ano e a proximidade entre as duas medidas (diferença de um dia), considerando o mesmo ponto ótimo de operação para medidas realizadas em intervalos pequenos de tempo.



(a) Gráfico de Variação de Tensão e Corrente no Tempo

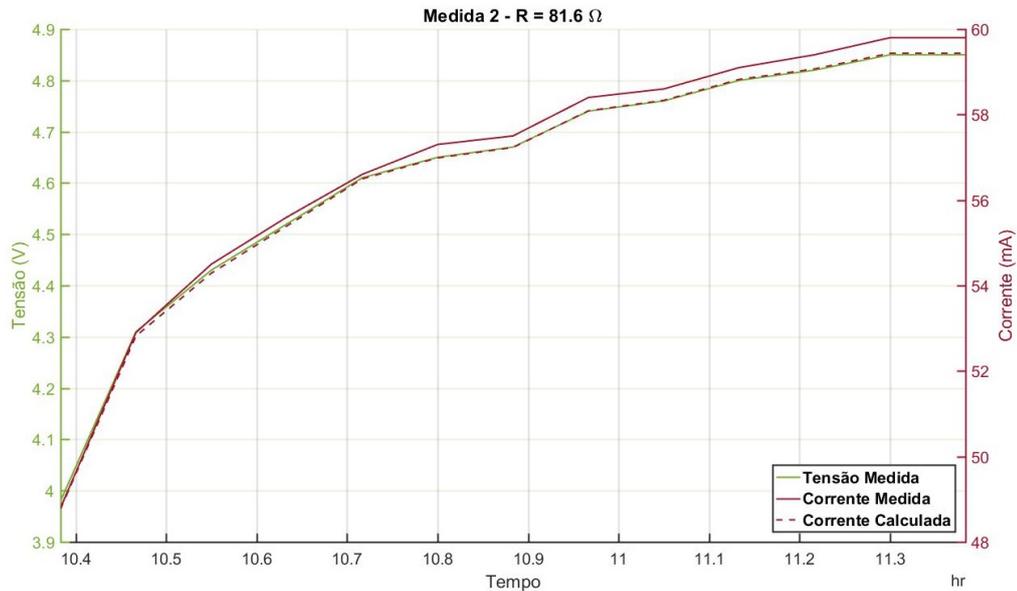


(b) Gráfico da Variação de Potência Gerada e da Irradiação Solar no Tempo

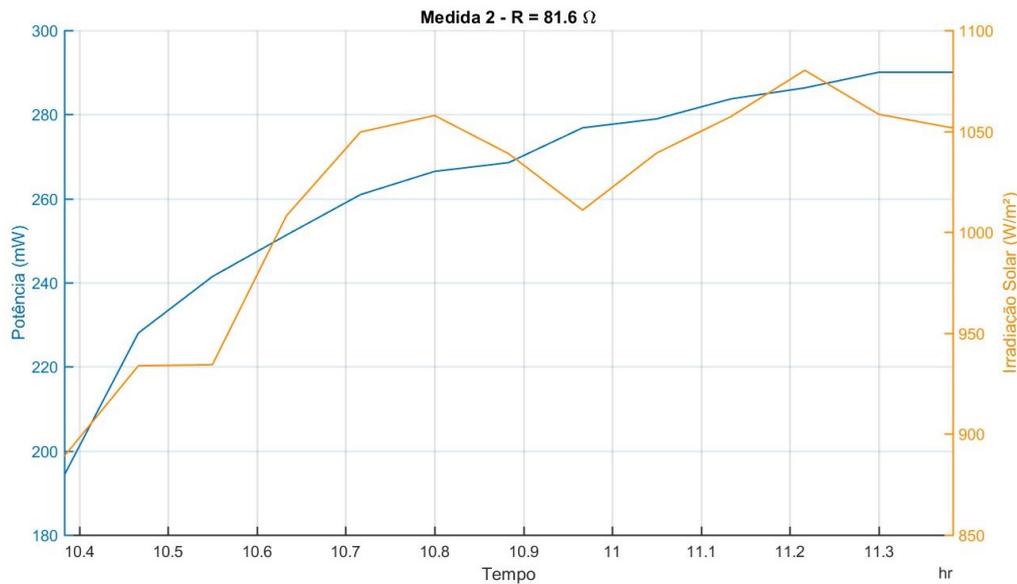
Figura 8: Resultados Medida 1

Para a medida 1, como pode ser visto nos gráficos da Figura 10, a irradiação solar mantém uma pequena variação em torno de $800 W/m^2$, com exceção do primeiro valor. Em relação a tensão e corrente, ocorreram alguns aumentos consideráveis ao longo da medição, mantendo-se mais estável nos momentos finais do experimento, em torno de 7,2V e 40mA, respectivamente.

Como em qualquer circuito elétrico espera-se que a corrente varie de forma linear em relação a tensão, desde que seja mantida impedância constante, respeitando a Lei de Ohm. Então quando houver um aumento de tensão, a corrente deverá aumentar no mesmo instante de maneira proporcional, resultando em curvas comportamentos semelhantes de tensão x tempo e corrente x tempo. A Figura 8a mostra que as variações de tensão e corrente, na primeira metade do experimento, ocorrem de forma disjuntas, resultado de erros de medição durante o experimento. Na segunda metade, no entanto, o erro foi corrigido e comportamento de ambas as curvas é similar, como o esperado.



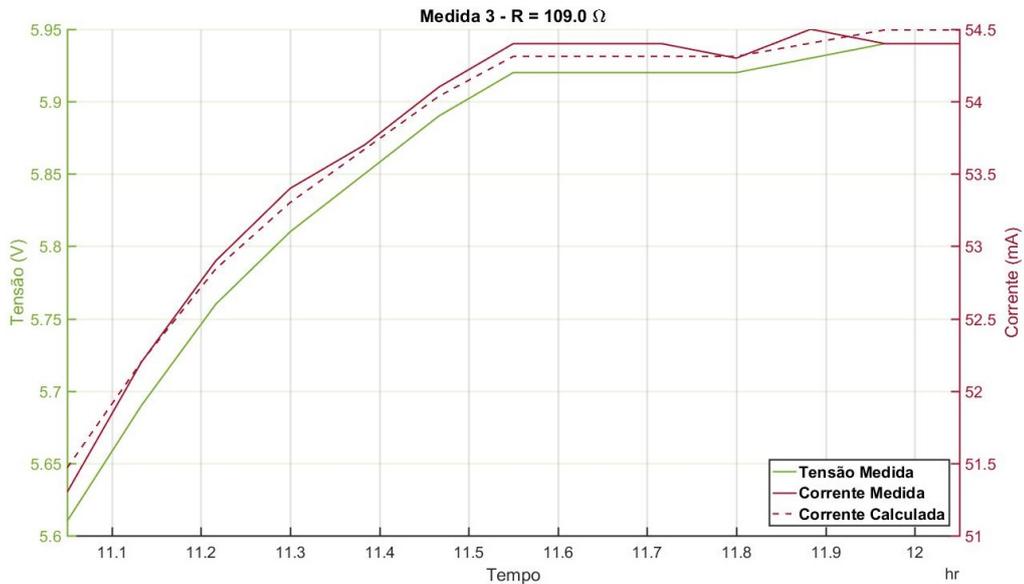
(a) Gráfico de Variação de Tensão e Corrente no Tempo



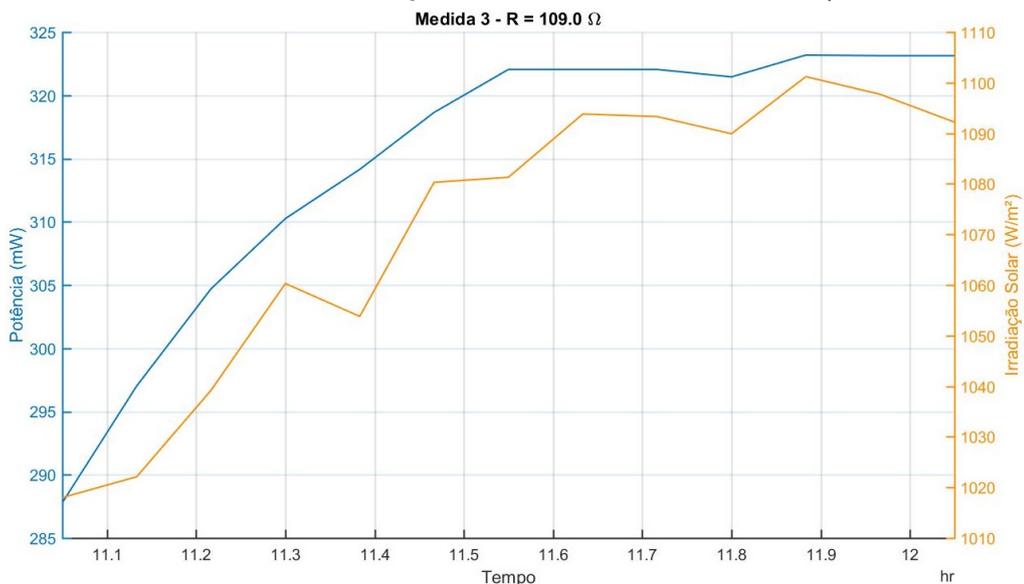
(b) Gráfico da Variação de Potência Gerada e da Irradiação Solar no Tempo

Figura 9: Resultados Medida 2

Na medida 2, o caso onde é utilizado o menor valor de resistência, os resultados são os menores valores de tensão, porém os maiores valores de corrente se comparado as demais medidas. A variação de corrente pelo tempo é muito parecida com a variação da tensão pelo tempo, respeitando os princípios de circuitos elétricos, em ambas as curvas é possível perceber um leve e contínuo aumento acompanhando a tendência de crescimento da irradiação solar.



(a) Gráfico de Variação de Tensão e Corrente no Tempo



(b) Gráfico da Variação de Potência Gerada e da Irradiação Solar no Tempo

Figura 10: Resultados Medida 3

Na medida 3, as três curvas (intensidade de radiação solar, tensão e corrente) apresentam na primeira metade da medida um aumento considerável e da metade para o final, os valores de tensão e correntes, se mantêm uma pequena variação próximo a, respectivamente, 5.95 V e 54.5 mA. Confirmando a variação linear entre tensão e corrente esperada.

Em comparação as 2 medidas anteriores, essa é a que tem as menores variações. Por exemplo, enquanto na medida 3 a potência gerada varia de 287,8mW a 323,2mW para a medida 2 a variação de potência chega a ser de 194,2mW a 290mW. Variações semelhantes ocorrem para os demais valores das 3 medidas.

Além de mais estável, a última medida é a que resulta em maiores valores de potência (Tabela 5), isso deve-se não só ao fato de ser a medida com maior intensidade de radiação solar incidente, como também ao fato de a carga externa utilizada estar mais próxima do valor de carga a ser utilizado para se atingir o ponto ótimo de operação.

Tabela 5: Comparação Entre as 3 Medidas de Potência Gerada e Intensidade de Irradiação Solar

Medida	Potência Gerada (mW)			Irradiação Solar (W/m^2)		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
1	199,5	287,4	264,6	586,3	845,7	794,6
2	194,2	290,0	262,8	889,0	1080,2	1016,1
3	287,8	323,2	314,6	1018,0	1101,2	1071,0

Comparando as medidas 1 e 2, os resultados de potência gerada são bastante próximos, mesmo havendo diferença significativa em relação a irradiação solar. Esse resultado pode ser melhor compreendido se voltarmos a analisar a Figura 7, ao variar a carga externa para valores menores que a carga otimizada a redução da potência gerada é maior que ao variar a carga externa para valores maiores que a carga ótima.

O gráfico pode ser dividido em duas partes, uma com inclinação positiva, onde a carga é menor que a carga do ponto ótimo, a outra tem inclinação negativa e a carga é maior que a carga do ponto ótimo. Na primeira parte, a inclinação é maior, em módulo, que a inclinação na segunda parte. Isso é, para mesma diferença de valores de carga em relação a carga otimizada, cargas com valores maiores resultam em maiores valores de potência gerada. Por isso que mesmo com a carga externa da medida 2 sendo mais próxima da carga ótima, a medida 1 resultou em potência gerada semelhante.

2 Comparação: Valores Medidos x Valores Calculados

Sabendo exatamente o valor da carga utilizada e a tensão em cada instante é possível calcular a corrente gerada pela célula fotovoltaica usando a Lei de Ohm ($V = I \times Z$). Os resultados deverão ser iguais ou muito próximos dos valores de corrente mensurados, desta forma a confiabilidade do experimento pode ser assegurada.

Em relação a medida 3, ambas as curvas são idênticas, como pode ser visto na Figura 10a, com o erro de 0,14%. Na medida 2, a corrente média é levemente maior que a corrente calculada, ainda é possível perceber que ambas as curvas seguem o mesmo padrão com um pequeno deslocamento, Figura 9a. O erro para esta medida foi de 0,42%. Já em relação a medida 1, as curvas são totalmente diferentes nos primeiros 20 minutos, divergindo no ponto inicial e em inclinação. Posteriormente, apesar de ainda haver erro em alguns momentos, as curvas na Figura 8a passam a ter comportamento semelhante e coincidente. O erro para os primeiros 20 minutos de medida foi de 5,45%, o erro total foi de 1,91%. De maneira geral, os valores calculados foram satisfatoriamente próximos do valor reais.

Com estes resultados é possível realizar o experimento inicialmente planejado (obter a variação de tensão e corrente ao longo de um dia inteiro na célula fotovoltaica) mensurando apenas a tensão da célula e utilizando a Lei de Ohm para calcular a corrente, sem que seja necessário a utilização de sensores de corrente. O resultado não será exato, mas será preciso o suficiente para os fins desejados.

b Medida Diária

As medidas diárias foram planejadas para serem feitas com duração de aproximadamente 10 horas. Com medidas tão longas, não seria viável que os resultados fossem registrados manualmente, como foram feitos nos métodos de caracterização e de medidas curtas. Dessa forma, fez-se necessário o uso de um equipamento capaz de automatizar as medidas e registrar os resultados obtidos. Para tal foi escolhido arduino MEGA 2560 devido a disponibilidade no laboratório, a memória para gravar os resultados durante a medida e a facilidade de programação.

O arduino possibilita leitura analógica de valores entre 0 e 5 volts. Como a tensão da célula fotovoltaica, segundo o datasheet, chega a no máximo 10,5V e para os resultados da caracterização o máximo de tensão obtido foi de 9,81V, utilizando um divisor de tensão de meio a meio a própria entrada analógica do arduino pode ser usada como voltímetro. Lembrando, ao registrar, apenas de dobrar o valor de tensão lido.

Já para registrar a corrente no arduino através de entradas analógicas seria necessário um conversor corrente-tensão. Foram feitos testes com o sensor de corrente ACS712 combinado com o amplificador de instrumentação INA 129, porém a sensibilidade do circuito não foi suficiente para os baixos valores de corrente gerada da célula solar. Outra tentativa foi utilizar o sensor INA 219, com sensibilidade ajustável até 0.1mA e biblioteca própria para arduino, foram comprados 2 módulos semiprontos. Houveram erros de soldagem em ambos os módulos que impossibilitaram o uso dos mesmos. Por fim, com a escassez de recursos e de tempo, optou-se por registrar apenas os valores de tensão durante o experimento e o valor da carga externa antes do início de cada medida.

Quanto a medida de irradiação solar o Solar Power Meter SM206-SOLAR não possui nenhuma entrada para comunicação externa, portanto não foi possível automatizar esse resultado da medida. De forma a obter a variação da radiação solar incidente durante o dia, as medidas foram feitas manualmente de 2 em 2 horas.

1 O Circuito

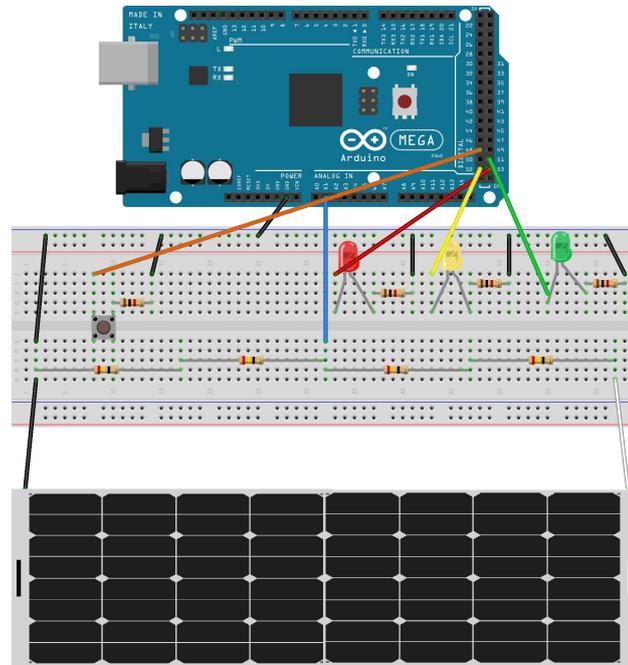


Figura 11: Circuito Utilizado no Experimento

O circuito completo do experimento, Figura 11, conta ainda com um botão pull down, três LEDs (um de cada cor), resistência e um power bank. O botão foi usado para alternar entre o estado de requisitar resultados e o estado de iniciar/continuar a medida. Os LEDs foram utilizados como indicadores de estado, indicando se o circuito estava funcionando, o momento em que a medida estava sendo feita e o momento em que os dados estavam sendo requisitados (medida em pausa). As resistências foram usadas como divisor de tensão para leitura da tensão gerada na célula, como carga externa e para os circuitos de LED e botão. O uso do power bank foi necessário para manter o arduino em funcionamento no local onde foram feitas as medições, fugindo de sombreamentos e conseqüentemente longe de tomadas.



Figura 12: Montagem do Experimento

2 A Programação do Arduino

Por haver a necessidade de armazenar os dados coletados durante a medida, fez-se uso da memória do próprio arduino, a EEPROM. A mesma é uma memória capaz de armazenar uma pequena quantidade de dados e mantê-los mesmo sem energia, esses dados podem ser excluídos eletricamente e a memória pode ser regravada por uma quantidade limitada de vezes. Para utilizar a EEPROM, foi fundamental o uso da biblioteca pronta 'EEPROM.h' no código.

Outra biblioteca pronta crucial para o desenvolvimento do programa foi a 'GFBUTTON.h', capaz de reconhecer o acionamento de um botão e corrigir o efeito bouncing do mesmo. O efeito bouncing é o resultado das oscilações mecânicas transitórias durante a transição de estados de um botão, e se não for corrigido pode levar a erros como acionamentos equivocados ou múltiplos acionamentos ao invés de apenas um.

Utilizando a linguagem de programação C++ foram feitos dois códigos para esse experimento, o principal e outro de inicialização, ambos podem ser vistos no apêndice. Antes do programa principal é essencial rodar o código de inicialização para reiniciar a EEPROM, apagando todos os dados armazenados e atribuir 0 ao contador, armazenado no primeiro endereço da EEPROM. O contador é utilizado no código para memorizar quantos dados foram coletados.

Já no código principal, utilizando apenas um botão foram criados dois estados, o primeiro, onde o programa inicia, é o estado de escrita que exibe no monitor serial os dados armazenados na EEPROM, apenas se o contador for diferente de 0. O LED verde permanece aceso, indicando que ainda não houve mudança de estado.

Ao apertar novamente o botão se inicia o segundo estado, o de leitura, a tensão é lida da entrada analógica utilizando a função 'analogRead' e escrita na EEPROM com a função 'EEPROM.put'. O contador é atualizado ao trocar de estado ou a cada 10 medidas, pois a EEPROM tem número limitado de vezes em que um endereço possa ser regravado. Após uma leitura o programa espera 10 minutos para que uma nova leitura seja feita. Nesse estado o LED amarelo fica aceso até que o botão seja acionado mais uma vez. O LED vermelho indica o momento exato em que a leitura está sendo feita, o que dura uma fração de segundo.

3 Resultados

A Tabela 6 contém as condições iniciais do experimento tais quais local onde foi realizado, dia, horário de início e de término e carga externa utilizada.

Tabela 6: Condições Iniciais por Medida - Medida Completa

Medida	Dia	Hora de Início	Hora final	Local	Carga (Ω)
1	30/10/2019	08:52	18:00	PUC	96,3
2	31/10/2019	07:48	18:04	PUC	96,4
3	16/12/2019	08:00	18:00	PUC	96,4
4	26/12/2019	08:10	16:20	Itatiaia	96,9
5	28/12/2019	08:00	18:40	Resende	96,9

Para essas medidas, o critério de decisão da carga externa também foi baseado nos resultados das medidas de caracterização da célula solar, no caso a média das cargas externas utilizadas para chegar ao ponto ótimo nas sete medidas. A média é de 100 Ω . Considerando os valores comerciais de resistência e a necessidade de a carga externa também servir como divisor de tensão, foram usados 4 resistências de valor nominal 24 Ω , chegando a carga externa nominal de 96 Ω . A variação entre uma medida e outra pode ser atribuída aos pontos da proto-board que foram utilizados.

Os gráficos com os resultados de cada medida estão em função da potência, calculada segundo a eq. (3). Em todas as medidas o arduino leu a tensão da célula após o divisor de tensão, os valores de carga foram registrados manualmente no início de cada medida utilizando um ohmímetro.

O dia da primeira medida estava um pouco nublado, como resultado a irradiação solar dessa medida não chegou a 800 W/m^2 de pico. Isso foi refletido na potência gerada que apresenta alguns picos próximos a 400 mW, porém se mantém a maior parte do dia abaixo dos 300 mW. Após as 14:30 h, esse resultado é ainda pior, a potência máxima gerada nesse intervalo não passa de 150 mW.

Ainda assim, essa medida foi a que chegou a segunda maior potência máxima, 452,34 mW, entre todas as medidas feitas. Deve-se ao fato de que por ser primavera e ser um dia nublado, a temperatura ambiente não

é tão alta quanto em dias ensolarados no verão, por exemplo, conseqüentemente a temperatura da célula também é menor afetando menos a performance da célula.

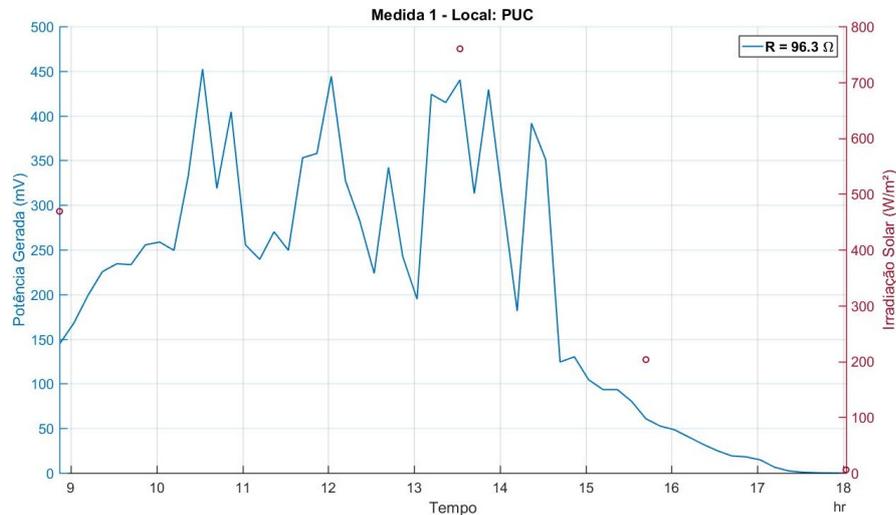


Figura 13: Variação ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 1

Durante a segunda medida a célula fotovoltaica voou devido a ventania e se desconectou do circuito onde a medida estava sendo registrada, por isso em alguns momentos, de 12:00 h a 13:50 h e novamente as 15:10 h, a potência gerada é nula. Apesar da ventania, foi um dia ensolarado, a irradiação solar registrada chegou a $1533,10 \text{ W/m}^2$.

Com a mais alta irradiação solar registrada, dentre todas as medidas incluindo as medidas curtas e as de caracterização da célula, a potência máxima gerada também foi a maior registrada, 464,27 mW. No entanto, ainda é 36% menor que a potência pico informada no datasheet.

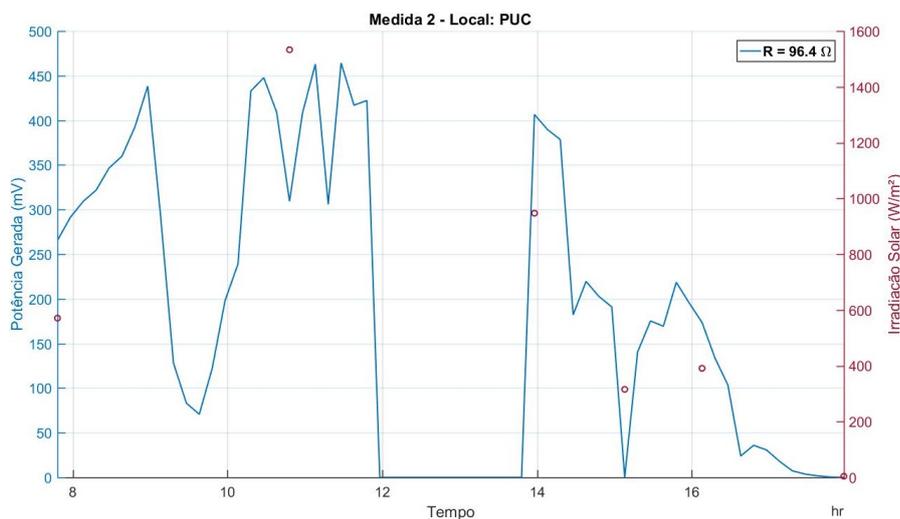


Figura 14: Variação ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 2

O gráfico da medida 3, Figura 15 é o mais regular e próximo do resultado esperado, com a potência gerada e a irradiação solar aumentando aos poucos na parte da manhã, com pico próximo a meio dia, e declinando na parte da tarde, com poucas interferências de nuvens. A irradiação solar nessa medida fica próxima do padrão de teste, 1000 W/m^2 , chegando ao máximo registrado de $1081,20 \text{ W/m}^2$ ao meio dia. A potência máxima gerada foi de 443,69 mW as 11:50 h.

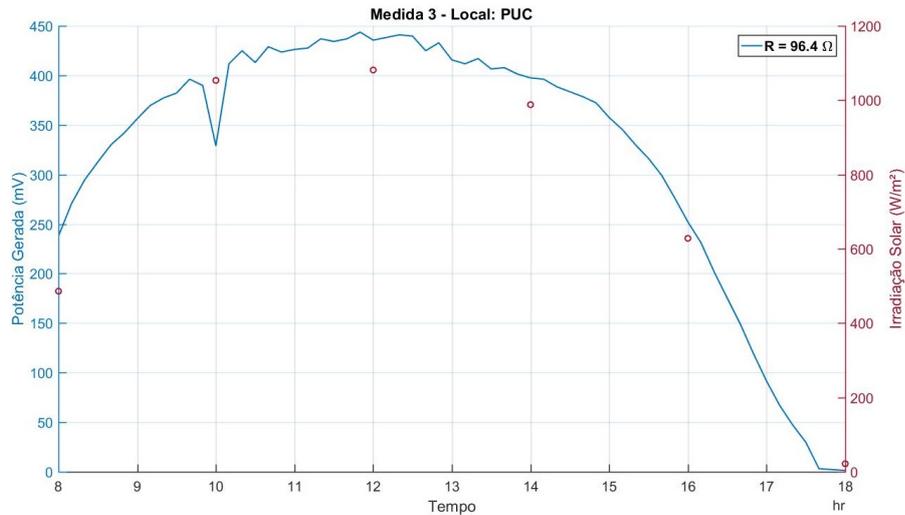


Figura 15: Variação ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 3

Na quarta medida, com exceção do final, também é bastante regular e com pouca interferência de nuvens. A medida teve que ser interrompida às 16:20 h, pois começou a chover e ainda que não danifique a célula fotovoltaica, poderia danificar o arduino e os demais elementos do circuito. Antes da chuva, porém, as nuvens já começavam a afetar os resultados desde as 15:00 h.

Assim como na medida anterior, entre 10:00 h e 14:00 h a potência gerada ficou acima dos 400 mW, chegando ao pico de 442,75 mW às 11:50 h. Essa foi a menor potência pico gerada entre as medidas desse experimento, ainda assim foi maior que a potência máxima nos demais experimentos. Apesar dos resultados de potência gerada parecidos entre a medida 3 e 4, a irradiação solar registrada para essa medida é maior e tem pico de 1361,80 W/m^2 ao meio dia.

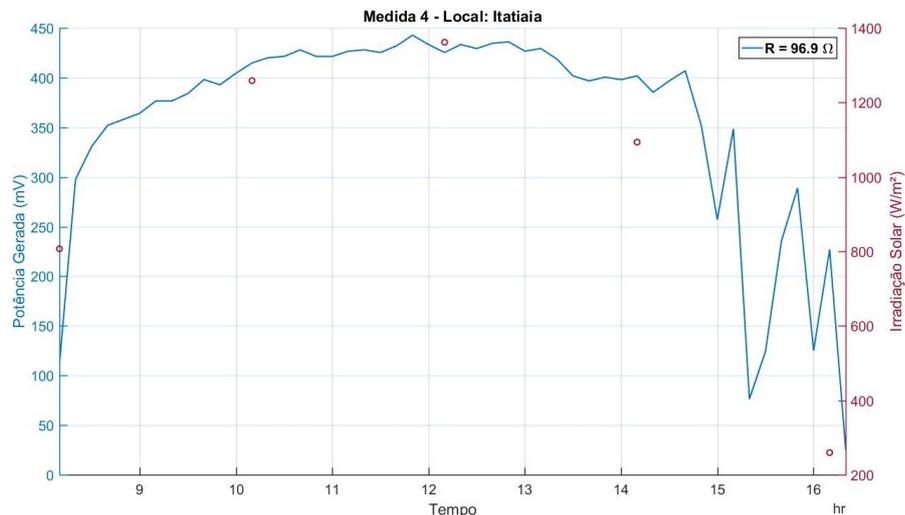


Figura 16: Variação ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 4

No gráfico da medida 5, Figura 17, a interferência das nuvens é bem expressiva, pois existem diversos vales de potência ao longo da medida, embora mantenha, em média, o padrão das duas últimas medidas de a potência gerada entre as 10:00 h e as 14:00 h estar acima dos 400 mW. A potência máxima gerada foi de 452,26 mW às 12:30 h e a irradiação solar máxima foi de 1367,20 W/m^2 ao meio dia.

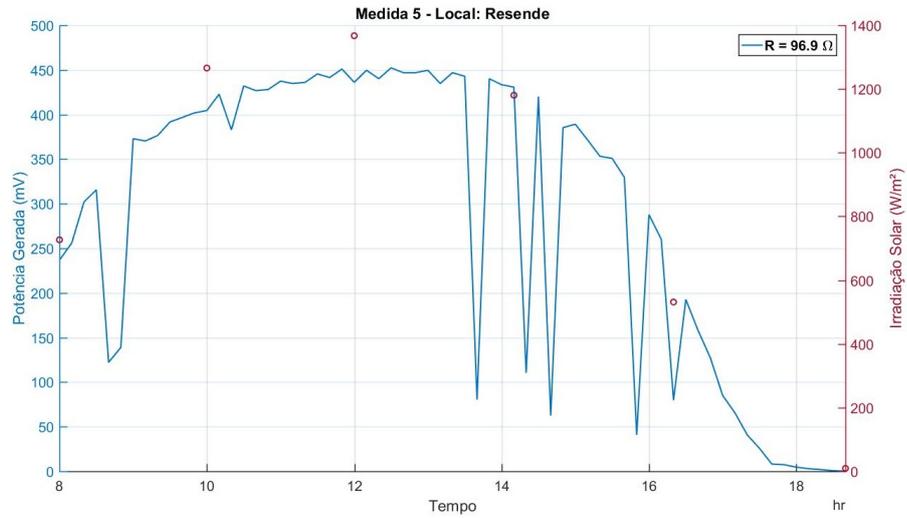


Figura 17: Variação ao Longo do Dia de Potência Gerada e Irradiação Solar - Medida 5

Os resultados obtidos com essa medida possibilitam a criação de um modelo de geração da célula fotovoltaica RC7.2 ao longo de um dia ensolarado e com poucas nuvens. Com esse modelo e sabendo a carga total do VANT, pode ser estimado o aumento do tempo de voo. Além disso para as simulações com os CIs para carregamento de bateria de LiPO, essas medidas foram úteis para determinar a tensão média de geração da célula solar.

5 Bateria

As células fotovoltaicas comercializadas atualmente, de 2ª geração, ainda não são eficientes o suficiente para manter um VANT em voo sem auxílio de outras fontes de energia. Portanto, faz-se necessário uso de baterias como fonte principal de energia enquanto a energia fotovoltaica funciona como fonte auxiliar, recarregando a bateria durante o voo, afim de prolongar a duração do mesmo.

Mesmo que baterias de polímero de lítio, LiPO, sejam mais caras e, em caso de mau uso, tenham maior risco de explosão que baterias de lítio-ion, as baterias de LiPO superam essas em quaisquer outros aspectos, por exemplo, densidade energética e peso. Por essa razão as baterias de LiPO são as mais utilizadas em drones e outros VANTS.

Uma bateria pode ser classificada de acordo com as seguintes características:

- **Carga:** Quantidade de energia armazenada em Ampere-hora (A/h). Corresponde a quantos amperes a bateria é capaz de fornecer sem danificar sua estrutura;
- **Taxa de Descarga (Taxa C):** Capacidade de carga e descarga de corrente;
- **Número de Células:** Definido pela quantidade de pequenas baterias estão contidas no conjunto, é representado pelos fabricantes por S. Uma célula de LiPO, por exemplo, 3,7 V de tensão nominal, enquanto uma bateria de 2 células tem 7,4 V ($2 \times 3,7$) de tensão nominal, com 3 células a tensão nominal é de 11,1 V ($3 \times 3,7$) e assim por diante.

As baterias de LiPO necessitam de uma forma de carregamento diferenciada considerando as condições em que a bateria irá permanecer. São duas as funções de carregamento: BALANCE, para o caso onde a bateria será utilizada logo em seguida, chegando a 4,2 V por célula; e STORAGE, para o caso onde a bateria seja armazenada sem utilizar por um tempo, carregando até 3,8 V por célula.

Outro cuidado importante que se deve tomar para manter a bateria de LiPO funcionando adequadamente é nunca deixar a tensão de uma célula menor que a tensão mínima, 3V. Em função disso é importante carregar a bateria mesmo que não vá utiliza-la por um tempo, impedindo que a tensão da mesma chegue a tensão mínima e danifique a bateria permanentemente.

A Tabela 7 explicita os valores de tensão da bateria e seu respectivo estados para baterias de 1 a 4 células.

Tabela 7: Tensão e Status da Bateria por Quantidade de Células

Bateria	1s (V)	2s (V)	3s (V)	4s (V)
Tensão Mínima	3	6	9	12
Descarregada	3,4	6,8	10,2	13,6
Nominal	3,7	7,4	11,1	14,8
Tensão de Armazenamento	3,8	7,6	11,4	15,2
Carregada	4,2	8,4	12,6	16,8

6 Simulação do Circuito de Carregamento da Bateria

Considerando os detalhes especiais de carregamento da bateria LiPO é imprescindível que o carregamento seja feito com o equipamento específico. Ademais, esse equipamento deverá ser capaz de encontrar o ponto de melhor operação da célula fotovoltaica, conhecido como MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dessa forma foram estudados 2 CI (Circuitos Integrados) próprios para o carregamento de baterias de LiPO utilizando células solares.

Foram considerados os CIs LT3652 (Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power) e LTC3119 (18V, 5A Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter) ambas da fabricante Linear Technology (agora pertencente a Analog Devices). Por isso os circuitos de testes de cada CI foram simulados no simulador LTSpice, software desenvolvido pela própria Linear Technology.

a A Célula Solar no LTSpice

Para simular a célula fotovoltaica no LTSpice foi usado um modelo genérico de diodo e um código de subcircuito como mostra a Figura 18. O modelo foi encontrado no site da Linear Technology em uma simulação de aplicação fotovoltaica do CI LT3652.

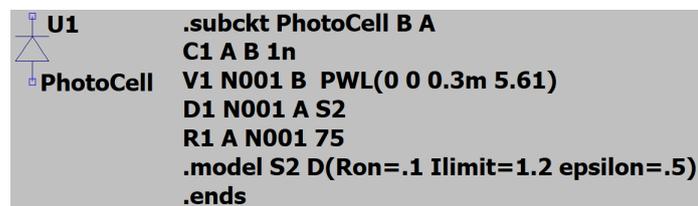


Figura 18: Simulação da Célula Fotovoltaica no LTSpice

O circuito interno do componente que modela a célula fotovoltaica tem um capacitor de 1 nF, um resistor de 75 Ω e um diodo de modelo descrito no próprio subcircuito. Além de descrever a função da tensão entre os terminais externos do componente como uma função linear por partes: inicia com 0 V, a tensão aumenta linearmente até que em 0,3 ms chegue a uma tensão média de funcionamento da célula, no caso, 5,61 V.

O valor de 5,61 V foi definido tomando a média de tensão num mesmo intervalo de tempo entre as medidas diárias 1, 3, 4 e 5. A medida 2 foi desconsiderada por haver um longo período de tempo no meio do experimento sem resultados, devido ao vento, como explicado no capítulo 4.b.3. O intervalo de tempo ponderado em todas as medidas foi de 8:50 h a 16:22 h. Foi considerando o horário de começo da medida que se iniciou mais tarde (medida 1 - 8:52 h) e o horário de termino da medida finalizada mais cedo (medida 4 - 16:20 h), conforme visto na Tabela 6. Os demais valores foram mantidos iguais aos do modelo.

b A Bateria no LTSpice

Para simular a bateria foi usado um capacitor de 0,15 mF com resistência interna de 0,15 Ω e uma tensão pré-definida em um de seus terminais. O modelo de bateria mostrado na Figura 19, foi encontrado na mesma simulação onde foi encontrado o modelo da célula fotovoltaica.

A tensão no terminal foi definida usando o comando ic (condição inicial) com base na tensão de uma bateria descarregada de acordo com o número de células, dados da Tabela 5. Os valores de capacitância e resistência foram mantidos iguais aos do modelo.

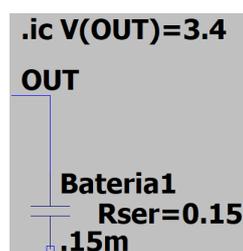


Figura 19: Simulação da Bateria no LTSpice

c CI LT3652

O CI LT3652 funciona como um conversor CC/CC buck (abaixador), isso é, abaixa o nível de tensão em corrente contínua da saída em relação a entrada. Esse CI é capaz de regular a tensão de entrada para MPPT em aplicações fotovoltaicas, desde de que a tensão correspondente esteja entre 4,95 V a 32 V. Com ele é possível carregar baterias de lítio-polímero (LiPo), lítio-ion (Li-ion), fosfato de lítio ferro (LiFePO4) e chumbo ácido, e a tensão de carregamento pode ser ajustada até 14,4 V através de combinação de resistores. O limite de corrente de saída é de 2 A. A frequência de chaveamento desse CI é fixa em 1 MHz.

Considerando que a tensão média da célula solar RC7.2, analisada anteriormente, é de 5,61 V e o CI LT3652 atua como conversor buck, com essa célula fotovoltaica só seria possível carregar baterias de uma célula.

Com a célula solar RC7.2, analisada anteriormente, e o CI LT3652 sendo um conversor buck, só seria possível carregar baterias de 1 célula (1s). A tensão média dessa célula fotovoltaica é de 5,61 V, menor que os 6 V de tensão mínima de uma bateria 2s. Dessa forma, foram feitas simulações com esse CI apenas considerando carregamento de bateria 1s.

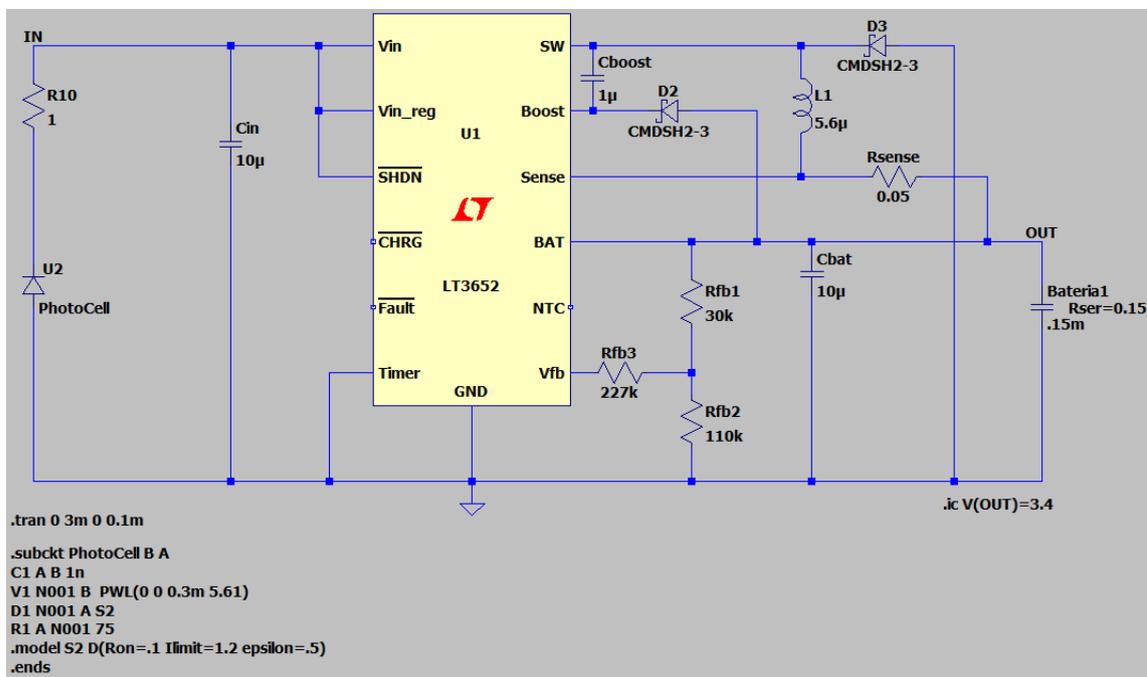


Figura 20: Simulação do Carregamento de Bateria 1s - CI LT3652

O circuito simulado, Figura 20, é semelhante ao circuito "Basic 2A 1-Cell LiFePO4 Charger (3.6V Float) With C/10 Termination" encontrado nas aplicações típicas do datasheet. As alterações foram feitas apenas nos resistores conectados a porta V_{fb} do CI, visto que esses são os resistores responsáveis por regular a tensão de saída e deseja-se chegar a 4,2 V.

Escolhendo a resistência R_{fb1} como 30 kΩ as resistências R_{fb2} e R_{fb3} podem ser calculadas com base na tensão de carregamento da bateria (V_{BAT}) por meio das equações (5) e (6), respectivamente.

$$R_{fb2} = \frac{3,3}{V_{BAT} - 3,3} \times R_{fb1} \quad (5)$$

$$R_{fb2} = \frac{3,3}{4,2 - 3,3} \times 30k = 110k\Omega$$

$$R_{fb3} = 250k - (R_{fb1} // R_{fb2}) \quad (6)$$

$$R_{fb3} = 250k - (30k // 110k) \approx 227k\Omega$$

d CI LTC3119

O CI LTC3119 funciona como conversor CC/CC buck-boost (abaixador-elevador), isso é, ele é capaz de abaixar ou aumentar o nível de tensão em corrente contínua da saída em relação a entrada. O ponto de MPPT para aplicações fotovoltaicas deve ser ajustado através de resistores ao utilizar esse CI. E a tensão de entrada deve estar entre 2,5 V e 18 V, podendo cair até 250 mV após a inicialização do CI. A tensão de saída (ou tensão de carregamento) pode variar entre 0,8 V a 18 V e é capaz de carregar baterias de Lítio de 1 a 4 células. Esse CI possui corrente máxima de saída 5 A. A frequência de chaveamento pode ser programada entre 400 Hz a 2 MHz utilizando capacitores e indutores.

Para o carregamento de bateria 1s o CI LT3652 é suficiente, no entanto para carregar baterias de 2s a 4s as simulações foram feitas usando o CI LTC3119.

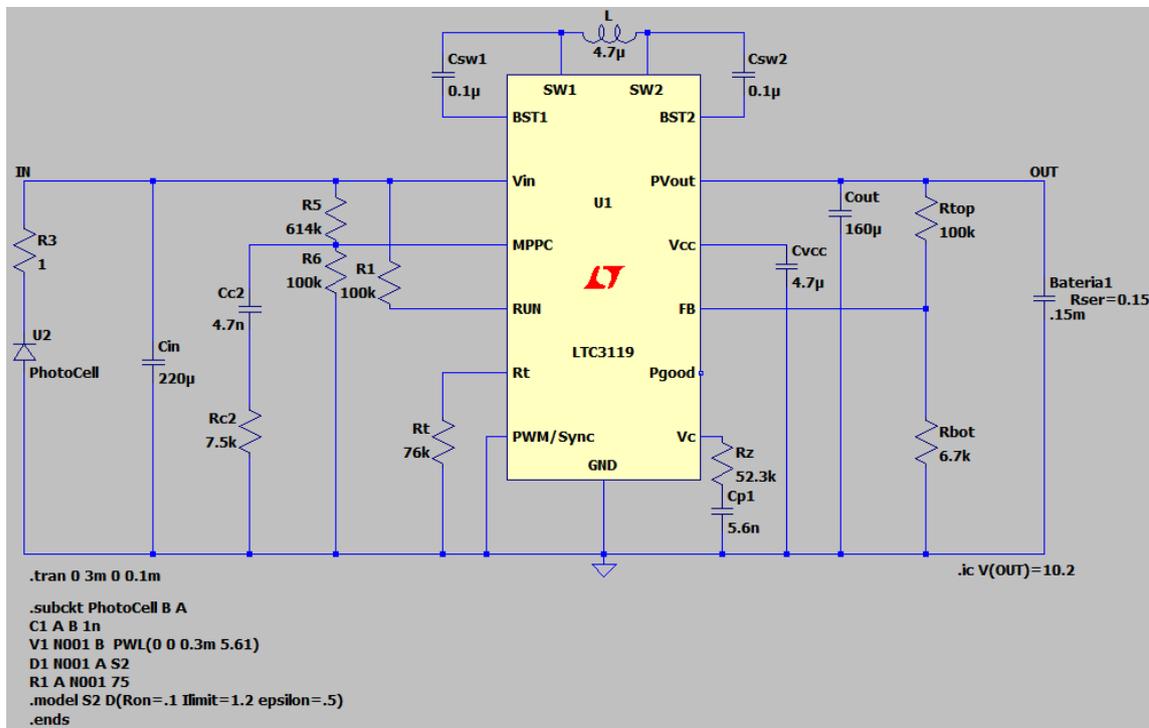


Figura 21: Simulação do Carregamento de Bateria 3s - CI LTC3119

Na Figura 21 está representado o circuito para carregamento de uma bateria 3s, porém os circuitos de carregamento para baterias de 2s e 4s é semelhante, variando alguns valores de resistores, capacitores e a tensão inicial da bateria. Os circuitos foram baseados no circuito "Photovoltaic Panel Input Lead-Acid Charger with Temperature Correction (1MHz)" do datasheet na seção de aplicações típicas.

Entre as alterações feitas em relação ao datasheet estão as resistências que formam os divisores de tensão conectados as portas MPPC e PV_{OUT} e o capacitor da saída (C_{OUT}), além de não utilizar o compensador de temperatura NTC, pois não faz-se necessário monitorar a temperatura durante a simulação.

A porta MPPC é a responsável pelo ajuste do ponto de máxima potência em aplicações fotovoltaicas, para isso faz-se uso de um divisor de tensão, na imagem acima está representado pelos resistores R5 e R6. Para definir o valor dos resistores é necessário saber qual a tensão de MPPT (V_{MPPT}), neste caso foi considerado a média entre as tensões de máxima potência das medidas de caracterização descritas no capítulo 3.a.1. O resultado foi $V_{MPPT} = 5,7V$.

$$R5 = \left(\frac{V_{MPPC}}{0,798} - 1 \right) \times R6 \quad (7)$$

Considerando $R6 = 100k\Omega$:

$$R5 = \left(\frac{5,7}{0,798} - 1 \right) \times 100k \approx 614k\Omega$$

O divisor de tensão na porta PV_{OUT} é o responsável por regular a tensão de carregamento, na Figura 21 está representado pelos resistores R_{TOP} e R_{BOT} . Fixando $R_{TOP} = 100k\Omega$ R_{BOT} pode ser calculado pela eq.(8), considerando V_{OUT} a tensão de carregamento da bateria.

$$R_{BOT} = \frac{R_{TOP}}{\left(\frac{V_{OUT}}{0,795} - 1 \right)} \quad (8)$$

Para bateria 2s, $V_{OUT} = 8,4V$:

$$R_{BOT} = \frac{100k}{\left(\frac{8,4}{0,795} - 1 \right)} \approx 10,5k\Omega$$

Para bateria 3s, $V_{OUT} = 12,6V$:

$$R_{BOT} = \frac{100k}{\left(\frac{12,6}{0,795} - 1 \right)} \approx 6,7k\Omega$$

Para bateria 4s, $V_{OUT} = 16,8V$:

$$R_{BOT} = \frac{100k}{\left(\frac{16,8}{0,795} - 1 \right)} \approx 5k\Omega$$

Quanto ao capacitor C_{OUT} a única equação dada no datasheet para calculá-lo envolve parâmetros que fogem do escopo desse trabalho. Isso posto, o valor de C_{OUT} foi determinado por tentativa e erro para cada um dos 3 circuitos. Resultando em $80 \mu F$, $160 \mu F$ e $190 \mu F$ respectivamente para baterias de 2s, 3s e 4s.

e Resultados da Simulação

As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam os gráficos de tensão e corrente de carregamento da bateria para 1, 2, 3 e 4 células, respectivamente. Todos com a mesma janela de tempo.

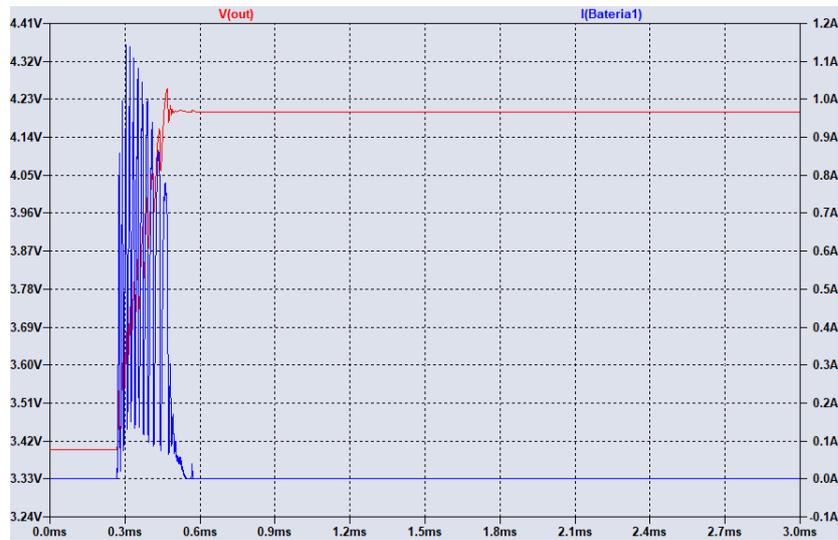


Figura 22: Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 1s - CI LT3652

O carregamento da bateria é representado pelo aumento da tensão até estabilizar na tensão de carregamento específica para a quantidade de células. No CI LT3652 a tensão mínima de entrada é 4,95 V e a tensão da célula fotovoltaica varia linearmente de 0 a 5,61 V em 3ms. Portanto, a tensão da bateria só começa a aumentar próximo dos 3ms, quando a tensão da célula solar iguala a 4,95 V e o CI é inicializado.

A corrente na bateria só varia enquanto a bateria está sendo carregada, fora isso a corrente é mantida constante em 0 A, pois ou o CI está desativado ou a carga está completa. Nesse caso, a corrente máxima chega a 1,14 A e a tensão se estabiliza em 4,2 V, após rápido pico em 4,24 V.

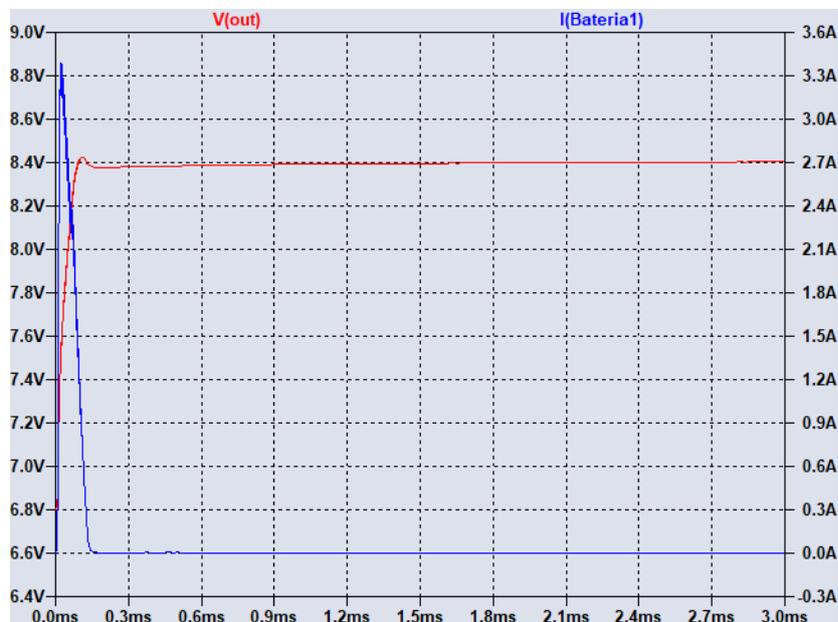


Figura 23: Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 2s - CI LTC3119

O CI LTC3119 possui valor de mínima tensão entrada menor, conseqüentemente, tem resposta mais imediata, como pode ser visto nos 3 casos onde esse foi o CI utilizado. A corrente por sua vez tem um aumento súbito logo no início do carregamento e decresce enquanto a tensão aumenta, até que a tensão se estabilize no valor desejado e a corrente fique estável em 0 A.

Os valores de máxima corrente são, na ordem: 3,4 A, 2,75 A e 2,65 A. Respeitando a máxima corrente de saída do CI, 5 A.

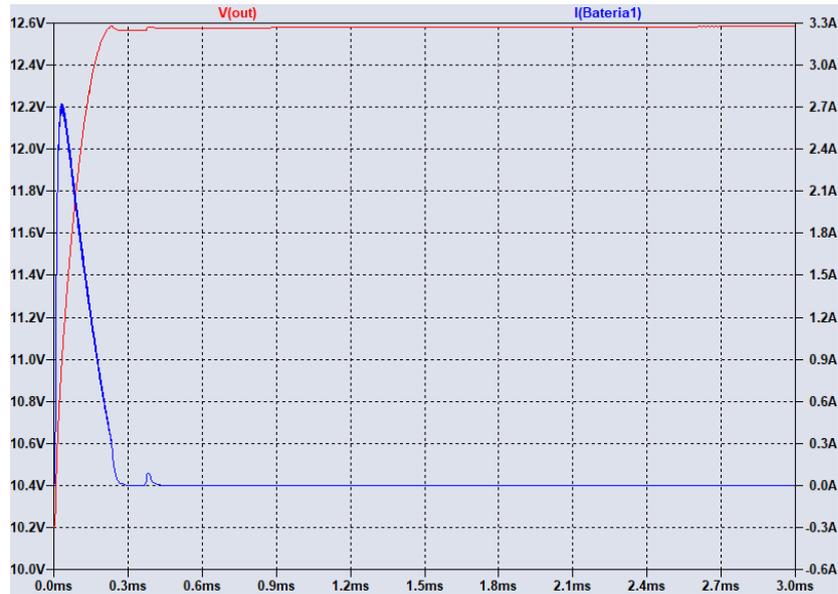


Figura 24: Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 3s - CI LTC3119

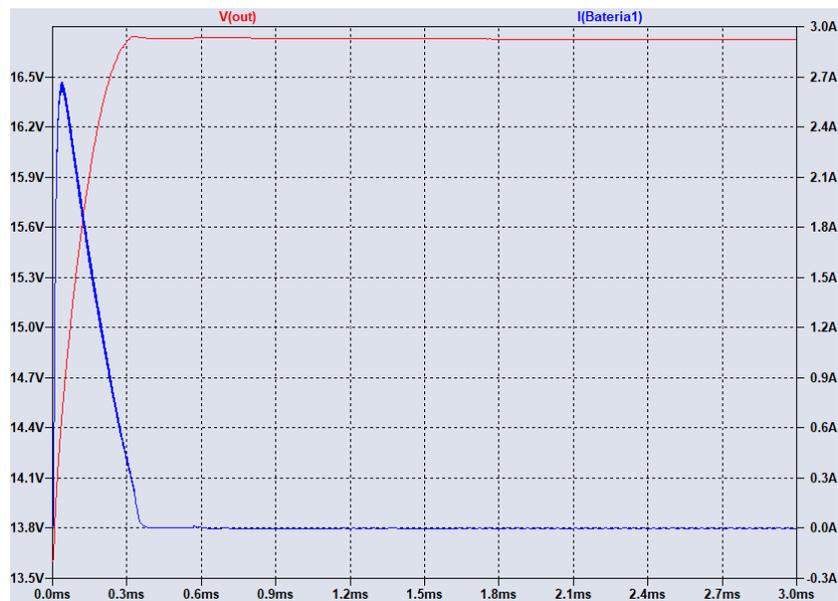


Figura 25: Gráfico de Tensão e Corrente na Simulação do Carregamento de Bateria 4s - CI LTC3119

Nas 4 simulações o carregamento da bateria ocorre de forma instantânea, levando aproximadamente 3ms, a partir do momento em que o CI é iniciado, para carregar totalmente. Esse resultado não condiz com a realidade, pois além de as simulações ficarem mais pesadas e demoradas considerando o tempo real, a célula fotovoltaica e a bateria são simulados de forma aproximada, desconsiderando interferência de fatores que na prática não podem ser descartados. Esses modelos foram usados por falta de modelos mais realistas apenas para que pudesse ser averiguado o funcionamento ideal dos CI e como pontapé inicial para montagem do circuito final.

7 Conclusão

Com a caracterização da célula fotovoltaica foi possível identificar o ponto de operação ideal e a máxima potência gerada. Esses resultados foram importantes para a compreensão do comportamento de geração da célula solar ao longo de um dia e para a simulação do circuito de carregamento das baterias de lítio-polímero, para diferentes quantidades de células.

Por sua vez, o registro do comportamento da célula fotovoltaica ao longo do dia poderá ser usado para encontrar uma função que modele a geração diária de uma célula solar. Combinando a função de geração da célula ao cálculo de gasto energia do VANT durante o voo, torna-se possível estimar o aumento da autonomia de voo gerado ao adicionar a célula fotovoltaica ao VANT.

As simulações dos circuitos de carregamento utilizaram-se dos resultados experimentais obtidos nesse trabalho, por intermédio da tensão média de geração e da tensão média do ponto de operação. Os resultados obtidos com as simulações são um bom começo para o projeto do circuito real de carregamento para bateria.

a Trabalhos Futuros

Como futuro do trabalho aqui realizado apresentam-se duas frentes: a continuidade dos estudos e análises teóricas e a implementação de um arranjo experimental que combine célula fotovoltaica e bateria na prática.

A análise teórica deverá se iniciar pela modelagem da função de geração da célula solar. Em seguida deverá ser feito um levantamento de todos os elementos do VANT, seus consumos e pesos, do peso total do VANT e da capacidade das baterias disponíveis. Desse modo, será possível estimar o consumo total da VANT, o tempo de voo apenas com a bateria e a expectativa de tempo de voo com a célula fotovoltaica.

A montagem experimental do circuito de carregamento da bateria, utilizando ambos os CIs, LT3652 e LTC3119, não foi feita no presente trabalho devido aos encapsulamentos desses CIs serem incompatíveis com a protoboard e aos adaptadores comprados para a devida compatibilização não terem chegado a tempo hábil. Visto que o circuito ainda precisa ser testado, não seria sensato soldar diretamente os CIs em uma placa de circuito impresso. Portanto, a montagem dos circuitos aqui simulados e a finalização dos ajustes do projeto do circuito de carregamento ficará para trabalhos futuros que deem continuidade ao estudo aqui apresentado.

Por fim, com o circuito funcionando, devem ser realizados testes com o VANT em voo, um com o VANT utilizando apenas bateria e outro, com o VANT utilizando a energia fotovoltaica para alimentação da bateria durante o voo. Os resultados de ambos os testes devem ser comparados para que possa ser determinado o real aumento da autonomia de voo.

Referências

- [1] J. Carneiro, "Semicondutores – modelo matemático da célula fotovoltaica," 2010, electromagnetismo B, Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- [2] C. A. do Nascimento, "Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica," 2004, monografia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.
- [3] A. M. Vallêra and M. C. Brito, "Meio século de história fotovoltaica," Lisboa, Portugal, 2006. [Online]. Available: <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>
- [4] R. P. Braga, "Energia solar fotovoltaica: Fundamentos e aplicações," 2008, monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- [5] V. P. Mattos, "Controle de carga para bateria de lítio de um hidrone por meio de energia solar fotovoltaica," 2018, monografia, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- [6] H. C. Demolinari, "Projeto de construção um drone hexacóptero," 2016, monografia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

[1] [2] [3] [4] [5] [6]

A Apêndice

a Códigos Arduino

1 Código de Inicialização

```
#include <EEPROM.h>

int cont;
void setup() {
  // define o contador como 0:
  EEPROM.put(0,0);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // exibe o valor do contador no monitor serial
  EEPROM.get(0,cont);
  Serial.print(cont);
}
```

2 Código Principal

```
#include <EEPROM.h>
#include <GFButton.h>

GFButton botao1(46);
const int LED_A = 52;
const int LED_VM = 53;
const int LED_VD = 51;
const int tensaoPIN = A1;

int cont;
int endereco;
int cont_botao = 2;
unsigned long atual;
unsigned long anterior = 0;

void setup() {
  EEPROM.get(0,cont);
  // as 2 primeiras posições da memória guardam a quantidade de dados que já foram adquiridos;
  // os dados começam a ser armazenados na posição 2

  endereco = 2 + (cont * 4);
  //4 é a quantidade de endereços utilizados para armazenar os dados de uma medição(tensão)

  Serial.begin(9600);
  pinMode(LED_A, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_A,LOW);
  pinMode(LED_VM, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_VM,LOW);
  pinMode(LED_VD, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_VD,LOW);

  botao1.setPressHandler(Press_1);
  Serial.print("Inicio do programa1.\n\n");
}

void loop() {
  int TensaoLida;
  float Tensao;
```

```

if(cont_botao == 1){
  atual = millis();
  // aguarda 10 min para nova medida
  if((atual - anterior) >= 600000 || anterior == 0){
    digitalWrite(LED_VM,HIGH);
    TensaoLida = analogRead(tensaoPIN);

    Tensao = TensaoLida * (10.0/1024);
    // a tensão real deverá ser dobrada,
    // pois será utilizado um divisor de tensão na entrada do arduino

    cont ++;
    EEPROM.put(endereco,Tensao);
    endereco += 4;
    anterior = millis();

    // atualiza o contador a cada 10 medidas
    if(cont % 10 == 0){
      EEPROM.put(0,cont);
    }
    digitalWrite(LED_VM,LOW);
  }
}
botao1.process();
}

void Press_1(GFButton& botao1){
  if(cont_botao == 1){
    // estado de escrita
    EEPROM.put(0,cont);
    digitalWrite(LED_A,LOW);
    digitalWrite(LED_VD,HIGH);
    exibi_Serial();
    cont_botao = 0;
  }
  else{
    // estado de leitura
    digitalWrite(LED_A,HIGH);
    digitalWrite(LED_VD,LOW);
    cont_botao = 1;
  }
}

void exibi_Serial(){
  // função para exibir no monitor serial os dados aquisitados
  int i;
  int qtd;
  int ende;
  float tensao;

  EEPROM.get(0,qtd);
  ende = 2;

  for(i = 0; i < qtd; i++){
    EEPROM.get(ende,tensao);
    Serial.print(tensao);
    Serial.print("V \n");
    ende += 4;
  }
}

```