



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica



RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA
PARAMETRIZAÇÃO DE PAINEL SOLAR
FOTOVOLTAICO**

JOÃO PESSOA/PB

2017

RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA
PARAMETRIZAÇÃO DE PAINEL SOLAR
FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba - Campus I, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Vinicius Hartmann.

João Pessoa, Paraíba, Brasil

©Rafael Pereira de Medeiros, Novembro de 2017

RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS

SISTEMA MICROCONTROLADO PARA PARAMETRIZAÇÃO DE PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO/ RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS. – JOÃO PESSOA/PB, 2017-

50 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Lucas Vinicius Hartmann, Dr.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.

1. Painel Fotovoltaico. 2. Parametrização de Painel Fotovoltaico. 3. Sistema Micro-controlado.

RAFAEL PEREIRA DE MEDEIROS

SISTEMA MICROCONTROLADO PARA PARAMETRIZAÇÃO DE PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em En-
genharia Elétrica da Universidade Federal da
Paraíba - Campus I, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: 23/11/2017.

BANCA EXAMINADORA



Lucas Vinicius Hartmann, Dr.
Orientador



Camila Seibel Gehrke, Dr.
Membro 1



Darlan Mexandria Fernandes, Dr.
Membro 2

JOÃO PESSOA/PB

2017

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, pois eu sempre o sinto presente em minha vida, principalmente nos momentos mais decisivos. E mais, com um cuidado tão especial, que não teria como descrever aqui.

Também gostaria de agradecer à minha avó, por ser tão presente em minha vida, por ter sido minha primeira professora, por ter ido todos os dias me ajudar com as tarefas de casa e por ser tão atenciosa comigo. Agradecer também à minha mãe, por sempre ter feito o possível e o impossível para que eu tivesse uma educação de qualidade e nunca ter deixado faltar nada para mim e meu irmão. Agradecer ao meu irmão, por ser a companhia que sempre pedi à Deus, sempre me mostrando que posso melhorar e que também posso ensinar. Agradecer ao meu pai, por todas as boas características que tenho certeza que herdei dele e, mesmo após morte, eu também o sinto muito presente em minha vida, me ajudando nos momentos difíceis e de dúvidas.

Gostaria de agradecer à Pábula Vieira, pela ajuda fundamental ao longo de todo o curso, pela ajuda na elaboração deste trabalho e em diversos aspectos de minha vida. Agradecer aos meus amigos Matheus, Hícaro, Samuel, Tácio, Igor e Lauro, que desde o tempo de colégio me trazem boas risadas, momentos sinceros e únicos. Agradecer também aos amigos André e Jean, que compartilham comigo essa caminhada na engenharia, a tornando muito mais divertida e sucinta. Além disso, sempre me mostram como ser uma pessoa melhor, seja profissional ou pessoalmente. Também gostaria de agradecer a todos os colegas e profissionais que me ajudaram ao longo do curso.

Por fim, também gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Lucas Hartmann pela paciência e por tudo que pude aprender, ao longo de 3 anos de parceria, passando por monitoria, iniciação científica e trabalho de conclusão de curso. Aos professores Nady Rocha e Euler Macêdo, por todo o amadurecimento, boas experiências e aprendizado que vivi no Grupo do Programa de Educação Tutorial em Engenharia Elétrica (PET-Elétrica). Ao professor Darlan Alexandria e Camila Gehrke, pela valiosa avaliação e contribuição neste trabalho. E agradecer a todos os professores, pela contribuição em minha formação.

*“Vós sois o sal da terra.
Vós sois a luz do mundo.”
(Bíblia Sagrada, Mateus 5.14-16)*

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um sistema para parametrização de um painel solar fotovoltaico. Inicialmente é realizada uma revisão bibliográfica dos componentes e conceitos utilizados no projeto. Os principais parâmetros dos painéis fotovoltaicos envolvem variáveis como tensão em circuito aberto, corrente de curto-circuito, ponto de máxima potência, corrente e tensão para o ponto de máxima potência. O sistema é constituído por um circuito caracterizador, um bloco para aquisição da tensão, um bloco para aquisição da corrente do painel fotovoltaico e uma placa Tiva™ C Series TM4C1294. Além disso, também são descritas as lógicas utilizadas para o processamento dos dados adquiridos. Finalmente, são realizadas simulações e testes práticos, a fim de verificar o comportamento do circuito de aquisição e comparar os resultados obtidos por simulação e experimentalmente.

Palavras-chave: Painel Fotovoltaico, Parametrização de Painel Fotovoltaico, Sistema Microcontrolado.

ABSTRACT

In this work, is presented a system for parametrization of a photovoltaic panel. Initially, a bibliographic review, from components and theory used in project, is made. The main parameters of photovoltaic panels involve variable as open circuit voltage, short circuit current, maximum power point, current and voltage in the maximum power point. The system is compound by a characterization circuit, one block for acquirement of voltage, one block for acquirement of current of photovoltaic panel and one Tiva™ C Series TM4C1294 board. Futhermore, also are described the logics used to data processing. Finally, simulations and practical tests are made, in order to verify the behavior of acquisition circuit and compare the obtained results in simulation and experimentally.

Keywords: Photovoltaic Panel, Photovoltaic Panel's Parameterization, Microcontrollated System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Dispositivos que apresentam parâmetros dos painéis fotovoltaicos.	15
Figura 2 – Representação de uma célula fotovoltaica.	19
Figura 3 – Circuito equivalente para uma célula fotovoltaica.	20
Figura 4 – Curva característica IxV de um painel fotovoltaico.	23
Figura 5 – Curva característica PxV de um painel fotovoltaico.	23
Figura 6 – Conjunto de curvas IxV para variadas condições de radiação incidente.	24
Figura 7 – Conjunto de curvas PxV para variadas condições de radiação incidente.	25
Figura 8 – Conjunto de curvas IxV para variados valores de temperatura.	25
Figura 9 – Conjunto de curvas PxV para variados valores de temperatura.	26
Figura 10 – Amplificador operacional.	26
Figura 11 – Amplificador operacional na configuração seguidor de tensão.	27
Figura 12 – Amplificador operacional na configuração não-inversora.	28
Figura 13 – Placa Tiva™ C Series TM4C1294.	29
Figura 14 – Sequência de eventos para caracterização de painéis fotovoltaicos.	30
Figura 15 – Temporizador 555 em modo astável e 50% de ciclo de trabalho.	30
Figura 16 – Parâmetros fornecidos pelo fabricante.	32
Figura 17 – Esquemático do circuito caracterizador.	33
Figura 18 – Circuito caracterizador.	33
Figura 19 – Oscilação indesejada.	34
Figura 20 – Circuito completo para parametrização.	35
Figura 21 – Circuito para simulação no Multisim™.	36
Figura 22 – Fluxograma principal do projeto.	37
Figura 23 – Fluxograma da programação implementada.	38
Figura 24 – Montagem realizada.	39
Figura 25 – Simulação de curvas no tempo.	40
Figura 26 – Simulação de plotagem de curva IxV.	41
Figura 27 – Simulação no tempo, para tensão e corrente.	41
Figura 28 – Simulação no tempo, para tensão, corrente e potência.	42
Figura 29 – Resultados observados para tensão, corrente e potência.	42
Figura 30 – Curva experimental da tensão ao longo do tempo.	43
Figura 31 – Curva experimental da corrente ao longo do tempo.	44
Figura 32 – Curva IxV experimental.	44
Figura 33 – Curva V para uma faixa de pontos mais restrita.	45
Figura 34 – Curva I para uma faixa de pontos mais restrita.	45
Figura 35 – Curva característica PxV obtida experimentalmente.	46
Figura 36 – Curva característica IxV obtida experimentalmente.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características do microcontrolador TM4C1294NCPDT.	29
Tabela 2 – Principais parâmetros do painel JNP-3.0(9.0).	31
Tabela 3 – Resumo dos parâmetros analisados do painel fotovoltaico.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
ADC	Conversor Analógico-Digital (do inglês, <i>Analog-to-Digital Converter</i>)
MPP	Ponto de Máxima Potência (do inglês <i>Maximum Power Point</i>)
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (do inglês <i>Maximum Power Point Tracking</i>)
V_{oc}	Tensão em Circuito Aberto (do inglês <i>Open Circuit Voltage</i>)
I_{sc}	Corrente de Curto-Circuito (do inglês <i>Short Circuit Current</i>)
ISR	Rotina Serviço de Interrupção (do inglês, <i>Interrupt Service Routine</i>)
NPT	Número de Pontos
V_{max}	Tensão no Ponto de Máxima Potência
I_{max}	Corrente no Ponto de Máxima Potência
FF	Fator de Forma
STC	Condições de Teste Padrão (do inglês, <i>Standard Test Conditions</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	[V/V]	Ganho de malha aberta do amplificador operacional.
G	[W/m ²]	Irradiância Solar.
G^*	[W/m ²]	Irradiância Solar para condições STC.
I_{ph}	[A]	Corrente gerada pela absorção de radiação solar (do inglês, <i>Photovoltaic Current</i>).
I_{ph^*}	[A]	Corrente gerada pela absorção de radiação solar, nas condições STC.
I_{pv}	[A]	Corrente gerada pelo painel fotovoltaico.
I_s	[A]	Corrente de saturação do diodo.
k	[J/K]	Constante de Boltzman.
N	[-]	Fator de idealidade do diodo.
q	[C]	Carga elétrica elementar.
T	[°C]	Temperatura do painel fotovoltaico.
ΔT	[°C]	Varição da temperatura do painel fotovoltaico, com relação às condições STC.
V_{pv}	[V]	Tensão gerada pelo painel fotovoltaico.
V_{Ent}	[V]	Tensão de entrada.
V_{saida}	[V]	Tensão de saída.
V_+	[V]	Entrada não-inversora do amplificador operacional.
V_-	[V]	Entrada inversora do amplificador operacional.
μ_{sc}	[A/K]	Coefficiente de temperatura de curto-circuito.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	Justificativa	16
1.3	Organização do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Energia solar fotovoltaica	18
2.2	Modelos equivalentes para painéis fotovoltaicos	20
2.2.1	Modelagem em Circuito Equivalente	20
2.2.2	Modelagem Matemática	21
2.3	Principais parâmetros dos painéis fotovoltaicos	21
2.4	Curvas características do painel fotovoltaico	22
2.5	Influência da variação da irradiância solar	23
2.6	Influência da variação da temperatura	24
2.7	Amplificadores operacionais	26
2.7.1	Seguidor de tensão (<i>buffer</i>)	27
2.7.2	Configuração não-inversora	27
2.8	Plataforma Tiva™ C series TM4C1294	28
2.9	Caracterização de painéis fotovoltaicos	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	Parâmetros do painel	31
3.2	Circuito caracterizador de painéis fotovoltaicos	32
3.3	Simulações	34
3.4	Lógicas utilizadas	36
3.5	Configurações de montagem	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Resultados em simulação	40
4.2	Resultados experimentais	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia pelos seres vivos representa algo vital, fundamental na manutenção das espécies. É por meio da nutrição que é possível obter energia, e assim almejar as demais necessidades básicas, como segurança, por exemplo. Um marco na história do homem foi o uso do fogo, pois pela primeira vez foi possível se aquecer, por meio da energia térmica liberada na combustão, e ter iluminação noturna, por meio da radiação emitida. Isto caracterizou o primeiro uso de uma fonte não natural. E por muitos séculos a principal fonte de energia utilizada foi a proveniente da queima de combustíveis fósseis, potencializada com o advento da revolução industrial. As possibilidades do uso da energia foram então novamente ampliadas com os estudos dos fenômenos da eletricidade, tornando o cotidiano cada vez mais prático. (FARIAS L. M.; SELLITTO, 2011)

Contudo, os meios para obtenção da energia elétrica continuam sendo baseados principalmente no uso dos combustíveis fósseis. Em 2016, a porcentagem de utilização destas fontes continuou em 85,5% (BP GLOBAL, 2017), em cenário mundial. No Brasil, a distribuição da potência instalada possui como destaque o uso da energia elétrica obtida por meio de hidrelétricas, representando 61,1% (ANEEL, 2017a). A geração de energia elétrica por meio de usinas hidrelétricas é tida como uma fonte renovável, por não haver liberação de gases na atmosfera. Todavia, apresenta impactos ambientais e sociais, como inundação de grandes áreas e deslocamento de habitantes (NETO M. R.; CARVALHO, 2013).

A geração por meio da energia solar fotovoltaica é apresentada como uma possível solução para as fontes esgotáveis ou mesmo para os problemas de implantação e operação das hidrelétricas. Há diversos estudos que comprovam a viabilidade da implementação de sistemas de geração distribuída (que é a geração de energia elétrica junto ou próximo ao consumidor) com base em painéis fotovoltaicos (BEIGEL, 2013). Aliado a tais estudos, a aprovação da Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482/2012, que beneficia a microgeração (menor ou igual a 100 kW) e minigeração (entre 100 kW e 1 MW), alavancou um aumento considerável na instalação de painéis solares no Brasil. A partir da norma, foi estabelecido um sistema de compensação de energia elétrica, no qual é possível o consumidor instalar pequenos geradores e assim trocar energia com a distribuidora local. Dessa forma, caso o consumidor gere mais energia que a consumida, há um abatimento na conta de energia elétrica. (ANEEL, 2012)

A resolução foi revista em 2015, passando a permitir o uso de qualquer fonte renovável, denominando-se assim a microgeração distribuída. Além disso, a utilização dos créditos teve validade ampliada, passando a 60 meses. Assim como, também passou a ser possível a utilização na forma de autoconsumo remoto, ou seja, sendo possível o abatimento no consumo de unidades

consumidoras do mesmo titular, de modo que tais unidades possam se localizar em regiões distintas, mas estejam situadas na área de atendimento da mesma distribuidora. Por fim, na época também foi realizada uma estimativa, na qual foi previsto que em 2024 o total de consumidores que produzem a própria energia passaria de 1,2 milhão, correspondendo a uma potência instalada de 4,5 GW (ANEEL, 2015). No primeiro semestre de 2017, o número de painéis instalados dobrou, passando para mais de 10 mil pontos instalados, correspondendo a mais de 113 kW de potência instalada (ANEEL, 2017b).

Assim, diante da crescente utilização dos sistemas fotovoltaicos, torna-se cada vez mais necessário o conhecimento acerca do tema. Visto que, para um correto funcionamento do sistema fotovoltaico algumas condições, a serem discutidas nos capítulos seguintes do presente trabalho, devem ser atendidas. De modo a auxiliar os consumidores que utilizam painéis fotovoltaicos, há equipamentos e dispositivos que exibem informações sobre a operação de tais painéis. Na Figura 1 são apresentados alguns exemplos de dispositivos que apresentam parâmetros dos painéis fotovoltaicos aos usuários.

Figura 1 – Dispositivos que apresentam parâmetros dos painéis fotovoltaicos.



Fonte 1a: <http://ecosolys.com.br/>; Fonte 1b: <https://www.miniinthebox.com/>; Fonte 1c: (HT INSTRUMENTS, 2017).

É apresentado na Figura 1a um inversor, que é um dispositivo utilizado para converter a corrente contínua (CC), como a gerada nos painéis fotovoltaicos, para corrente alternada (CA). Alguns inversores, como o ilustrado na Figura 1a, apresentam informações da operação do painel fotovoltaico (como tensão, corrente, potência, por exemplo), seja em display ou por meio de uma interface em computador. Contudo, a informação apresentada por tais inversores algumas vezes é meramente visual, podendo não disponibilizar os dados ao usuário, na forma de uma planilha para uso posterior, por exemplo. E mais, caso o propósito seja apenas a parametrização do painel, o custo de um inversor pode acabar não compensando (PORTAL SOLAR, 2017).

O dispositivo apresentado na Figura 1b é um controlador de carga, dispositivo utilizado para conexão entre painéis fotovoltaicos, baterias e inversores, realizando o controle entre carga e descarga das baterias. Alguns controladores de carga também apresentam displays, para exibição da tensão, corrente e potência do painel fotovoltaico conectado a ele. Caso o usuário deseje

visualizar as informações de forma gráfica, é necessário acoplar ao controlador de carga um módulo de comunicação Wi-fi, o qual envia as informações do painel em rede internet. Entretanto, ao acrescentar o módulo de comunicação, o preço do controlador aumenta e a interface utilizada é muito simplificada (EPEVER, 2017).

Conforme apresentado por CAMPOS (2013), há uma opção de dispositivo para caracterização de painéis (ou módulos) fotovoltaicos, como apresentado na Figura 1c. Tal dispositivo apresenta display para exibição de gráficos e curvas, possui conexão Wi-fi e também apresenta opção para exportar dados. Contudo, tal produto ainda apresenta custo elevado, podendo chegar a mais de 10 mil reais, em conversão direta (HT INSTRUMENTS, 2017). Além disso, outras marcas também apresentam custo elevado (SOLMETRIC, 2014), (HERNDAY, 2011). Com isso, propõe-se um sistema para obtenção de parâmetros de painéis fotovoltaicos, de modo que seja acessível para usuários sem muito conhecimento no tema e de custo não elevado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

No presente trabalho é apresentado um método para caracterização de painéis fotovoltaicos, com uso de dispositivos eletrônicos simples, como resistores, capacitores e amplificadores operacionais. Além disso, para aquisição dos dados de tensão e corrente de tais painéis, foi utilizado um microcontrolador TM4C1294NCPDT, presente na plataforma Tiva™ C Series TM4C1294 (TEXAS INSTRUMENTS, 2014a).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo sobre os principais parâmetros analisados no estudo dos sistemas fotovoltaicos;
- Dimensionamento e montagem de um protótipo para obtenção de parâmetros como tensão e corrente de um painel fotovoltaico;
- Disponibilização dos dados obtidos ao usuário, na forma de conjunto de valores e gráficos obtidos experimentalmente;
- Comparação dos dados obtidos com os dados previstos do painel em análise.

1.2 Justificativa

Diante dos objetivos apresentados, esta pesquisa justifica-se pelo considerável aumento no uso da energia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica nos últimos anos, seja no

Brasil ou mundialmente (SOLARPOWER EUROPE, 2017), enquanto que instrumentos que apresentem informações dos painéis fotovoltaicos continuam pouco acessíveis.

Além disso, com os dados obtidos, é possível utilizar técnicas para verificação do Ponto Máxima Potência (do inglês *Maximum Power Point*) (MPP), de modo que o painel fotovoltaico possa operar no ponto de maior geração de energia. Tais técnicas são denominadas Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (do inglês *Maximum Power Point Tracking*) (MPPT) (HARTMANN et al., 2013).

Ainda sobre a operação do painel fotovoltaico, projetos como este permitem a observação de fatores como: auxílio no posicionamento correto do painel, de modo absorver a maior radiação solar possível, e a verificação de efeitos de sombreamento. Tais fatores influenciam nos níveis de tensão e corrente gerados.

Por fim, o projeto pode ser utilizado para fins didáticos, no estudo da parametrização dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que o sistema apresenta baixo custo e a utilização da plataforma Tiva™, que conta com diversos tópicos em fóruns e material disponível. Com os dados obtidos, também é possível realizar comparações entre modelos de painéis fotovoltaicos, verificando valores de tensão, corrente e potência.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentados a introdução, contendo a contextualização da temática, além dos objetivos propostos ao projeto, a justificativa para tais objetivos e estrutura utilizada.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica, descrevendo os princípios da energia solar fotovoltaica, além de modelos equivalentes, curvas características, principais parâmetros dos sistemas fotovoltaicos e descrição da plataforma Tiva™ C Series TM4C1294.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o sistema de parametrização, contendo esquemas ilustrativos e a montagem utilizada.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos com o uso do protótipo. Os dados são comparados com os valores esperados para o painel utilizado nos testes.

No último capítulo são apresentadas as considerações finais do projeto, além de sugestões para possíveis trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais fatores ao se analisar sistemas fotovoltaicos. São abordados aspectos como a modelagem, curvas características, efeito de sombreamento e principais parâmetros observados em painéis fotovoltaicos. Além disso, também são descritas algumas características tanto dos amplificadores operacionais, que são utilizados nos circuitos de condicionamento dos sinais, quanto da plataforma utilizada para aquisição dos dados, a Tiva™ C Series TM4C1294.

2.1 Energia solar fotovoltaica

Todos os dias, o planeta Terra recebe uma grande quantidade de energia, na forma de radiação solar. Em horários próximos ao meio dia e em dias sem nuvens, a radiação incidente na superfície terrestre pode chegar a 1 kW/m^2 (TIGGEMANN, 2015). Ao longo de um ano, a energia fornecida pelo Sol para a atmosfera da Terra é de aproximadamente $1,513 \times 10^{18} \text{ kWh}$. (HALMEMAN, 2014)

Buscou-se então, tentar aproveitar tal energia oriunda do Sol. Durante muitos séculos teve-se apenas a conversão em energia térmica como principal uso da energia solar. Até que em 1839 o físico francês Alexandre-Edmond Becquerel observou o surgimento de uma diferença de potencial entre placas metálicas, mergulhadas em eletrólito, quando expostas à luz. Caracteriza-se assim o efeito fotovoltaico, ou seja, a conversão da energia solar incidente em energia elétrica (SZABÓ, 2017).

Após a descoberta do efeito fotovoltaico, o inventor Charles Fritts, em 1883, fabricou as primeiras células fotovoltaicas baseadas em Selênio, entre uma chapa de ferro e uma camada semitransparente de ouro na parte superior. A célula fotovoltaica é a unidade básica de um sistema fotovoltaico (SZABÓ, 2017).

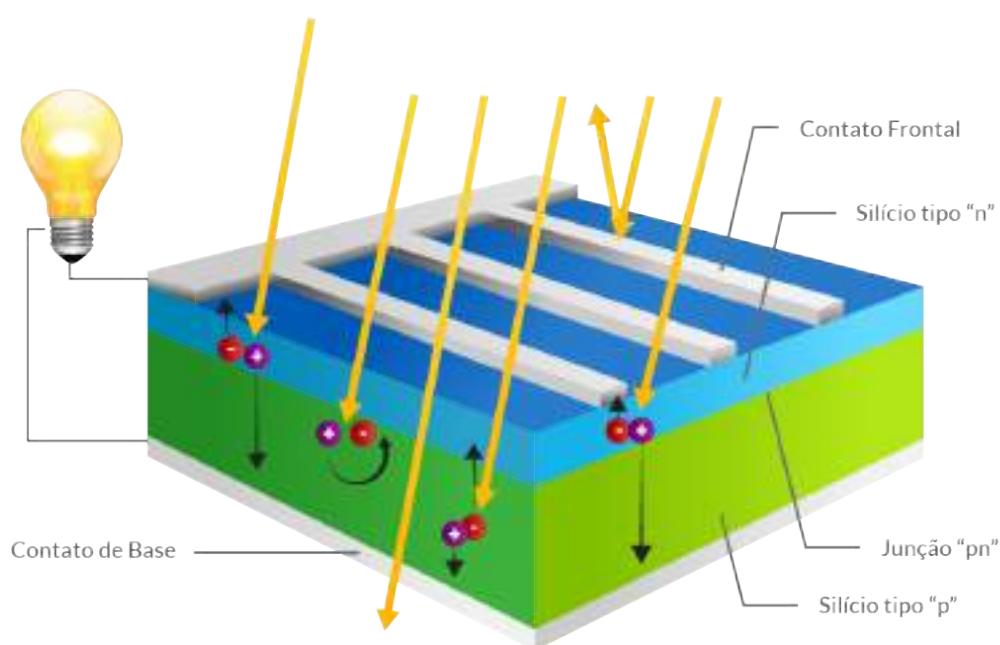
Posteriormente, houve o advento dos estudos do físico Albert Einstein, com a formulação de diversos teoremas, como a descoberta da lei do efeito fotoelétrico, em 1905. Além disso, também houveram contribuições do engenheiro Russell Shoemaker Ohl, como a patente da célula fotovoltaica baseada em semicondutores, em 1946, e posteriormente a descoberta do conceito da junção P-N (SZABÓ, 2017).

Com isso, alguns anos depois, as células fotovoltaicas passaram a apresentar o formato e características observadas nos painéis comercializados atualmente, consistindo em realizar a purificação do semicondutor, como Silício por exemplo, para que posteriormente seja realizada uma dopagem, no processo de fabricação destas células fotovoltaicas. Assim, tal dopagem consiste em inserir impurezas no material, de forma controlada, formando uma camada dopada

positivamente e outra camada dopada negativamente, consistindo assim na junção P-N entre tais camadas (LUNA, 2016).

Na Figura 2 é apresentado uma representação de uma célula fotovoltaica. Além das camadas P, N e da junção P-N, é possível observar o contato frontal e o contato de base, que correspondem aos terminais negativos e positivos da célula, respectivamente. A obtenção das camadas P-N pode ocorrer envolvendo diferentes processos e até outros semicondutores. Pode-se destacar as células fotovoltaicas fabricadas com base em Silício Monocristalino, Silício Policristalino, Silício Amorfo, Película Fina, Disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS) e Telureto de Cádmiio (CdTe) (SOUZA, 2017).

Figura 2 – Representação de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (SOUZA, 2017).

Contudo, uma única célula fotovoltaica gera uma tensão em torno de 0,5 V e corrente em torno de 3 A, correspondendo a uma potência máxima gerada em torno de 1,5 W, a depender da tecnologia utilizada e das condições de operação. Com isso, é necessário realizar associações em série e em paralelo de tais células, a fim de obter maiores níveis de tensão e corrente, necessários em diversas aplicações. Em geral, são observados painéis com cerca de 36 células (CAMPOS, 2013), (GABRIEL FILHO et al., 2012).

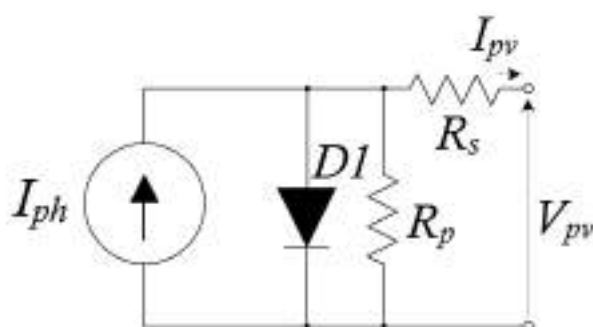
2.2 Modelos equivalentes para painéis fotovoltaicos

Ao longo dos estudos sobre energia solar fotovoltaica, viu-se a possibilidade da criação de modelos, a fim de ser possível ter uma aproximação do comportamento real observado nas células fotovoltaicas. Assim, há diversas aproximações, dentre elas, existem os modelos matemáticos e as representações na forma de circuito equivalente para as células fotovoltaicas (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009). Uma vez possuindo o modelo matemático, é possível obter-se os parâmetros de tais células fotovoltaicas e assim ter uma previsão do comportamento destas células em algumas situações, como aumento de temperatura, por exemplo.

2.2.1 Modelagem em Circuito Equivalente

O modelo do circuito equivalente para células fotovoltaicas é amplamente utilizado, devido à sua simplicidade. Um circuito equivalente para uma célula fotovoltaica é apresentado na Figura 3. Com este modelo, é possível obter parâmetros como a tensão e a corrente nos terminais da célula fotovoltaica, ou V_{pv} e I_{pv} , respectivamente.

Figura 3 – Circuito equivalente para uma célula fotovoltaica.



Fonte: Autoria Própria.

De forma que I_{ph} (do inglês, *photovoltaic current*) é uma fonte de corrente ideal, representando a corrente gerada pela célula fotovoltaica, sendo diretamente relacionada com a radiação solar incidente. $D1$ caracteriza um diodo, devido à característica exponencial dos semicondutores utilizados na fabricação das células fotovoltaicas, conforme citado anteriormente. R_s e R_p são as resistências em série e paralelo, respectivamente. Tais resistências caracterizam as perdas elétricas ao longo do processo de captação da radiação pela célula e posterior conversão em energia elétrica. I_{pv} e V_{pv} são a corrente e a tensão nos terminais do módulo, respectivamente. Tal circuito caracteriza-se como o modelo de célula fotovoltaica de diodo único (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

É possível obter valores para as resistências R_s e R_p , por meio das Equações (1) e (2), respectivamente.

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{max}}{I_{max}}. \quad (1)$$

$$R_p = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{max}}. \quad (2)$$

Os termos V_{oc} e I_{sc} correspondem à tensão em circuito aberto e à corrente de curto-circuito, respectivamente. E os termos V_{max} e I_{max} correspondem à tensão e à corrente do painel no ponto o qual é gerado a máxima potência, tais termos são detalhados na seção seguinte.

2.2.2 Modelagem Matemática

Ao analisar-se o circuito equivalente apresentado na Figura 3, é possível relacionar a corrente à tensão no módulo fotovoltaico. Tal relação é descrita pela Equação (3), característica do modelo de diodo único (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

$$I_{pv} = I_{ph} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} - I_s \exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{NkT} - 1\right). \quad (3)$$

No qual $k = 1,3806504 \times 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzman, I_s é a corrente de saturação reversa do diodo DI , $q = 1,60021765 \times 10^{-19}$ C é a carga elétrica elementar, N é o fator de idealidade do diodo DI e T é a temperatura da célula fotovoltaica (RAZAVI, 2010). A corrente I_{ph} é gerada a partir da radiação solar incidente, sendo descrita pela Equação (4).

$$I_{ph} = \frac{G}{G^*} (I_{ph*} + \mu_{sc} \Delta T). \quad (4)$$

O termo I_{ph*} corresponde à corrente gerada, para as condições de teste padrão (do inglês, *Standard Test Conditions*) (STC), μ_{sc} corresponde ao coeficiente de temperatura de curto-circuito em (A/K) e ΔT representa a variação da temperatura em relação à temperatura nas condições de teste STC (BELLIA; YOUCEF; FATIMA, 2014). O termo G corresponde à radiação solar incidente e o termo G^* corresponde à radiação nas condições STC.

2.3 Principais parâmetros dos painéis fotovoltaicos

Os parâmetros dos painéis fotovoltaicos são obtidos em testes sob condições específicas. Tais testes são denominados testes em condição padrão e servem para os fabricantes utilizarem como base para determinar os parâmetros dos painéis fotovoltaicos. As condições são definidas pela norma IEC 61215-2 e são listadas a seguir: incidência de radiação de 1000 W/m² no local do teste (G^*), temperatura na célula de 25°C e massa de ar de 1,5 (LUNA, 2016). Com isso, os principais parâmetros analisados em painéis fotovoltaicos são:

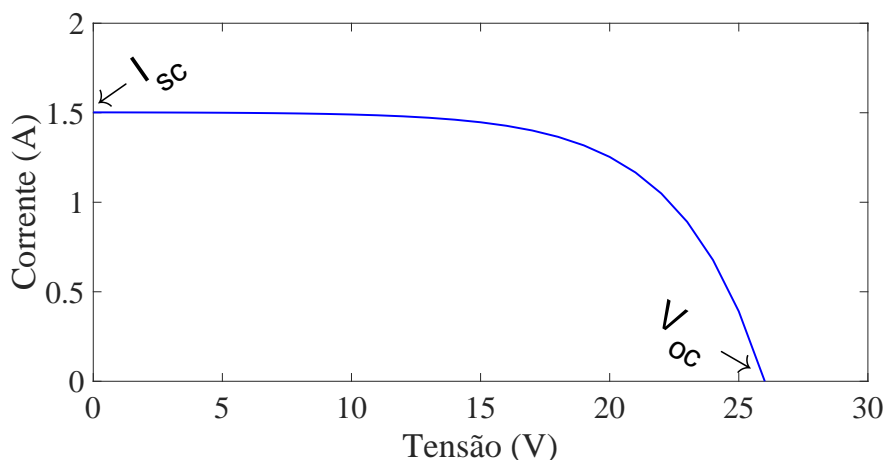
- **Tensão em Circuito Aberto (do inglês, *Open Circuit Voltage*) (V_{oc}):** É o maior valor de tensão que o módulo fotovoltaico pode gerar, de forma não há passagem de corrente elétrica entre seus terminais. Ou seja, os terminais não estão conectados a nenhuma carga.
- **Corrente de Curto-Circuito (do inglês, *Short Circuit Current*) (I_{sc}):** É o maior valor de corrente que o painel pode gerar, de forma que a tensão entre seus terminais é nula. Ou seja, tal condição ocorre para uma carga em curto-circuito.
- **Ponto de Máxima Potência (MPP):** O produto entre a tensão e a corrente gerada por um módulo fotovoltaico caracteriza a potência fornecida. Contudo, há apenas um ponto na curva característica corrente *versus* tensão ($I \times V$) no qual a potência gerada é máxima. Tal valor de potência depende de fatores como temperatura e radiação incidente.
- **Tensão no Ponto de Máxima Potência (V_{max}):** É o valor de tensão no qual o painel gera a máxima potência possível.
- **Corrente no Ponto de Máxima Potência (I_{max}):** É o valor de corrente no qual o painel gera a máxima potência possível.
- **Fator de Forma (FF):** A tensão em circuito aberto e a corrente de curto-circuito são os maiores valores possíveis para tensão e corrente em um painel fotovoltaico. Contudo, a potência observada em tais pontos é nula, visto que a corrente é nula para V_{oc} e a tensão será nula para a I_{sc} . Assim, o Fator de Forma é um parâmetro que relaciona a máxima potência que um módulo fotovoltaico consegue gerar (correspondente ao produto entre I_{max} e V_{max}) a uma carga, dividida pelo o produto entre I_{sc} e V_{oc} (GREEN, 1981).
- **Eficiência:** É o parâmetro que definido pela divisão entre máxima potência elétrica entregue à carga e a potência da energia solar incidente, potência esta que depende de fatores como a área da célula e a irradiância solar incidente. Ou seja, é uma proporção que indica a porcentagem de energia solar convertida em energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

Neste trabalho, são analisados os seguintes parâmetros: V_{oc} , I_{sc} , MPP, V_{max} e I_{max} , visto que são parâmetros obtidos de forma mais simples e direta.

2.4 Curvas características do painel fotovoltaico

Diante da relação entre I_{pv} e V_{pv} e dos principais parâmetros dos painéis fotovoltaicos, é possível obter representações gráficas para o comportamento elétrico de tais painéis. Com isso, pode-se definir a curva característica $I \times V$. Na curva $I \times V$ são apresentados os variados modos de operação do painel, definidos pelos parâmetros V_{oc} e I_{sc} . Na Figura 4 é apresentado um exemplo de curva $I \times V$. Os números significativos exibidos nos eixos dos gráficos utilizam o separador ponto ao invés da vírgula, pois é uma definição padrão do Matlab®.

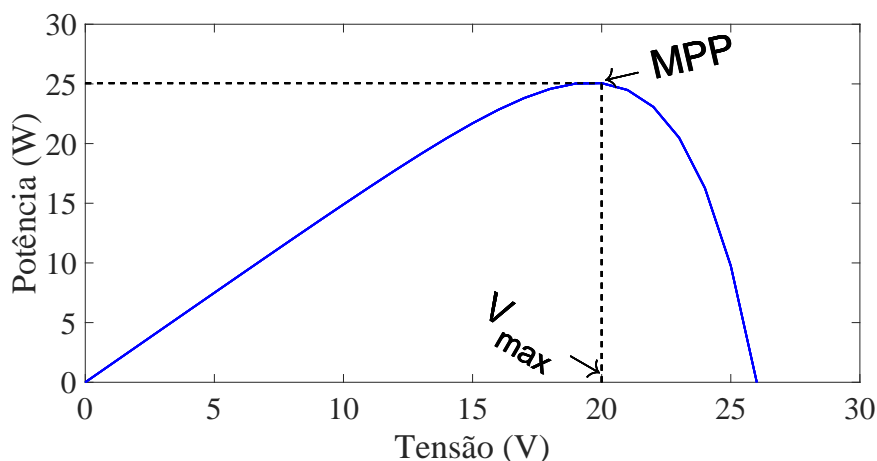
Figura 4 – Curva característica IxV de um painel fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria.

Ao multiplicar os valores de tensão pelos valores de corrente ao longo da curva IxV é possível obter a potência para os variados modos de operação do módulo fotovoltaico. Origina-se assim, a curva PxV. Na Figura 5 é apresentado um exemplo de curva PxV. É possível observar parâmetros como V_{max} e o MPP. Os valores adotados nas curvas IxV e PxV neste capítulo são ilustrativos.

Figura 5 – Curva característica PxV de um painel fotovoltaico.



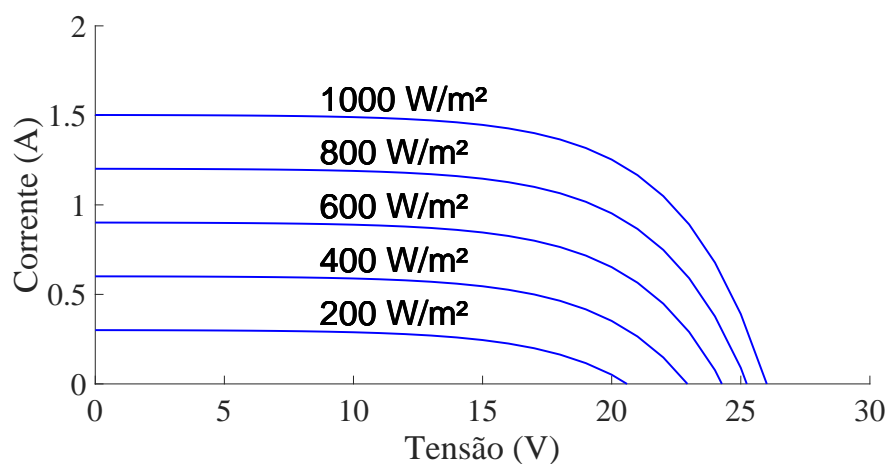
Fonte: Autoria própria.

2.5 Influência da variação da irradiância solar

Conforme citado anteriormente, de acordo com a Equação (4), a radiação solar incidente no painel influencia diretamente na corrente gerada pelo painel fotovoltaico. Conforme citado em Bellia, Youcef e Fatima (2014), a variação da irradiância solar só realmente afeta a tensão

nos terminais do painel fotovoltaico quando atinge valores baixos, como abaixo de 500 W/m^2 , por exemplo. Mantendo-se a temperatura constante e variando a radiação incidente, é obtido o conjunto de curvas IxV apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Conjunto de curvas IxV para variadas condições de radiação incidente.



Fonte: Autoria própria.

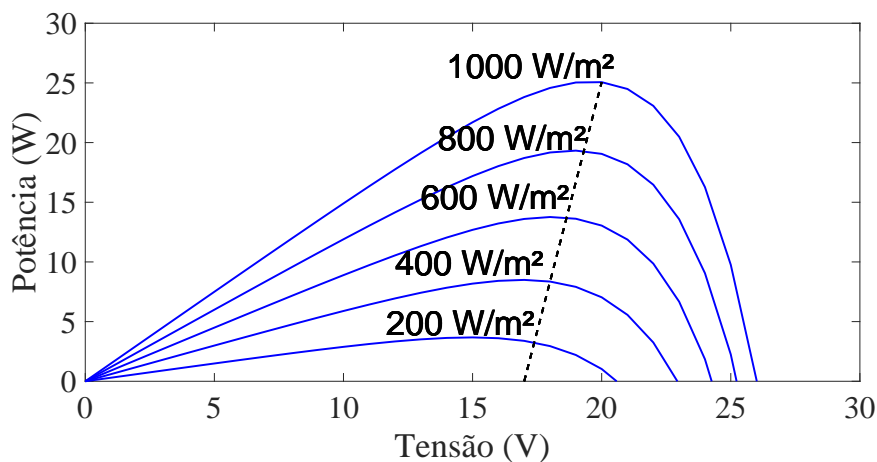
Pode-se observar uma diminuição nos níveis de tensão e corrente gerados, de acordo com os valores de radiação solar incidente indicados. Alguns fatores impedem a radiação de alcançar a superfície do painel fotovoltaico, provocando uma variação na radiação solar incidente. Esta variação pode ocorrer por diversos fatores, como sombreamento provocado pela passagem de nuvens ou sujeira no painel. E ainda, a radiação incidente varia de acordo com o horário, visto que normalmente são observados os maiores valores de irradiação próximo ao meio-dia (LUNA, 2016).

Variando-se os valores de tensão e corrente nos terminais do painel fotovoltaico, a potência entregue à carga também é influenciada pela variação da radiação solar incidente. A Figura 7 apresenta um conjunto de curvas PxV, de acordo com os valores de radiação indicados. Percebe-se que com a diminuição da radiação incidente, o ponto de máxima potência também decai. Além disso, também é possível verificar uma reta tracejada interligando os pontos de máxima potência. Assim, a potência gerada decai bastante, mas a tensão não decai muito com a variação da radiação incidente, conforme exibido no gráfico.

2.6 Influência da variação da temperatura

Outro fator que influencia diretamente os níveis de tensão e corrente gerados por um painel fotovoltaico é a temperatura, de acordo com as Equações (3) e (4). Contudo, no caso do aumento da temperatura, a tensão do painel é o parâmetro mais influenciado. Isto se deve ao fato de que com o aumento da temperatura, ocorre uma desnaturação nos semicondutores, diminuindo a tensão de polarização direta. Além disso, ocorre uma excitação térmica, provocando um leve

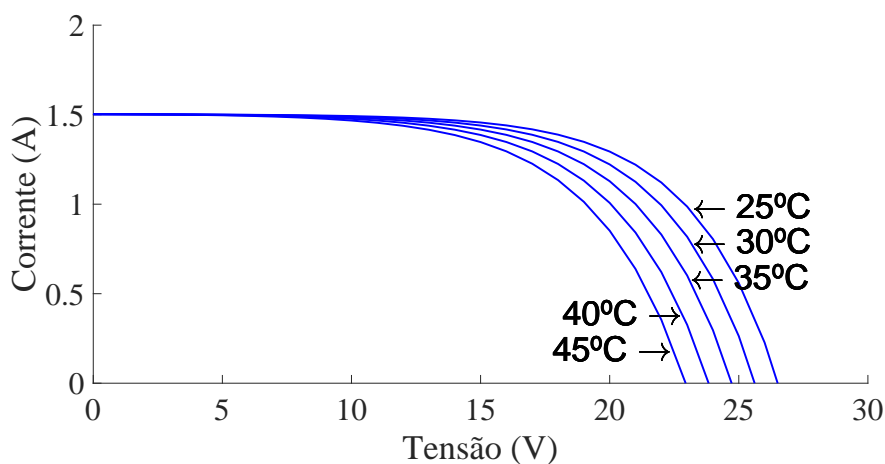
Figura 7 – Conjunto de curvas PxV para variadas condições de radiação incidente.



Fonte: Autoria própria.

aumento na corrente de saturação (LUNA, 2016), (RAZAVI, 2010). Assim, ao manter-se a irradiação constante em 1000 W/m² e variar a temperatura do painel fotovoltaico, pode-se obter o conjunto de curvas IxV apresentado na Figura 8.

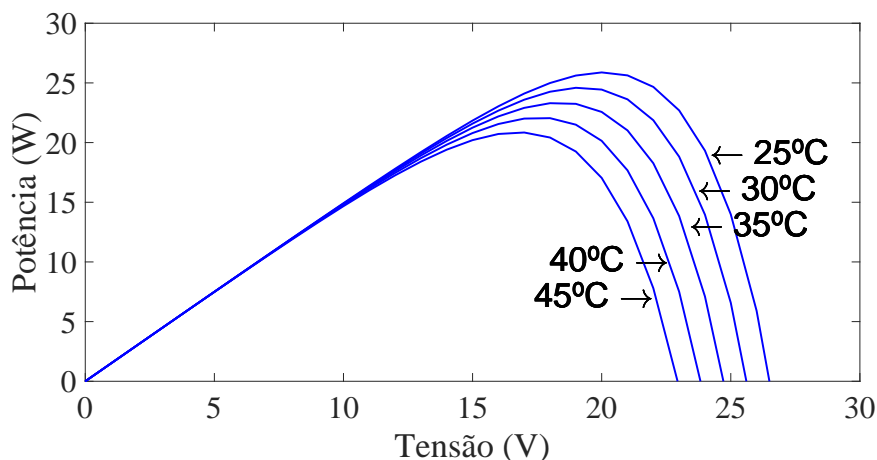
Figura 8 – Conjunto de curvas IxV para variados valores de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Com o aumento da temperatura, ocorre uma diminuição na tensão nos terminais do painel fotovoltaico, conseqüentemente, também há uma diminuição na potência gerada, conforme ilustrado na Figura 9, na qual são apresentadas curvas PxV para diversos valores de temperatura. Por conseguinte, há uma diminuição no ponto de máxima potência do painel, contudo, de forma distinta da apresentada na Figura 7 (DEV; JEYAPRABHA, 2013).

Figura 9 – Conjunto de curvas PxV para variados valores de temperatura.



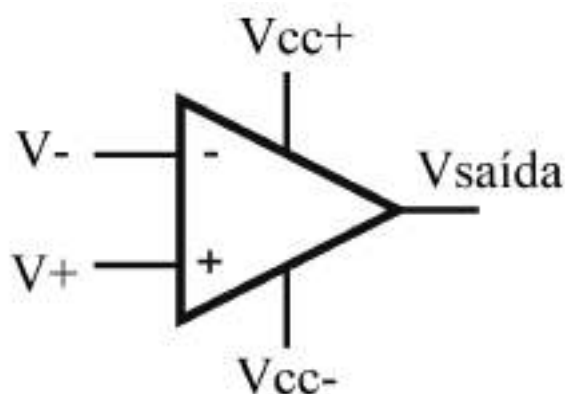
Fonte: Autoria própria.

2.7 Amplificadores operacionais

Nesta seção serão descritas algumas características e topologias com uso de amplificadores operacionais, utilizadas neste projeto nos circuitos de condicionamento dos sinais. Os amplificadores operacionais são dispositivos utilizados quando se deseja elaborar circuitos com uma relação de ganho entre entrada e saída, mesmo que essa relação de ganho seja unitária ou menor que um (RAZAVI, 2010).

Na Figura 10 é apresentado um exemplo de amplificador operacional. O mesmo é composto por um pino de entrada não-inversora (V^+), um pino de entrada inversora (V^-) e um pino de saída ($V_{saída}$). Além disso, este dispositivo necessita de alimentação simétrica. Ou seja, um valor positivo de tensão (V_{cc+}) em um dos pinos de alimentação e um valor de tensão negativo (V_{cc-}) no outro pino de alimentação.

Figura 10 – Amplificador operacional.

Fonte: <http://www.ti.com/ods/images/SNOSBT3I/>, modificada.

A relação entre as tensões de entrada e a tensão de saída do amplificador operacional, em malha aberta, é apresentada na Equação (5).

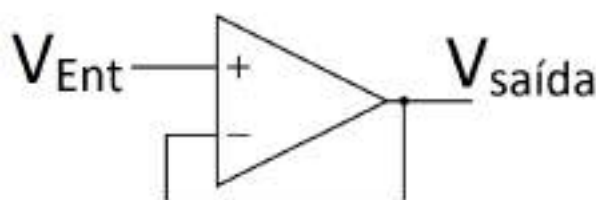
$$V_{saída} = A(V^+ - V^-). \quad (5)$$

Ao dividir-se ambos os lados da expressão por A , que é o ganho de malha aberta, é observado que a diferença entre V^+ e V^- é muito pequena, visto que o resultado da divisão de $V_{saída}$ e A é pequeno, pois o ganho A é elevado. Denotando-se um aberto, definindo-se assim a característica de alta impedância de entrada do amplificador operacional. Ainda observa-se outra característica fundamental do amplificador operacional, o curto-circuito virtual, que decorre das considerações anteriores, resultando na igualdade $V^+ = V^-$ (NILSSON; RIEDEL, 2016).

2.7.1 Seguidor de tensão (*buffer*)

O seguidor de tensão é uma das aplicações do amplificador operacional. É utilizado para realizar o casamento de impedâncias entre estágios, devido à alta impedância de entrada e baixa impedância de saída do amplificador operacional. Tal casamento de impedâncias consiste em igualar numericamente a impedância interna da fonte com a impedância da carga, definindo-se a máxima transferência de potência e caracterizando uma ligação ideal entre sinal e carga (RAZAVI, 2010). É bastante utilizado o termo em inglês *buffer* para esta configuração. Um exemplo de seguidor de tensão é apresentado na Figura 11. Deste modo, a principal característica do seguidor de tensão é garantir que a tensão de saída será igual à tensão de entrada, com a vantagem dos estágios estarem isolados eletricamente. Esta característica é fundamental neste trabalho, uma vez que é necessário isolar o circuito de condicionamento do circuito de aquisição de dados, de modo a proteger o microcontrolador utilizado.

Figura 11 – Amplificador operacional na configuração seguidor de tensão.



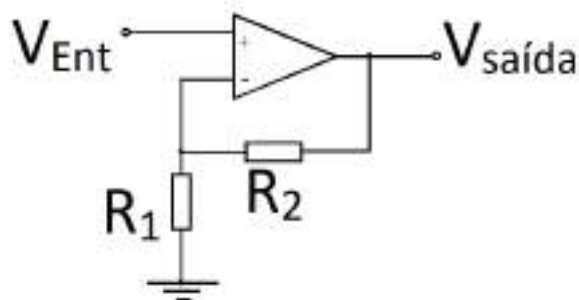
Fonte: <https://i.stack.imgur.com/xnlp7.png>, modificado.

2.7.2 Configuração não-inversora

Na configuração de um amplificador não-inversor, o sinal de entrada é inserido no pino não-inversor e a relação de resistores e realimentação é realizada na entrada inversora, como

exibido na Figura 12.

Figura 12 – Amplificador operacional na configuração não-inversora.



Fonte: <https://i.stack.imgur.com/IAhsH.gif>, modificado.

A relação entre a tensão de entrada (V_{Ent}) e saída na configuração não-inversora é apresentada na Equação (6). Tal relação é obtida ao realizar uma análise das tensões de entrada e saída do circuito composto pelos resistores R_1 e R_2 (NILSSON; RIEDEL, 2016).

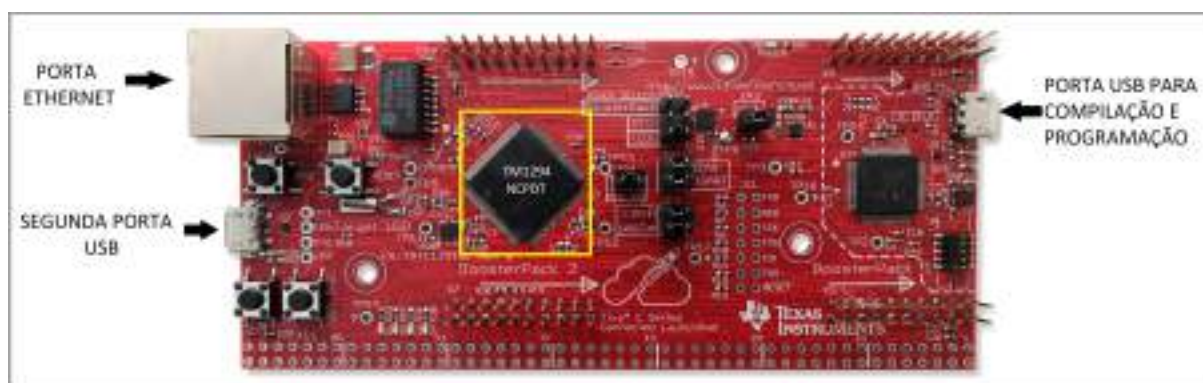
$$V_{saída} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{Ent}. \quad (6)$$

2.8 Plataforma Tiva™ C series TM4C1294

A Tiva™ C Series TM4C1294 é uma plataforma de desenvolvimento que possui baixo custo, para microcontroladores ARM®Cortex™ - M4F. A placa, ilustrada na Figura 13 possui dois conectores do tipo *Boosterpack*, que é uma conexão que aceita conexões de até 20 ou 40 pinos simultâneos, configuráveis como entradas ou saídas de dados. Possui uma porta Ethernet e duas portas USB (as três conexões estão indicadas na Figura 13). A primeira porta USB é utilizada para compilar e programar, enquanto que a segunda porta USB pode ser usada para leitura de outros dispositivos USB, além da possibilidade de uso como alimentação da placa. Além disso, a placa contém o microcontrolador TM4C1294NCPDT (destacado na Figura 13). As principais características deste microcontrolador estão expostas na Tabela 1, na qual são destacados o processamento e o suporte do Conversor Analógico-Digital (do inglês, *Analog-to-Digital Converter*) (ADC) do microcontrolador (TEXAS INSTRUMENTS, 2014a).

Assim, tal plataforma foi selecionada devido ao suporte à leitura de sensores e valores analógicos do microcontrolador, que conta dois módulos ADC de 12 bits. Além disso, dispõe de vasto material online, disponível em fóruns e tutoriais (TEXAS INSTRUMENTS, 2017), fato que torna a plataforma altamente didática.

Figura 13 – Placa Tiva™ C Series TM4C1294.



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2014a), modificada.

Tabela 1 – Principais características do microcontrolador TM4C1294NCPDT.

Categoria	Característica	Descrição
Processamento	Processador	ARM®Cortex™ - M4F.
	Desempenho	120-MHz em operação; 150 Milhões de amostras por segundo.
	Memória Flash	1024 KB.
	Memória SRAM do Sistema	256 KB de ciclo único.
	Memória EE-PROM	6 KB.
Suporte Analógico	Conversor ADC	Dois módulos ADC de 12 bits, cada um com uma amostragem máxima de dois milhões de amostras por segundo.

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2014b).

2.9 Caracterização de painéis fotovoltaicos

Há diversos métodos para caracterização de painéis fotovoltaicos (CAMPOS, 2013). O método apresentado neste trabalho consiste em gerar curvas exponenciais a partir do carregamento e descarregamento de um capacitor. Estas curvas são proporcionais aos valores de tensão e corrente geradas pelo painel fotovoltaico em análise.

Para tanto, foi elaborado um circuito simples, correspondente à sequência de eventos apresentados na Figura 14. Inicialmente, tem-se a alimentação do sistema em CC, por meio de uma bateria. A seguir, tem-se a geração de pulsos quadrados, utilizando um temporizador 555 na configuração astável e com ciclo de trabalho em 50% (CLAYTON; WINDER, 2003), como ilustrado na Figura 15. A frequência de operação do 555 neste modo é definido pela Equação (7).

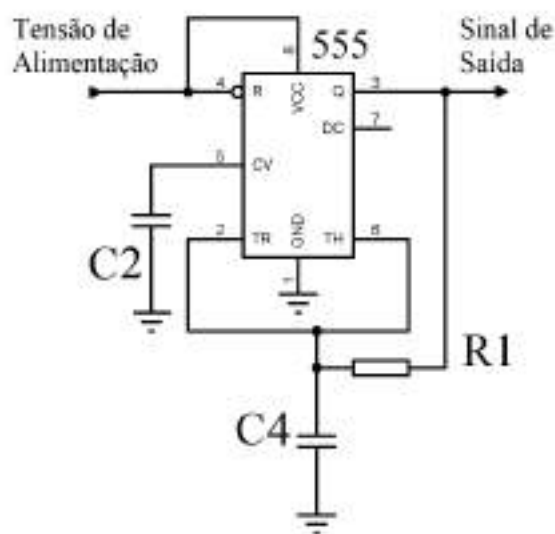
$$f = \frac{\ln(2)}{R1C4} \quad (7)$$

Figura 14 – Sequência de eventos para caracterização de painéis fotovoltaicos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Temporizador 555 em modo astável e 50% de ciclo de trabalho.



Fonte: Autoria própria.

A seguir, os pulsos quadrados são utilizados para gerar curvas exponenciais, a partir da carga e descarga de um capacitor. Assim, é gerada uma curva exponencial correspondente à tensão e outra curva exponencial correspondente à corrente do painel fotovoltaico. Estas curvas exponenciais são utilizadas para realizar testes no Painel, de forma que o máximo valor de tensão obtido será igual ao máximo valor de tensão gerado pelo painel fotovoltaico e o máximo valor de corrente obtido é igual ao máximo valor de corrente gerada pelo mesmo painel. Por fim, os resultados são exibidos ao usuário, por meio de um osciloscópio ou interface. Neste trabalho, os dados são condicionados para obtenção de sinais de tensão e corrente do painel fotovoltaico por meio de um microcontrolador, exibido os resultados ao usuário na forma de gráficos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão explicitados os métodos utilizados para a determinação dos parâmetros de um painel fotovoltaico. Desta forma, a metodologia é dividida em cinco seções, na qual a primeira seção trata dos principais parâmetros do painel, como valores de tensão, corrente e potência fornecida pelo mesmo. Na segunda seção é apresentada uma breve descrição do circuito analógico utilizado como sensor para aquisição dos dados. Uma vez definidos todos os elementos do projeto, a terceira seção apresenta simulações referentes ao circuito completo proposto. A quarta seção apresenta a descrição das lógicas utilizadas no projeto, e de como ocorre a interação entre os elementos do sistema de parametrização proposto. E por fim, a quinta seção apresenta as configurações de montagem, como alimentação e dispositivos utilizados.

3.1 Parâmetros do painel

O painel definido para testes foi o modelo JNP-3.0(9.0), da JNSOLAR. Os principais parâmetros do painel são apresentados na Tabela 2. Os dados foram fornecidos pelo fabricante, conforme apresentado na Figura 16. O modelo foi utilizado devido à praticidade e portabilidade para realização dos testes. Além disso, devido à baixa potência, os componentes utilizados na montagem do protótipo são mais baratos e fáceis de se obter.

Tabela 2 – Principais parâmetros do painel JNP-3.0(9.0).

Parâmetro	Valor
Tensão em circuito aberto	12 V
Corrente de curto-circuito	0,4 A
Tensão de operação	9 V
Máxima potência gerada	3 W

Vale ressaltar que tais parâmetros são obtidos nas condições STC. Desta forma, o painel gera uma potência máxima de 3 W, sob condição de radiação solar incidente de 1000 W/m² e temperatura de 25°C. A tensão de operação fornecida é considerada como V_{max} . O parâmetro I_{max} não foi diretamente fornecido pelo fabricante, porém, pode-se obtê-lo pela expressão de potência $P = V \cdot I$ (RAZAVI, 2010), considerando-se a potência como MPP, além da tensão e corrente como V_{max} e I_{max} , respectivamente. Deste modo, para um MPP de 3 W, ao dividir-se por V_{max} , 9 V, a corrente de operação (I_{max}) será 0,33 A. Além disso, o painel apresenta dimensões de 20,5 cm de largura e 28,5 cm de comprimento.

Figura 16 – Parâmetros fornecidos pelo fabricante.



电性能		Electrical Characteristic	
型号	JNP-3.0 (9.0)	Model	
额定功率	3.0W	Rated Power	
工作电压	9.0V	Operating Voltage	
短路电流	0.4A	Short Circuit Current	
开路电压	12.0V	Open Circuit Voltage	
最大系统电压	30.0V	Max System Voltage	
天津市津能电池科技有限公司		SN: FA-C001698	
TIANJIN JINNENG SOLAR CELL CO.,LTD.		CE	

Fonte: Autoria própria.

3.2 Circuito caracterizador de painéis fotovoltaicos

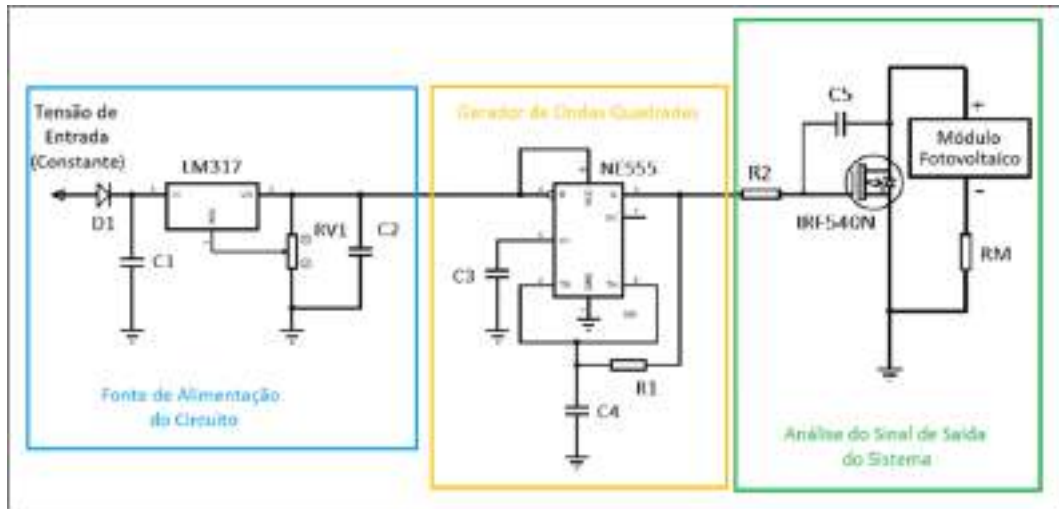
O circuito utilizado como sensor neste projeto consiste no levantamento de uma curva exponencial, gerada por meio de uma associação em série de um capacitor e resistor. O circuito com esquemático correspondente é apresentado na Figura 17, consiste na geração de pulsos quadrados, por meio de um circuito integrado temporizador NE555, pulsos estes que chaveiam um transistor do tipo MOSFET, o IRF540N. Para isso, tais pulsos devem ter um nível de tensão que garanta que o transistor opere em condição de saturação (RAZAVI, 2010). Associado ao transistor, tem-se um ramo composto por um resistor e um capacitor, R2 e C5, respectivamente. O resistor é conectado entre o pino de saída do NE555 e o pino porta do transistor, e o capacitor é conectado entre os pinos de dreno e porta do transistor. Assim, tal conjunto RC é utilizado de modo a suavizar o chaveamento realizado pelo transistor, de acordo com a equação de carga de um capacitor no tempo, $V_c = V_0 [1 - \exp(-\frac{t}{RC})]$ (NILSSON; RIEDEL, 2016).

A tensão V_c representa a tensão no capacitor ao longo do tempo, V_0 representa a tensão à qual o capacitor se encontra conectado, t representa o tempo, em segundos, e o produto RC representa a constante de tempo do ramo RC, que é o tempo no qual a tensão no capacitor alcança 67 % do valor de tensão de entrada.

Desse modo, para analisar a tensão e a corrente de um módulo fotovoltaico conectado ao circuito, basta fazer a leitura da tensão entre os terminais do painel fotovoltaico e a leitura da tensão no resistor R_M , respectivamente. Como R_M apresenta resistência de 1Ω , o valor de tensão é numericamente igual ao valor de corrente gerado pelo painel fotovoltaico.

Deste modo, a tensão de entrada foi definida como a tensão gerada pelo painel fotovoltaico em teste e os pulsos quadrados foram ajustados, por meio do resistor R1 e o capacitor C4 da Figura 17, para operar a um período de 75,5 ms, ou 13,6 Hz (com R1 sendo 56 k Ω e C4 igual a 0,82 μ F na Equação 7), tempo suficiente para haver a carga do capacitor, visto que a constante

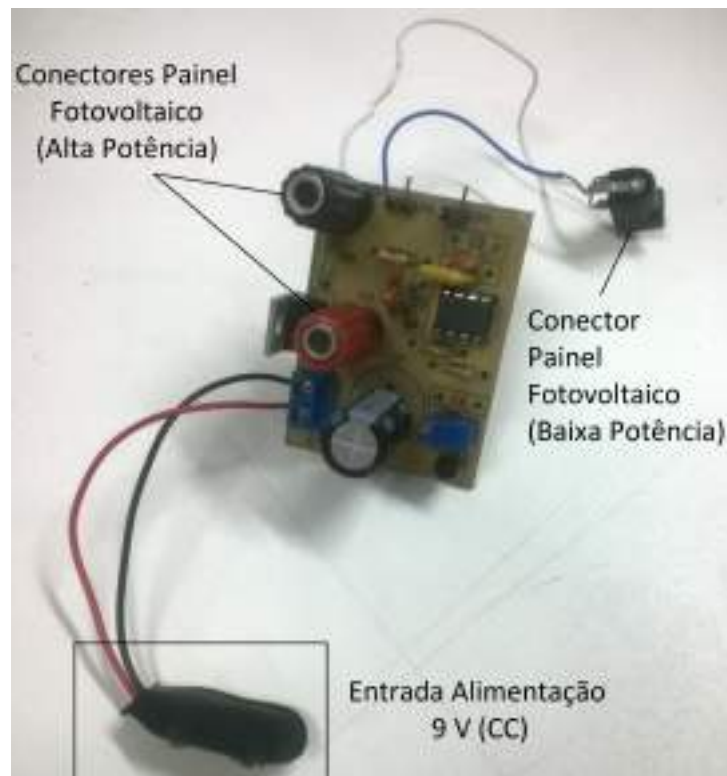
Figura 17 – Esquemático do circuito caracterizador.



Fonte: Autoria Própria.

RC corresponde a 0,99 ms. Além disso, a frequência foi definida como um valor baixo para atenuar o aquecimento no transistor utilizado, visto que para uma frequência elevada, haveriam mais trocas de estado, entre aberto e fechado. Na Figura 18 é apresentada uma primeira versão do circuito caracterizador.

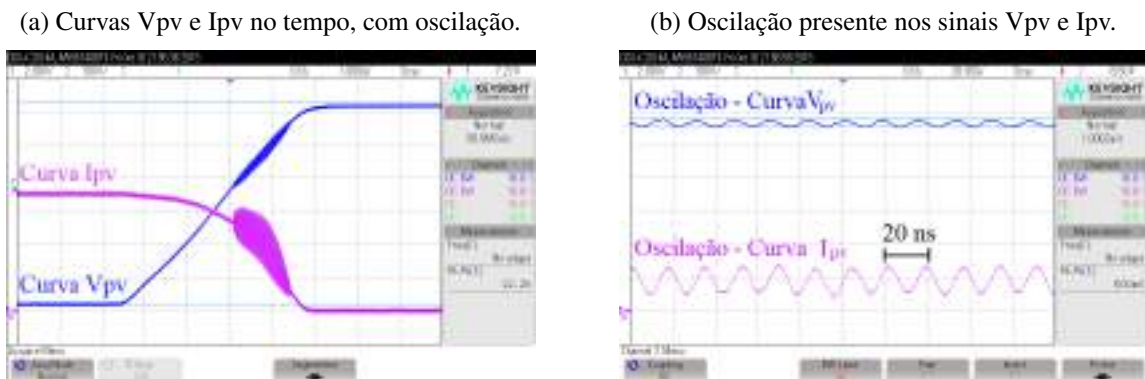
Figura 18 – Circuito caracterizador.



Fonte: Autoria própria.

Além disso, acrescentou-se um resistor entre o pino porta e o capacitor, de forma a se obter um filtro do tipo *snubber* (OTT, 1988) para atenuar uma oscilação indesejada, em alta frequência, que havia nos sinais de saída do circuito. A oscilação é apresentada na Figura 19, no qual a Figura 19a apresenta as curvas V_{pv} e I_{pv} no tempo com a oscilação e a Figura 19b apresenta apenas a oscilação ao longo do tempo.

Figura 19 – Oscilação indesejada.



Fonte: Autoria Própria.

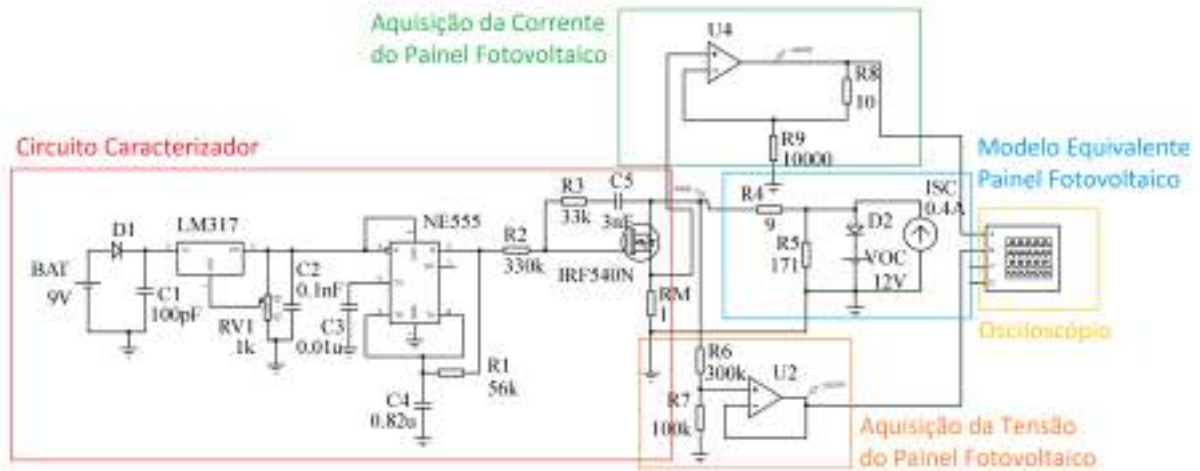
Pode-se verificar que a oscilação possui período de 20 ns, correspondente a uma frequência de 50 MHz. Assim, um resistor de 33 k Ω foi associado ao capacitor de 3 nF já existente no circuito. Sendo assim o problema de oscilação resolvido, visto que para estes valores de resistência e capacitância, tem-se um filtro passa-baixas com frequência de corte de 1,6 kHz (OTT, 1988). A oscilação foi então atenuada, visto que sua frequência estava muito acima do valor da frequência de corte. O resistor acrescentado corresponde à R3 da Figura 20.

3.3 Simulações

Uma vez definido o painel e o circuito para caracterização, foram realizadas simulações no Proteus, no *software* Isis. Então, ao esquemático apresentado na Figura 17, foram acrescentados três blocos. Um bloco para aquisição do sinal de tensão, um bloco para aquisição do sinal de corrente e um bloco correspondente ao modelo do painel fotovoltaico, conforme ilustrado na Figura 20. Além disso, foi inserido um osciloscópio, para análise das formas de ondas propostas. Na montagem experimental, a placa Tiva™, em associação com o computador, substituem o osciloscópio.

Foi elaborado o modelo do painel fotovoltaico com base nas Equações (1), (2) e (4) apresentadas anteriormente. Além disso, foram utilizados os parâmetros fornecidos pelo fabricante, conforme exibido na Tabela 2. Então, os valores de resistência série e resistência paralelo do painel foram obtidos a partir das Equações (1) e (2), respectivamente. O resultado dos valores adotados para R_s e R_p são exibidos nas Equações (8) e (9). O I_{ph} foi definido como máximo,

Figura 20 – Circuito completo para parametrização.



Fonte: Autoria própria.

ou seja, sob uma radiação incidente de 1000 W/m^2 , e o termo $(I_{ph*} + \mu_{sc}\Delta T)$ foi considerado unitário, apresentando desta forma, valor numericamente igual a I_{sc} (CAMPOS, 2013).

$$R_s = \frac{12 - 9}{0,33} = 9 \Omega. \quad (8)$$

$$R_p = \frac{12}{0,4 - 0,33} = 171 \Omega. \quad (9)$$

Os blocos definidos para aquisição dos valores de tensão e de corrente do painel fotovoltaico são baseados na alta impedância do amplificador operacional, de modo a garantir a isolação elétrica dos pinos ADC da Tiva™.

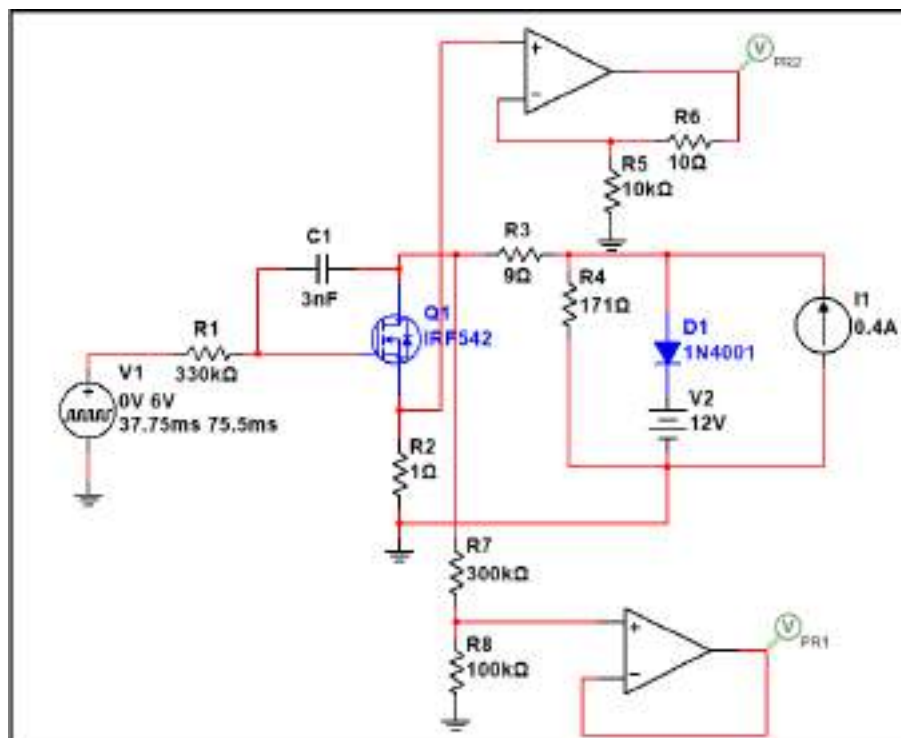
O circuito de aquisição da corrente foi baseado na configuração não-inversora do amplificador operacional. De forma a apresentar um ganho unitário, de acordo com a Equação (6), foi utilizada uma proporção de R2 como 10Ω e R1 como $10 \text{ k}\Omega$. Na Figura 20, os resistores dessa configuração correspondem a R8, para 10Ω e R9, para $10 \text{ k}\Omega$.

O circuito para aquisição da tensão do painel fotovoltaico foi baseado no amplificador operacional como seguidor de tensão, apenas para realizar a isolação do pino ADC da Tiva™ e garantir o casamento de impedância entre os estágios do sistema. Além disso, foi utilizado um divisor de tensão resistivo (NILSSON; RIEDEL, 2016), de modo a reduzir a tensão de leitura do painel a $1/4$ do valor original, para proteger o pino ADC da Tiva™ contra valores elevados de tensão, uma vez que tais pinos ADCs só suportam níveis de tensão próximos a $3,3 \text{ V}$. Os resistores do divisor de tensão resistivo utilizado correspondem aos resistores R6 e R7 da Figura 20, para $300 \text{ k}\Omega$ e $100 \text{ k}\Omega$, respectivamente.

Além disso, também foram realizadas simulações no *software* Multisim™, visto que esta

plataforma de simulação apresenta um maior suporte ao uso de cursores nos gráficos. Deste modo, um esquemático equivalente ao apresentado na Figura 20 foi montado no Multisim™, a única diferença foi que o bloco de geração dos pulsos quadrados foi substituído por uma fonte equivalente. O esquemático utilizado é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Circuito para simulação no Multisim™.



Fonte: Autoria própria.

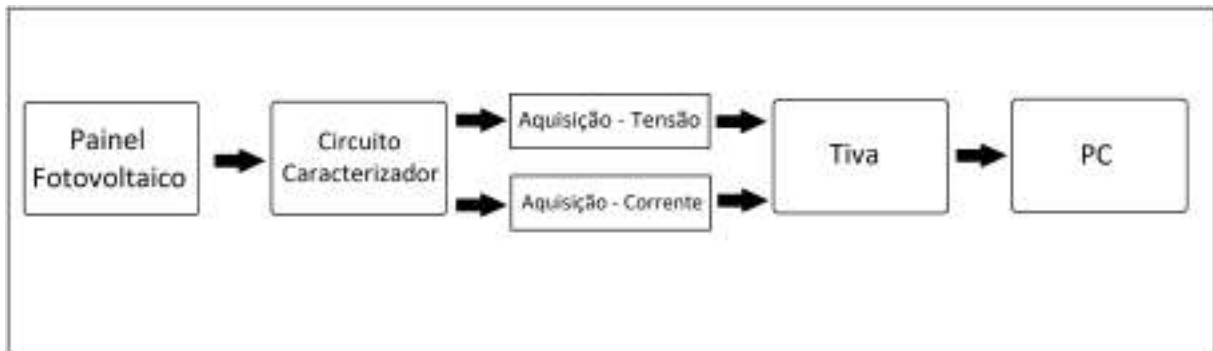
3.4 Lógicas utilizadas

Nesta seção, serão descritas as sequências lógicas idealizadas para o funcionamento do projeto. Basicamente, as lógicas utilizadas consistem em como os dispositivos utilizados no projeto se relacionam e na programação utilizada no microcontrolador TM4C1294NCPDT.

Na Figura 22 são descritos os principais blocos do projeto. Cada bloco corresponde a um dispositivo utilizado. Inicialmente, os sinais de tensão e corrente do painel fotovoltaico podem ser adquiridos por meio do circuito caracterizador. Tais sinais passam por uma amostragem, por meio de dois pinos ADCs da Tiva™, um para cada sinal. E por fim, os sinais são enviados ao computador por meio de um cabo USB.

Desta forma, foi elaborado um código em linguagem C, no *software* Code Composer™ Studio para realizar a aquisição e envio dos dados, com o uso da plataforma Tiva™. Além disso, foram utilizadas as funções auxiliares presentes na suíte de ferramentas de programação Tivaware™. Na Figura 23 é apresentado o fluxograma correspondente ao código implementado.

Figura 22 – Fluxograma principal do projeto.



Fonte: Autoria própria.

O código consiste em um ciclo infinito de aquisição e envio de dados. Inicialmente define-se a variável de contagem i como zero, de modo a iniciar a contagem. A seguir, insere-se um atraso no sistema, de modo que os dados que forem posteriormente adquiridos possam ser corretamente enviados. Na sequência, há outro laço, denominado rotina serviço de interrupção, representado por ISR (do inglês, *Interrupt Service Routine*), para que seja iniciado o recebimento dos dados.

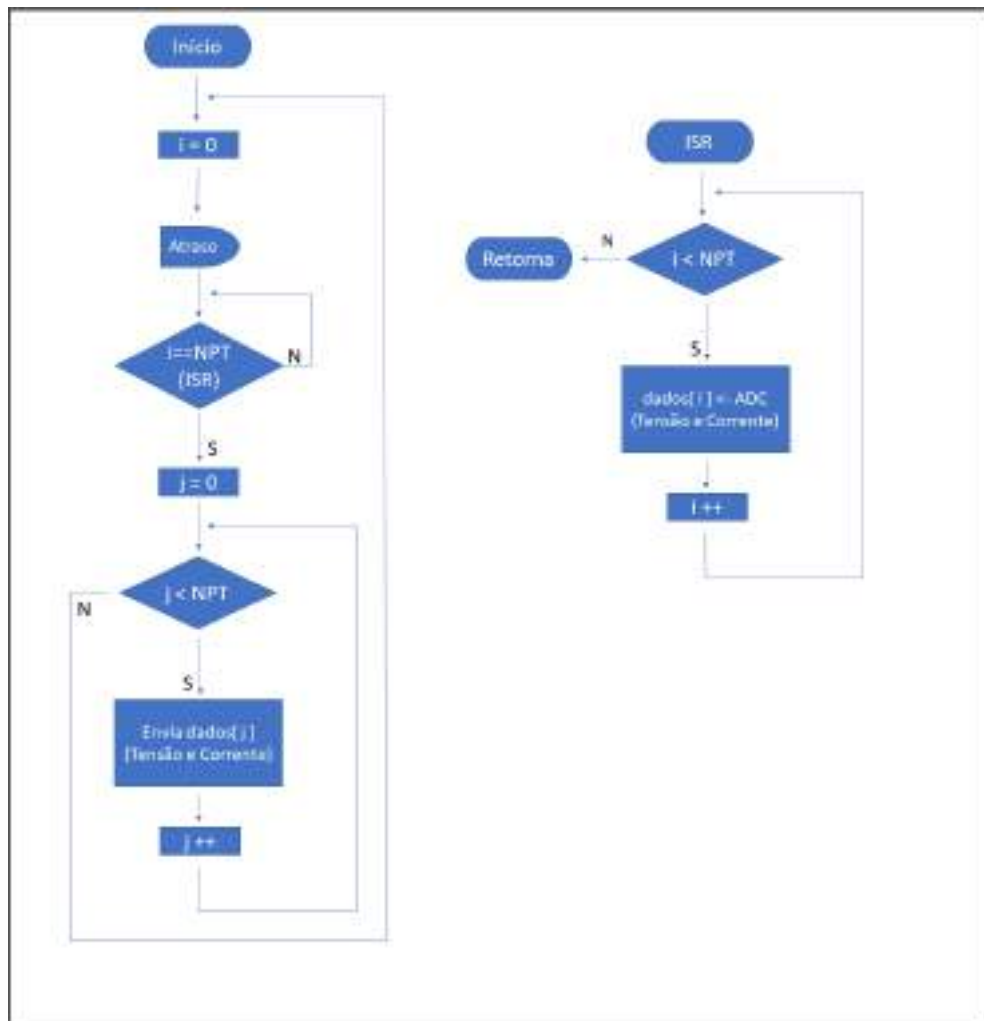
Foi definida uma variável denominada NPT, que corresponde ao número de pontos a serem adquiridos. O valor de NPT foi definido com base em quantos pontos seriam ideais para obter as curvas de tensão e corrente geradas pelo circuito caracterizador, o qual opera a 13,6 Hz. Dois pinos ADCs da Tiva™ foram configurados para realizar uma amostragem a uma frequência de 12 kHz. Desta forma, ao dividir a frequência de amostragem pela frequência de operação do circuito caracterizador, obtêm-se 882 pontos para cada período correspondente à frequência de 13,6 Hz. Contudo, o valor de NPT foi escolhido como 800, visto que há valores repetidos nas formas de onda geradas, conforme será descrito no próximo capítulo. Os valores adquiridos são armazenados em dois vetores, um para tensão e outro para corrente. Após o par de dados serem amostrados, a variável de contagem i é incrementada. Quando i alcança o valor de NPT, encerra-se a rotina de aquisição de dados.

Assim, após a aquisição de dados, define-se uma outra variável de contagem, j , para que seja realizada uma rotina de envio dos dados, por meio de comunicação serial. A leitura dos dados enviados é realizada por meio do *software* Matlab®, utilizado para exibição dos valores em forma gráfica. E por fim, incrementa-se j até que o valor de NPT seja alcançado, encerrando assim a rotina de envio de dados.

3.5 Configurações de montagem

Após as simulações (cujos resultados serão discutidos no próximo capítulo), realizou-se a montagem do protótipo, de forma a comprovar os resultados teóricos. A montagem é exibida

Figura 23 – Fluxograma da programação implementada.

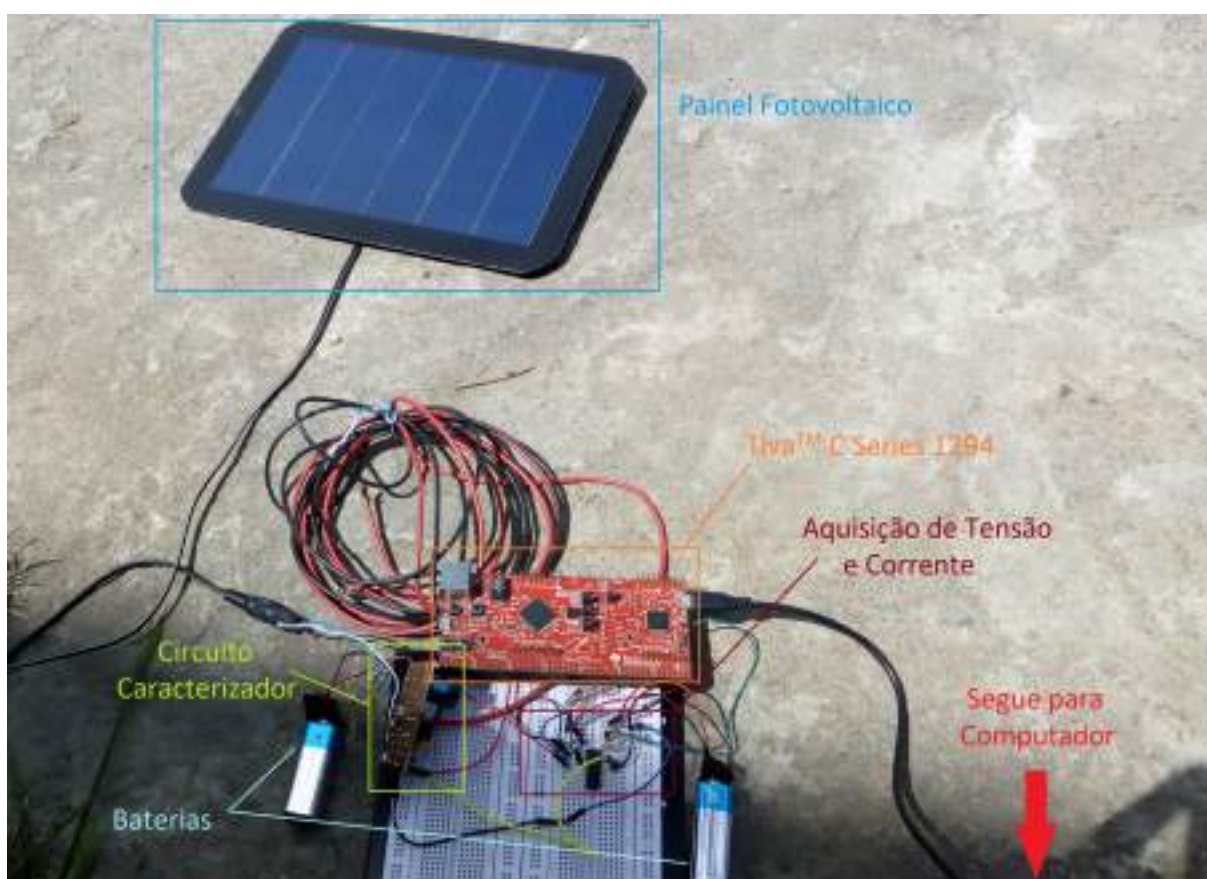


Fonte: Autoria própria.

na Figura 24.

Foi utilizado o circuito integrado TL084, o qual contém quatro amplificadores operacionais, para elaborar o circuito do seguidor de tensão e o circuito não-inversor. Além disso, foram utilizadas duas baterias de 9 V, para alimentação do sistema, visto que o TL084 necessita de alimentação simétrica (um dos pinos de alimentação polarizado diretamente e o outro pino de alimentação polarizado reversamente) para funcionar corretamente.

Figura 24 – Montagem realizada.



Fonte: Autoria própria.

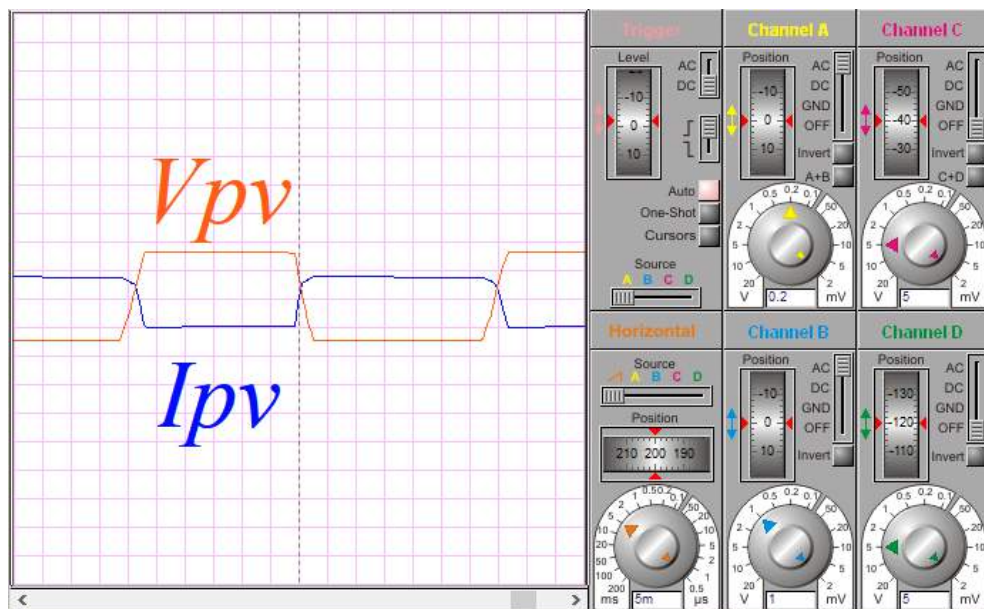
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão discutidos os resultados obtidos com o projeto proposto. Inicialmente, serão exibidos os resultados obtidos em simulação, seguidos dos resultados experimentais obtidos.

4.1 Resultados em simulação

As simulações do esquemático apresentado na Figura 20 foram realizadas no *software* Isis, da suite de aplicativos Proteus. Inicialmente foi utilizado o osciloscópio presente no programa, de modo a se observar as formas de onda correspondentes à tensão e à corrente ao longo do tempo, para o circuito equivalente ao painel utilizado. O resultado é apresentado na Figura 25. É possível perceber a proporção inversa entre tensão e corrente do painel fotovoltaico, quando os valores para uma aumentam, os valores ao longo da curva da outra curva diminuem. A curva amarela (canal A) corresponde à corrente e a curva azul (canal B) corresponde à tensão do painel fotovoltaico.

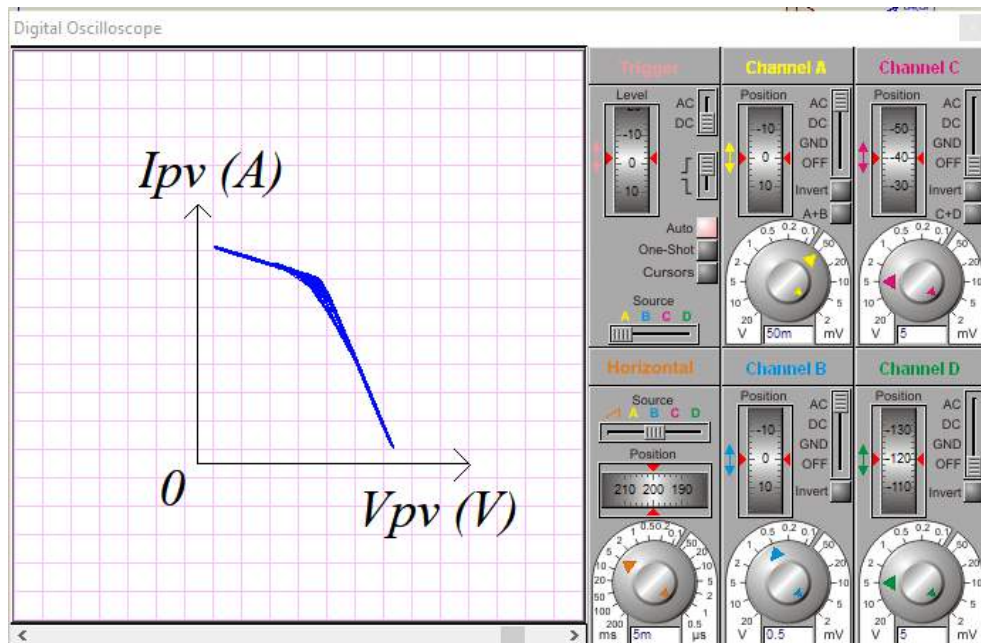
Figura 25 – Simulação de curvas no tempo.



Fonte: Elaborado com o uso do Proteus.

Além disso, é possível elaborar uma curva I_xV simplificada utilizando o mesmo modelo de osciloscópio. Para tanto, basta selecionar o sinal de tensão (canal 2) como eixo horizontal da exibição. Tal visualização é apresentada na Figura 26.

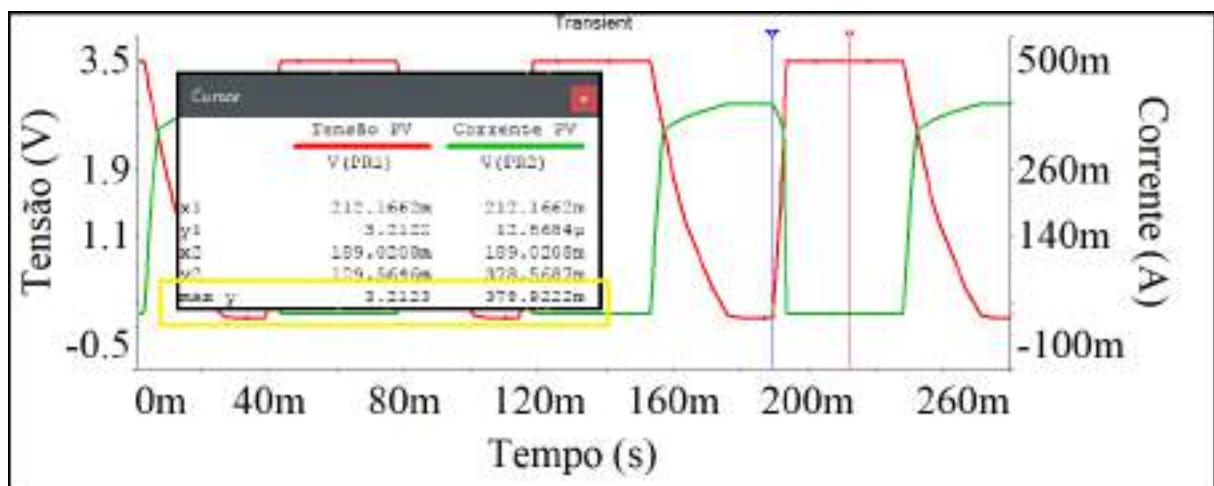
Figura 26 – Simulação de plotagem de curva IxV.



Fonte: Elaborado com o uso do Proteus.

Na sequência, realizou-se a simulação no tempo no Multisim™. O resultado obtido é apresentado na Figura 27. A curva vermelha corresponde à tensão do painel fotovoltaico, enquanto que a curva verde corresponde à corrente gerada pelo painel fotovoltaico. Foram destacados os máximos valores obtidos para a tensão e corrente, sendo 3,21 V e 378,92 mA, respectivamente. Desta forma, a amplitude do sinal de tensão se manteve abaixo dos 3,3 V, maior valor preferível de entrada nos pinos ADC da Tiva™. Assim, ao multiplicar por 4 o valor de tensão lido, tem-se 12,84 V como valor de V_{oc} , além do valor 378,92 mA como valor de I_{sc} . Além disso, o valor de leitura de corrente ficou levemente abaixo dos 0,4 A.

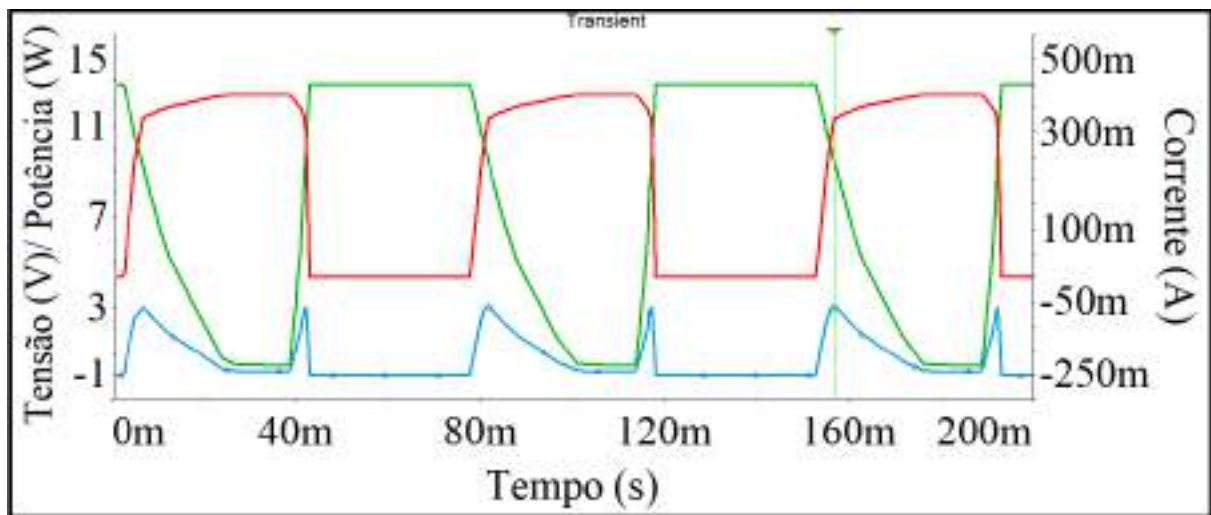
Figura 27 – Simulação no tempo, para tensão e corrente.



Fonte: Elaborado com o uso do Multisim™.

Ainda, foi realizada uma simulação para observar o máximo valor de potência gerado pelo modelo equivalente do painel fotovoltaico. Para isto, multiplicaram-se os valores de tensão lidos por 4 (para compensar o divisor resistivo utilizado) e pelos valores de corrente lidos, correspondendo assim aos valores de potência ao longo do tempo. O gráfico correspondente é apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Simulação no tempo, para tensão, corrente e potência.



Fonte: Elaborado com o uso do Multisim™.

Na Figura 28, ambos os cursores foram posicionados no mesmo ponto, correspondente ao MPP do modelo equivalente analisado. O resultado indicado é apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Resultados observados para tensão, corrente e potência.

Cursor			
	Tensão	Potência	Corrente
			V (PR2)
x1	156.7398m	156.7398m	156.7398m
y1	9.5057	3.1134	327.5334m
x2	156.7398m	156.7398m	156.7398m
y2	9.5057	3.1134	327.5334m
max y	12.8481	3.1136	377.8555m

Fonte: Elaborado com o uso do Multisim™.

Pode-se perceber que o valor de MPP obtido foi de 3,11 W. Os valores de tensão (V_{max}) e corrente (I_{max}) correspondentes a esta potência são 9,50 V e 327,53 mA, respectivamente.

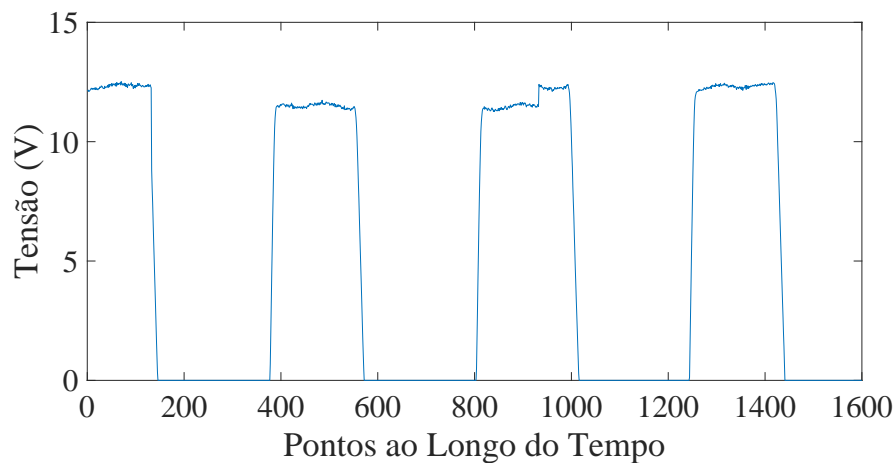
4.2 Resultados experimentais

Uma vez que o circuito apresentou comportamento dentro do esperado em simulação, realizou-se a montagem, correspondente ao apresentado na Figura 24. Os testes foram realizados

às 11 horas, um dos horários com maior índice de irradiância solar.

Desse modo, o primeiro parâmetro analisando foi a tensão ao longo do tempo. Para isto, foi realizada uma varredura, utilizando a leitura da comunicação serial pelo *software* Matlab®. Além disso, foram definidos 1600 pontos para garantir a leitura de mais que uma curva de tensão ao longo do tempo. Conforme citado anteriormente, cerca de 800 pontos são suficientes para a representação de um ciclo completo da forma de onda correspondente à varredura da tensão do painel fotovoltaico. O resultado obtido é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Curva experimental da tensão ao longo do tempo.



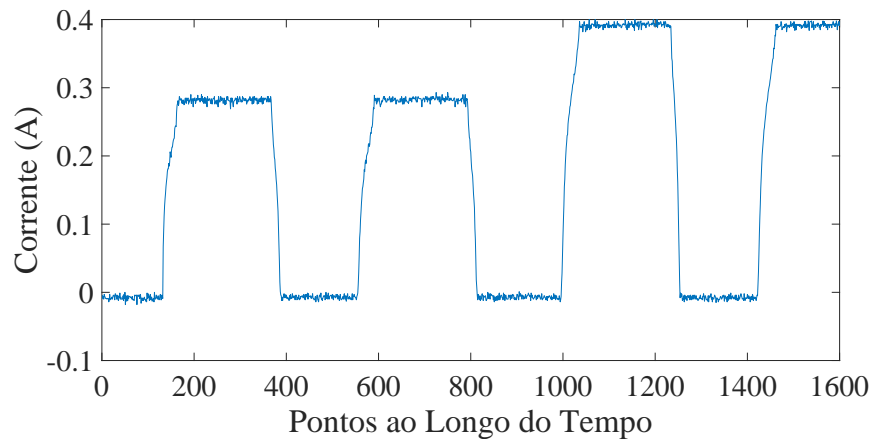
Fonte: Autoria própria.

De forma semelhante, realizou-se uma varredura ao longo do tempo nas curvas de corrente obtidas experimentalmente. O resultado é apresentado na Figura 31. É possível perceber regiões da curva com uma redução na amplitude da corrente. Tal fato se deve à elevada dependência da corrente à irradiância solar, conforme citado na Equação (4). Com isso, variações causadas pela passagem de nuvens acabam influenciando nos valores obtidos para corrente.

Dessa forma, uma vez possuindo os valores de tensão e de corrente do painel fotovoltaico, é possível realizar a plotagem da curva característica $I \times V$ do painel fotovoltaico, conforme ilustrado na Figura 32. Contudo, pode-se perceber que pelo fato de haver várias curvas ao longo dos pontos, acaba-se formando várias curvas $I \times V$. Além disso, quando a tensão ou a corrente são máximas, há muitos valores repetidos e as extremidades do gráfico acabam ficando com uma concentração de pontos. Isto não foi observado em simulação pois quando a tensão ou corrente atingem o máximo valor, não há variação devido à ruído, por exemplo. Assim, em simulação todos os pontos máximos estão no mesmo local, por isso não ocorre a formação de aglomerados de pontos, como exibido na Figura 32.

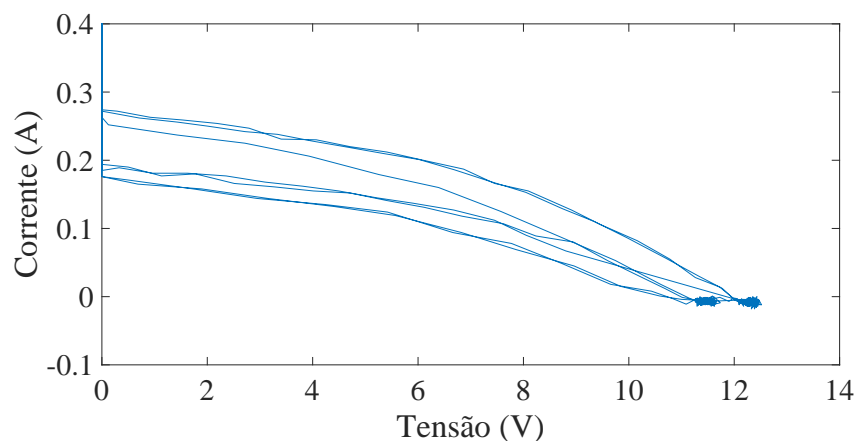
De forma a apresentar uma leitura mais clara das curvas características do painel em análise, restringiu-se a faixa de valores para tensão e corrente em um número específicos de pontos. Optou-se por verificar a faixa de pontos próximos a 1000 e 1250. Assim, na Figura

Figura 31 – Curva experimental da corrente ao longo do tempo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Curva IxV experimental.



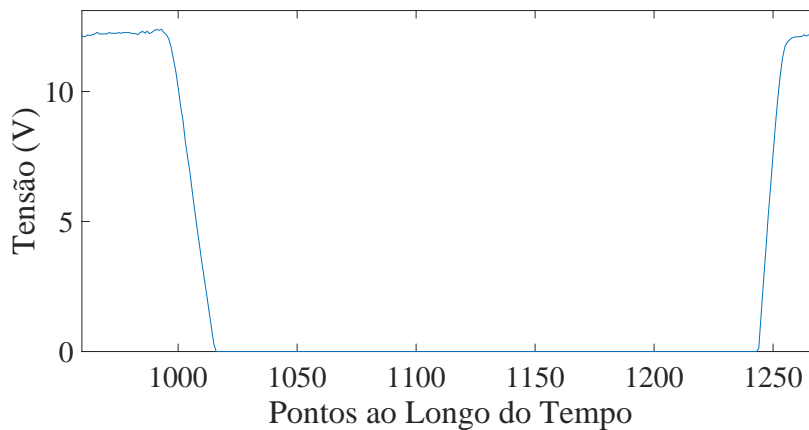
Fonte: Autoria própria.

33 e na Figura 34 são apresentados os valores de tensão e corrente para esta faixa de pontos, respectivamente. Na sequência, foram escolhidas as curvas de V_{pv} e I_{pv} entre os pontos 1000 e 1050.

Portanto, possuindo valores mais uniformes para a tensão e corrente, pode-se realizar a análise da curva P_xV do painel. Tal curva é apresentada na Figura 35. Ao realizar-se uma varredura ao longo da curva P_xV , pode-se identificar o MPP do painel, conforme exibido na Figura 35. Este valor de máxima potência é condizente com o fornecido pelo fabricante. Desta forma, é possível verificar o valor de tensão correspondente a este valor de potência. Tem-se o valor de MPP obtido como 3,031 W e o valor de V_{max} obtido como 9,27 V.

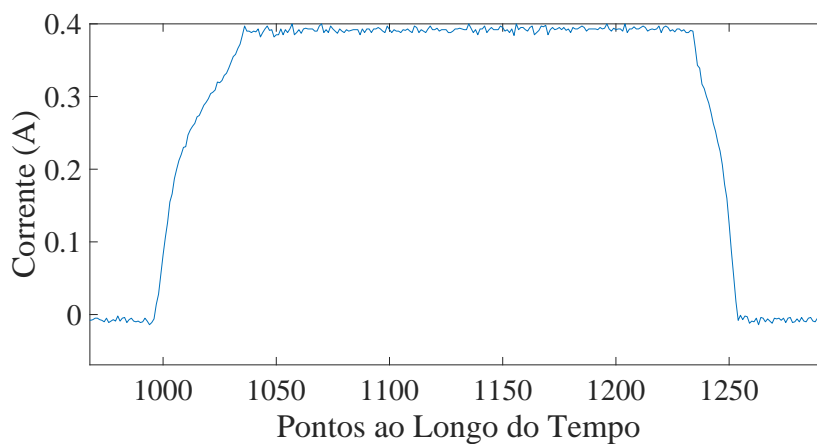
Por fim, pode-se traçar a curva característica I_xV com os valores de tensão e corrente do painel fotovoltaico na faixa de pontos selecionada, como ilustrado na Figura 36. Desse modo, o valor de corrente correspondente ao valor de tensão de 9,27 V é de 0,327 A, valores nos quais o

Figura 33 – Curva V para uma faixa de pontos mais restrita.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Curva I para uma faixa de pontos mais restrita.



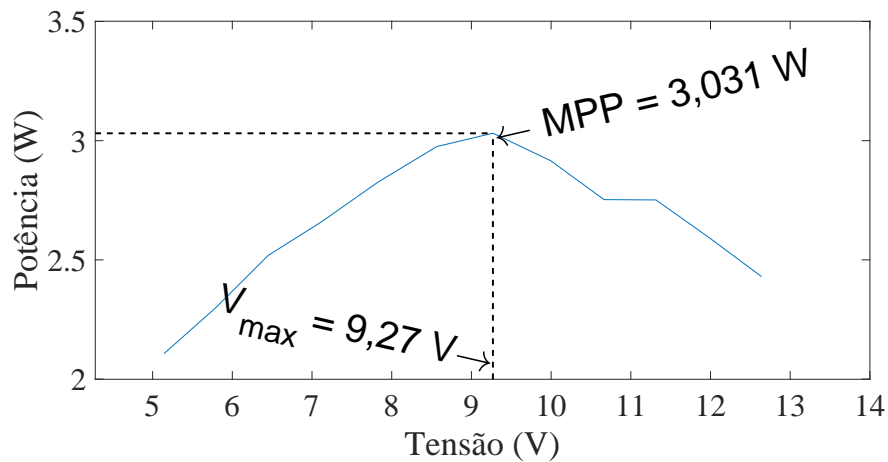
Fonte: Autoria própria.

painel opera no MPP. Além disso, também é possível observar os valores para I_{sc} e V_{oc} na Figura 36, sendo I_{sc} igual a 0,4096 A e V_{oc} igual a 12,64 V.

O valor I_{sc} obtido deveria corresponder a uma tensão de 0 V e o valor de V_{oc} deveria corresponder a uma corrente de 0 A. Tal fato se deve à faixa de pontos utilizada ter sido restrita, mas ao verificar-se a faixa de pontos entre 1000 e 1200 pontos na Figura 30, percebe-se que a tensão é nula, enquanto tem-se o valor máximo de corrente para a mesma faixa de pontos na Figura 31 e que não variam muito em relação ao valor de I_{sc} obtido.

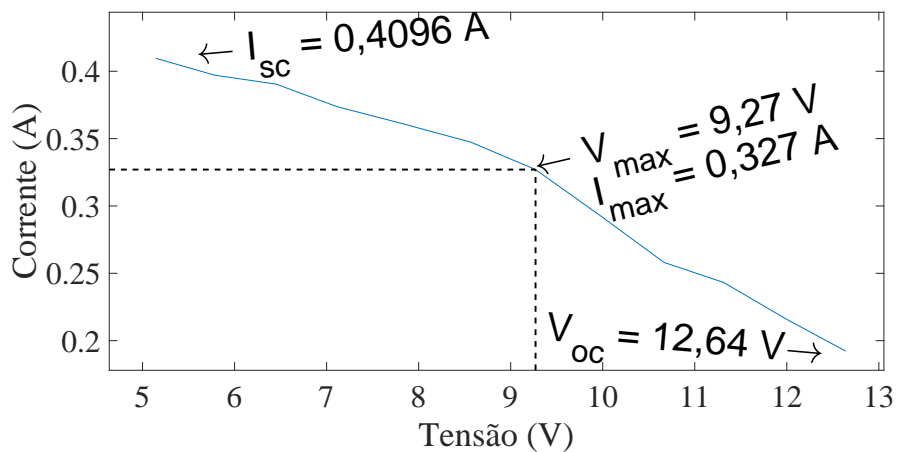
Conseqüentemente, os parâmetros obtidos não foram exatos, mas próximos aos valores de simulação e aos valores fornecidos pelo fabricante. As divergências de valores em simulação, com relação aos parâmetros fornecidos pelo fabricante se devem ao fato do modelo equivalente de painel fotovoltaico utilizado ser simplificado. As variações observadas nos valores obtidos experimentalmente se devem, entre outros fatores, aos componentes utilizados terem tolerância

Figura 35 – Curva característica PxV obtida experimentalmente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Curva característica IxV obtida experimentalmente.



Fonte: Autoria própria.

elevada, como os resistores apresentarem variação na resistência de até 5 %, por exemplo. Por fim, a Tabela 3 reúne os valores dos parâmetros fornecidos pelo fabricante, simulados e obtidos experimentalmente.

Tabela 3 – Resumo dos parâmetros analisados do painel fotovoltaico.

Parâmetro	Fabricante	Simulação	Experimental
V_{oc}	12 V	12,84 V	12,64 V
I_{sc}	0,4 A	0,379 A	0,409 A
V_{max}	9 V	9,50 V	9,27 V
I_{max}	0,333 A	0,327 A	0,327 A
MPP	3 W	3,113 W	3,031 W

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta a análise dos principais parâmetros de um painel fotovoltaico. Para isto, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a energia solar fotovoltaica. Além disso, também foram revisados diversos temas necessários para a elaboração de um sistema microcontrolado para parametrização de painéis fotovoltaicos.

Foram realizadas simulações para verificar o comportamento dos sinais de tensão e corrente na saída do circuito proposto e se tais valores estavam abaixo do limite suportado pelo microcontrolador. O sistema foi então montado, para observar se os parâmetros obtidos experimentalmente eram condizentes com os fornecidos pelo fabricante. Verificou-se então que os valores obtidos em simulação e experimentalmente eram próximos aos parâmetros fornecidos pelo fabricante.

Assim, foi possível elaborar um sistema que possui preço abaixo de 100 reais, incluindo o microcontrolador utilizado. Este valor é bem abaixo do preço do caracterizador apresentado. Além disso, com este projeto, foi realizada a publicação de um artigo na *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference* (MEDEIROS et al., 2016).

São propostas como possíveis melhorias do sistema: ajustes nos circuitos para obtenção de tensão e corrente do painel fotovoltaico de forma mais precisa. Utilização de métodos de aproximação de curvas, para obtenção de outros parâmetros dos painéis fotovoltaicos. Assim como a elaboração de uma comunicação sem fio com o computador, de modo a garantir o isolamento dos estágios de aquisição e amostragem dos sinais.

REFERÊNCIAS

ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482*. 2012. Acesso em: 09 de out. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Citado na página 14.

ANEEL. *ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída*. 2015. Acesso em: 09 de out. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90>. Citado na página 15.

ANEEL. *Boletim de Informações Gerenciais 1º Trimestre de 2017*. [S.l.], 2017. Citado na página 14.

ANEEL. *Brasil possui mais de 10 mil conexões de micro e minigeração distribuída*. 2017. Acesso em: 09 de out. 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-possui-mais-de-10-mil-conexoes-de-micro-e-minigeracao-distribuida/656877?inheritRedirect=false>. Citado na página 15.

BEIGEL, C. H. J. K. Distributed photovoltaic generation in brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy*, 2013. Citado na página 14.

BELLIA, H.; YOUCEF, R.; FATIMA, M. A detailed modeling of photovoltaic module using matlab. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v. 3, n. 1, p. 53 – 61, 2014. ISSN 2090-9977. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090997714000182>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.

BP GLOBAL. *BP Statistical Review of World Energy June 2017*. 2017. Acesso em: 04 de out. 2017. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>>. Citado na página 14.

CAMPOS, E. L. F. *Construção De Um Caracterizador De Curvas De Painéis Solares Utilizando Um Conversor Boost*. [S.l.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas 16, 19, 29 e 35.

CLAYTON, G.; WINDER, S. *Operational Amplifiers*. 5th ed.. ed. [S.l.: s.n.], 2003. ISBN 0750659149. Citado na página 29.

DEV, A.; JEYAPRABHA, B. Modeling and simulation of photovoltaic module in matlab. In: *Proceedings of the International Conference on Applied Mathematics and Theoretical Computer Science*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado na página 25.

EPEVER. *Ebox-Wifi 01*. 2017. Acesso em: 22 de nov. 2017. Disponível em: <<http://www.epsolarpv.com/en/uploads/news/201710/1508816420407084.pdf>>. Citado na página 16.

FARIAS L. M.; SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. *Revista Liberato*, 2011. Citado na página 14.

GABRIEL FILHO, L. R. A. et al. Mathematical analysis of maximum power generated by photovoltaic systems and fitting curves for standard test conditions. *Engenharia Agrícola (Impresso)*, v. 32, p. p. 650 –662, 2012. Citado na página 19.

- GREEN, M. A. Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions. *Solid-State Electronics*, vol. 24, p. pp. 788 – 789, 1981. Citado na página 22.
- HALMEMAN, R. J. *Desenvolvimento De Um Sistema Para Monitoramento Remoto Em Centrais De Microgeração Fotovoltaica*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2014. Citado na página 18.
- HARTMANN, L. V. et al. Combining model-based and heuristic techniques for fast tracking the maximum-power point of photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 6, p. 2875–2885, June 2013. ISSN 0885-8993. Citado na página 17.
- HERNDAY, P. *Field Applications for I-V Curve Tracers*. 2011. Acesso em: 10 de out. 2017. Disponível em: <http://solarprofessional.com/articles/design-installation/field-applications-for-i-v-curve-tracers?v=disable_pagination&nopaging=1#.WdzSmjBv_IU>. Citado na página 16.
- HT INSTRUMENTS. *I-V400w 1000V/15A I-V Curve Tracer*. 2017. Acesso em: 10 de out. 2017. Disponível em: <<https://www.ht-instruments.com/en/products/photovoltaic-testers/i-v-curve-tracers/i-v400w/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- LUNA, M. L. M. *Desenvolvimento e validação de traçador de curva IxV para módulos fotovoltaicos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 24 e 25.
- MEDEIROS, R. P. de et al. A simple circuit for characterization of photovoltaic module under uniform radiation and shading conditions. In: *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 47.
- NETO M. R.; CARVALHO, P. C. M. B. *Geração de energia elétrica: fundamentos*. 1 ed.. ed. [S.l.]: Editora Érica Ltda, 2013. Citado na página 14.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. *Circuitos Elétricos*. 10ª ed.. ed. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 8543004780. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 32 e 35.
- OTT, H. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. 2nd. ed.. ed. [S.l.]: Wiley, 1988. ISBN 978-0471850687. Citado na página 34.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas fotovoltaicos*. [S.l.]: CEPEL - CRESESB, 2014. Citado na página 22.
- PORTAL SOLAR. *O INVERSOR SOLAR*. 2017. Acesso em: 15 de out. 2017. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/o-inversor-solar.html>>. Citado na página 15.
- RAZAVI, B. *Fundamentos da Microeletrônica*. [S.l.]: Grupo Gen - LTC, 2010. ISBN 978-85-216-2293-2. Citado 6 vezes nas páginas 21, 25, 26, 27, 31 e 32.
- SOLARPOWER EUROPE. *GLOBAL MARKET OUTLOOK FOR SOLAR POWER 2017-2021*. 2017. Acesso em: 15 de out. 2017. Disponível em: <http://www.solarpowereurope.org/index.php?id=819&ADMCMDCMD_cooluri=1>. Citado na página 17.
- SOLMETRIC. *PVA-1000S - PV Analyzer I-V Curve Tracers*. 2014. Acesso em: 10 de out. 2017. Disponível em: <<http://www.solmetric.com/pva1000s.html>>. Citado na página 16.

SOUZA, R. di. *Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo*. 2017. Acesso em: 23 de out. 2017. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Citado na página 19.

SZABÓ, L. The history of using solar energy. In: *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8. Citado na página 18.

TEXAS INSTRUMENTS. *Tiva™ C Series TM4C1294 - User's Guide*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/spmu365c/spmu365c.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 28 e 29.

TEXAS INSTRUMENTS. *Tiva™ TM4C1294NCPDT Microcontroller*. [S.l.], 2014. Citado na página 29.

TEXAS INSTRUMENTS. *Fórum Tiva™ C Series*. 2017. Acesso em: 30 de out. 2017. Disponível em: <https://e2e.ti.com/support/microcontrollers/tiva_arm/f/908>. Citado na página 28.

TIGGEMANN, H. *Sistema De Monitoramento Remoto e Controle de Microrrede Híbrida Isolada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015. Citado na página 18.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, May 2009. ISSN 0885-8993. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.