



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



Mateus de Oliveira Simões Marinho

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR DE
ALTO RENDIMENTO UTILIZANDO TÉCNICAS DE RASTREAMENTO SOLAR E
MPPT**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2018

MATEUS DE OLIVEIRA SIMÕES MARINHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE
ENERGIA SOLAR DE ALTO RENDIMENTO UTILIZANDO
TÉCNICAS DE RASTREAMENTO SOLAR E MPPT**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: João Carlos Vilela Castro

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Abril/2018

M338d Marinho, Mateus de Oliveira Simões.
Desenvolvimento de um sistema de geração de energia solar de alto rendimento utilizando técnicas de rastreamento solar e MPPT [manuscrito] / Mateus de Oliveira Simões Marinho. - 2018.

71f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Vilela de Castro.

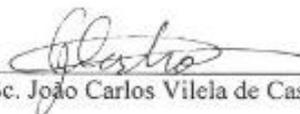
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Pannel fotovoltaico. 2. MPPT. 3. Rastreamento solar. 4. Arduino. I. Castro, João Carlos Vilela de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

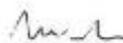
CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 27 de abril de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. M. Sc. João Carlos Vilela de Castro - Orientador



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



Vinicius Marinho da Silva – Professor Substituto Convidado

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Sandra e Luiz, pelo amor, incentivo, educação e suporte em todos os momentos em que precisei de vocês. Aos meus avós Osvaldo (in memoriam) e Dilma, por acreditarem em mim e por todo o apoio durante essa caminhada. À toda minha família que sempre me deu forças para concluir essa etapa da minha vida. Ao meu orientador João Carlos pela orientação, ajuda e atenção durante a elaboração desse projeto. A todos meus amigos pelos bons momentos, companheirismo, experiências de vida e suporte durante esses anos em Ouro Preto. À UFOP e aos professores por todo o conhecimento transmitido. E a todos que de alguma forma contribuíram para meu crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

Desde que começou a ser utilizada, a eletricidade tem se tornado cada vez mais presente no dia a dia da sociedade. No cenário energético atual, o maior desafio é conseguir suprir a demanda cada vez maior de energia. Com os avanços tecnológicos, o número de equipamentos ligados à rede elétrica tende a aumentar. Porém, não basta apenas aumentar a produção de energia, se esse aumento contribuir para o detrimento do meio ambiente e aumento das emissões de gases prejudiciais à saúde. Por isso, novas fontes de energia têm ganhado cada vez mais espaço no cenário mundial. Dentre essas fontes de energia, uma que está sendo cada vez mais utilizada é a geração de energia fotovoltaica. Mas o maior problema desse tipo de energia é a baixa eficiência do sistema de geração, que é fica em torno de 20% nos melhores sistemas. Portanto, o objetivo desse trabalho é desenvolver e analisar o desempenho de um controlador de baixo custo capaz de melhorar a eficiência de um sistema de geração de energia fotovoltaica, de forma a tornar esse tipo de sistema mais atrativo economicamente. Isso é feito de duas formas. A primeira, é feita implementando um algoritmo que tem como objetivo alterar a tensão de saída do painel, de forma que o painel forneça sempre o máximo de energia possível a uma determinada carga. A segunda forma, é analisar a eficácia de um sistema capaz de fazer o rastreamento solar, isso é, seguir o movimento do sol durante o dia, de forma a aproveitar melhor a energia deste. Com base em pesquisas realizadas, foi desenvolvido um protótipo para que fosse capaz de realizar os testes de viabilidade. Como resultado, concluiu-se que ambos os sistemas aumentam a eficiência do sistema de geração de energia.

Palavras chave: Painel fotovoltaico, MPPT, rastreamento solar, Arduino.

ABSTRACT

Since its discovery, electricity, as we know today, has become each time more important for the society. In the present energetic scenario, the biggest challenge is to suppress the demand, which is constantly increasing. With the technological advances, the number of devices connected to the electrical grid tends to increase. Only increase the energy generation is not enough, one has to increase the production preventing the emission of greenhouse gases, which can be harmful for the environment and human's health. That is why new clean energy sources are becoming more popular in the world scenario. One of these sources is the photovoltaic system. However, photovoltaics have one big problem: its efficiency is, at maximum, close to 20%. Therefore, this essay's objective is to develop and analyze the performance of a low cost controller that is able to improve the efficiency of a photovoltaic system, so this system will have a better economic appealing. There are two approaches to get to this objective. The first one is to implement an algorithm capable of modifying the panel's output voltage, so the panel will provide the maximum possible energy to the load. The second approach is to analyze the efficiency of a system that is capable to track the solar position, or follow the sun during the day, so the system will be able to generate more energy. Based on researches, a prototype has been developed, so tests could be made to analyze the viability of the proposed systems. The result was that both systems were able to improve the efficiency of the photovoltaic system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Decomposição do raio solar incidente	20
Figura 2.2 – Comportamento do painel com rastreamento vs sem rastreamento.....	21
Figura 2.3 – Comportamento do painel ao longo do dia	22
Figura 2.4 – Comportamento de um painel considerando massa de ar vs desconsiderando massa de ar.....	23
Figura 3.1 – Construção de uma célula fotovoltaica	26
Figura 3.2 – Painel solar monocristalino	27
Figura 3.3 – Painel solar policristalino	29
Figura 3.4 – Painel solar amorfo	30
Figura 3.5 – Painel solar CIGS	31
Figura 3.6 – Painel solar orgânico	31
Figura 3.7 – Curva característica de um painel solar	32
Figura 3.8 – Influência da temperatura no gráfico de tensão x corrente de um painel solar....	33
Figura 3.9 – Influência do nível de irradiância no gráfico de tensão x corrente de um painel solar	34
Figura 3.10 – Sistema MPPT genérico.....	36
Figura 3.11 – Funcionamento do algoritmo P&O	38
Figura 3.12 – Funcionamento do algoritmo Condutância incremental	39
Figura 3.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle por lógica Fuzzy	40
Figura 3.14 – Desempenho das três técnicas sob diferentes níveis de radiação solar.....	41
Figura 3.15 – Desempenho das três técnicas sob diferentes temperaturas.....	41
Figura 3.16 – Motor CC com encoder e redução utilizados na montagem	45
Figura 3.17 – Representação dos principais parâmetros para modelagem do motor	46
Figura 3.18 – Diagrama de blocos de um motor CC	47
Figura 3.19 – Representação da Ponte H.....	48

Figura 4.1 – Arduino Nano utilizado na montagem	50
Figura 4.2 – Sensor INA219.....	51
Figura 4.3 – Diagrama do circuito eletrônico feito em <i>software</i>	51
Figura 4.4 – Circuito eletrônico montado.....	52
Figura 4.5 – Lugar das raízes do sistema discreto não controlado	57
Figura 4.6 – Lugar das raízes do sistema com o controlador	58
Figura 5.1 – Comparação entre a energia (em Ws) gerada pelos três sistemas ao longo dos 5 minutos de teste	62
Figura 5.2 – Energia gerada e ciclo de trabalho, durante o teste com o MPPT.....	62
Figura 5.3 – Comparação entre a energia gerada pelos três sistemas ao longo do teste	64
Figura 5.4 – Energia gerada, em Ws, com o MPPT em funcionamento	65
Figura 5.5 – Potência na saída do conversor durante o teste com a painel seguindo o sol	66
Figura 5.6 – Potência na saída em Watts do conversor ao longo dos 5 minutos de teste.....	66
Figura 5.7 – Comparativo entre o teste rastreando o sol e sem rastrear	67
Figura 5.8 – Potência gerada na saída no painel e potência na saída do conversor	68
Figura 5.9 – Rendimento do conversor buck.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Comparação entre técnicas MPPT de eficiência, potência de saída e tempos de convergência.....	20
Tabela 3-1 – Eficiência de cada algoritmo sob diferentes condições de radiação solar.....	42
Tabela 5-1 – Metodologia utilizada para realização dos testes	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Justificativa	15
1.4	Metodologia.....	15
1.5	Estrutura do Trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Geração de Energia Solar.....	17
2.2	Rastreador do ponto de máxima potência (MPPT).....	18
2.3	Rastreamento Solar	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1	Painéis Fotovoltaicos	24
3.1.1	História das células fotovoltaicas	24
3.1.2	O efeito fotovoltaico.....	25
3.1.3	Tipos de painéis fotovoltaicos	26
3.1.4	Curva característica de um painel solar.....	32
3.2	Conversor Buck	34
3.3	Rastreamento do máximo ponto de potência (MPPT).....	35
3.3.1	Justificativa para a utilização das técnicas MPPT	36
3.3.2	Técnicas MPPT mais comuns	36
3.3.3	Comparativo entre as técnicas	40
3.4	Microcontrolador Arduino	42
3.5	Motores de corrente contínua (Motores CC)	43
3.5.1	Modelagem matemática do motor CC.....	45
3.5.2	Ponte H.....	47

3.6	Controle por alocação de Polos.....	48
4	DESENVOLVIMENTO.....	50
4.1	Montagem do circuito eletrônico.....	50
4.2	Desenvolvimento do código do microcontrolador.....	52
4.2.1	Código do MPPT.....	53
4.2.2	Controle de posição do motor.....	55
5	RESULTADOS.....	61
5.1	Testes da eficiência do MPPT sem distúrbio.....	61
5.2	Testes da eficiência do MPPT com distúrbio.....	63
5.3	Testes da eficiência do seguidor solar.....	65
5.4	Teste de eficiência do conversor buck.....	67
6	CONCLUSÃO.....	70
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	71
7	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é uma ferramenta extremamente importante na sociedade humana nos dias atuais. É só olhar em volta que veremos vários exemplos de equipamentos que precisam de energia para funcionar, como eletrodomésticos, aparelhos eletrônicos, iluminação, etc. Na indústria, desde a segunda revolução industrial, a energia elétrica se tornou um insumo necessário para a viabilização de qualquer empreendimento.

O grande número de aparelhos eletrônicos, indústrias cada vez mais automatizadas e o surgimento do *Internet of Things* (IOT) e *Industrial internet of things* (IIOT) fez com que a dependência da energia elétrica aumentasse, juntamente com o consumo.

Segundo Correia-Silva et al (2017), “testes comprovaram a hipótese subjacente que há relação de causalidade unidirecional crescimento econômico para o consumo de eletricidade.” Ou seja, com o desenvolvimento econômico de um país, a tendência é que se gaste mais energia. Uma matriz energética defasada pode levar a problemas no abastecimento de energia no país.

A energia elétrica gerada no Brasil provém principalmente de usinas hidrelétricas sendo que 65,1% da energia elétrica gerada é fornecida por esse tipo de fonte (CORREIA-SILVA et al., 2017).

Essa grande dependência de fontes de energia hidráulica, fez com que em 2015 o país passasse por uma crise energética sem precedentes, mesmo levando em conta a crise energética que também ocorreu em 2001. A falta de chuva e de investimentos no setor, aliadas ao alto consumo energético, fizeram com que o país sofresse com uma falta de energia (THOMAZ, 2017).

Para resolver a situação, as termelétricas tiveram que ser ligadas, para que assim a demanda de energia pudesse ser suprida. Porém, esse fato implica em um aumento de custo ao consumidor, visto que as termelétricas possuem um custo operacional superior às hidrelétricas.

Tendo em vista essa situação, é possível concluir que investimentos na diversificação da matriz energética do país são extremamente necessários.

Uma excelente alternativa de implementação em nosso país é a energia fotovoltaica. Esse tipo de tecnologia converte a energia proveniente da radiação solar em energia elétrica, utilizando placas chamadas de placas fotovoltaicas. Essas placas são construídas utilizando materiais

semicondutores, como por exemplo, o silício. Mais à frente, serão apresentados os painéis fotovoltaicos mais comuns encontrados no mercado.

O Brasil é um país privilegiado para implantação usinas de geração de energia solar, devido à alta incidência solar durante todo o ano e grandes reservas de silício, material utilizado na fabricação de grande parte placas de energia fotovoltaica. Segundo Carvalho, Mesquita e Rocio (2014), o país é responsável por 8% da produção mundial de silício, sendo responsável pela produção de 170 milhões de toneladas de silício por ano.

Apesar de todas essas vantagens, o Brasil não possui grandes investimentos em energia solar. No final do ano de 2016, o país possuía apenas 81MWp de energia fotovoltaica instalada, o que representa apenas 0,05% da capacidade de geração instalada no país. Esses dados chamam atenção, principalmente ao analisarmos os valores de irradiação solar no país, que alcançam médias anuais de 1500-2500 Wh/m², valores superiores aos de países europeus como Alemanha (900-1250 Wh/m²) e França (900-1650 Wh/m²), que são países nos quais esse tipo de geração de energia é amplamente utilizado (NASCIMENTO, 2017).

Além dos altos níveis de irradiação solar em nosso país, a implantação da energia solar em solo nacional possui outras vantagens, como por exemplo, ser uma energia limpa, que não emite poluentes durante a geração de energia; É modular, ou seja, pode ser gerada tanto em larga escala por empresas especializadas, quanto em pequena escala por produtores residenciais, ambos com facilidade de expansão caso seja necessário; Os custos operacionais são baixos, visto que a manutenção é simples pois envolve em grande parte a limpeza das placas, e, depois de instalar o sistema, não há nenhum custo direto relacionado à geração.

Uma outra vantagem a ser considerada, é a possibilidade de gerar energia elétrica de forma isolada, como em zonas rurais que não são atendidas por linhas de transmissão, e também em locais onde não há espaço para grandes instalações, como por exemplo, embarcações.

Em contrapartida, uma das maiores desvantagens desse tipo de sistema de geração é sua eficiência, que fica na faixa de 20% para placas comerciais de silício.

Nesse trabalho, serão apresentadas duas técnicas, que têm por objetivo aumentar a eficiência na conversão de energia solar em elétrica.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho é construir um sistema para aumento da eficiência de um sistema de geração fotovoltaica, aplicando técnicas de rastreamento solar e seguidor de máximo ponto de

potência (MPPT) para geração e armazenamento de eletricidade. Além disso, será realizado um estudo comparativo entre um painel solar com a aplicação das técnicas descritas e outro sem a utilização destas, para que seja possível justificar a utilização ou não do sistema desenvolvido.

1.2 Objetivos Específicos

Desenvolver e implantar um sistema MPPT, microcontrolado, em um conjunto de placas fotovoltaicas que será responsável por variar a tensão de saída do painel visando alcançar o ponto de maior potência.

Projetar um sistema de rastreamento solar, que tem por objetivo aproveitar melhor a incidência solar durante o dia, por meio da rotação do painel solar durante o dia de acordo com a posição do sol. Ao seguir o sol, teoricamente haverá um aumento da eficiência do painel.

Desenvolver um sistema de aquisição de dados utilizando um microcontrolador, que fará a coleta de dados de tensão e corrente na saída de um conjunto de placas fotovoltaicas, onde serão aplicadas as técnicas descritas, e outro conjunto de placas fotovoltaicas sem aplicação das técnicas. Dessa forma, será possível fazer a comparação entre os dois sistemas, por meio da análise dos dados coletados.

1.3 Justificativa

O sistema proposto nesse trabalho visa aumentar a eficiência de um sistema de geração de energia fotovoltaica, melhorando assim sua viabilidade econômica, especialmente para locais que possuem pouco espaço disponível para a instalação do sistema, como por exemplo embarcações e edifícios, tornando o sistema de geração fotovoltaica mais atrativo.

1.4 Metodologia

Para a execução do presente trabalho, a metodologia utilizada é a revisão de bibliografia com o intuito de obter um referencial teórico para o trabalho, seguido do desenvolvimento prático, composto pela montagem de um sistema de baixo custo em pequena escala para simular o funcionamento do sistema proposto no trabalho.

Para isso, será realizada a montagem do circuito eletrônico de controle e também o desenvolvimento do código do microcontrolador.

1.5 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo, é apresentada ao leitor uma breve introdução relativa ao tema abordado no trabalho, assim como os objetivos e justificativas que levaram ao desenvolvimento do trabalho.

No segundo capítulo, é apresentado o referencial teórico no qual o trabalho foi baseado.

No terceiro capítulo, são apresentados os materiais utilizados na elaboração do projeto, assim como a parte teórica dos métodos que foram implementados no trabalho.

Os detalhes da montagem do circuito de controle, assim como a implementação dos métodos utilizados são apresentados no quarto capítulo.

No quinto capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a realização dos testes e também os resultados obtidos nesses.

No sexto capítulo, é feita uma conclusão sobre o projeto, comparando-o com os objetivos iniciais. Por último, são feitas algumas sugestões que podem ser utilizadas para elaborar projetos futuros, de forma a incentivar a continuação do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas algumas das pesquisas existentes no contexto de geração de energia solar, técnicas MPPT e rastreamento solar, com o intuito de situar o leitor a respeito do tema e fundamentar o trabalho.

2.1 Geração de Energia Solar

A geração de energia fotovoltaica é cada vez mais utilizada em aplicações em larga escala. Diversos estudos e o desenvolvimento de novas tecnologias contribuem para este aumento. Há inúmeras aplicações para este tipo de tecnologia.

Moreira, Bueno e Tessaro (2017) realizaram um estudo para verificar a viabilidade de um sistema de geração de energia fotovoltaica para famílias de baixa renda residentes em áreas rurais. O sistema desenvolvido é independente da rede de distribuição elétrica, pois esta não consegue chegar em todas as regiões, e foi dimensionado de acordo com o gasto médio dos moradores da região pesquisada.

Como resultado de seus estudos, os pesquisadores concluíram que o sistema foi bem-sucedido, mas verificaram que um grande empecilho para a implantação desse tipo de sistema é o alto custo dos equipamentos de eletrônica de potência, responsáveis por fazer a conversão da energia gerada no painel para ser utilizada nas tomadas. Por fim, foi desenvolvido um protótipo desse sistema, a fim de verificar o funcionamento do sistema projetado.

Seguindo a mesma linha de utilização de energia fotovoltaica em áreas rurais, Bem et al. (2017) desenvolveu um sistema de bombeamento de água alimentado por energia fotovoltaica. No estudo, foram desenvolvidos quatro protótipos para analisar a viabilidade e a eficiência do sistema.

Como resultado, foi possível observar que o sistema é capaz de bombear a quantidade necessária de água em uma propriedade rural de pequeno porte, chegando a 3500 litros por dia, quantidade necessária para a manutenção de 150 bovinos. Com isso, é possível observar que o trabalho foi de grande importância para o atendimento de comunidades rurais ainda não atendidas pela rede elétrica do governo.

Já Souza, Masotti e Gritti (2016) realizaram um estudo teórico para análise de viabilidade de implantação de um sistema de geração de energia fotovoltaica em um tipo de empreendimento chamado Small office home office. Foi concluído que a aplicação desse sistema para esse tipo

de empreendimento gera retorno de curto a médio prazo. Além disso, é um diferencial para o empreendedor, quando se considera o papel social desempenhado pela geração de energia limpa.

Todos os exemplos citados acima são de aplicações de pequeno porte. Porém, a geração de energia fotovoltaica também pode ser realizada em empreendimentos de maior escala.

Braun et al. (2016) realizou um estudo para analisar a capacidade de geração de energia em seis grandes aeroportos brasileiros. O estudo se deu por meio da coleta de dados anuais de consumo de energia e também cálculos para determinar a quantidade média de energia gerada pelo sistema, caso fosse implantado. Os cálculos foram feitos de acordo com cada localidade. Como resultado, os autores concluíram que a instalação desse tipo de sistema de geração nessas localidades poderia suprir, em média 50% da energia utilizada pelas edificações.

Além do ganho econômico, a instalação desse tipo de sistema em larga escala poderia impulsionar o mercado fotovoltaico brasileiro, proporcionando a redução de custos e investimentos no mercado, tanto de fabricação, quanto de desenvolvimentos de novas tecnologias em solo nacional.

Por fim, da Silva, Drach e Barbosa (2017) apresentaram o conceito de cidades compactas e propor uma alternativa energeticamente sustentável para que não haja redução da eficiência energética em uma cidade compacta. Seus resultados demonstram que o sistema de geração de energia fotovoltaica, além de ser um fator positivo na manutenção da eficiência energética, é também uma alternativa promissora para a redução nas ilhas de calor e manutenção do conforto térmico nas cidades compactas.

2.2 Rastreador do ponto de máxima potência (MPPT)

O rastreador de ponto de potência máximo, representado pela sigla em inglês MPPT, é uma técnica aplicada para obter um ponto ótimo em uma curva de um determinado processo.

Em um sistema de geração de energia fotovoltaica, essa técnica é aplicada para obter a máxima potência gerada em um determinado instante de tempo. Nesse sentido, diversos trabalhos publicados aplicam o método de diferentes formas, visando obter uma melhor eficiência em um sistema de geração de energia.

O método MPPT mais utilizado é o Perturbe e Observe (P&O), pois é um algoritmo de baixa complexidade e não necessita de manutenção. Basicamente, o algoritmo cria uma perturbação no sistema, como aumentar o ciclo de trabalho de um conversor por exemplo, e observa o

resultado da alteração. Por meio da análise de resultado, é possível saber se o aumento do ciclo de trabalho foi benéfico ou não. De acordo com o resultado, um novo aumento ou redução é feito e o processo é repetido.

Chandwani e Kothari (2016) desenvolveram um algoritmo, utilizando o método Perturbe e Observe (P&O), tendo em vista aumentar a eficiência de um sistema de geração de energia solar conectado a um conversor DC-DC. Foi feita uma simulação no software MatLab, e também desenvolvido um sistema físico para comprovar os resultados. Como resultado, foi observado que, por meio da alteração do ciclo de trabalho do conversor, o sistema conseguiu manter uma tensão de saída constante e em seu máximo valor, quando utilizada a técnica MPPT.

Porém, o algoritmo P&O possui uma limitação a ser considerada quando aplicado a sistemas solares. Ele não é capaz de operar bem quando há uma súbita mudança na temperatura ou irradiância solar.

Para resolver esse problema, Nigam e Gupta (2016) propuseram uma solução que visa diminuir as limitações do P&O convencional. Seu trabalho mostra, usando uma simulação via software, que se utilizarmos uma perturbação de tamanho variável no algoritmo, o algoritmo se torna mais eficiente e mais rápido.

Um outro possível uso das técnicas MPPT é discutido por Liu et. al (2017). Em seu artigo, foi implementado um algoritmo específico para situações de baixos valores de irradiância solar, abaixo de 100 W/m^2). Fazendo comparações entre a técnica convencional e a proposta, foi possível observar uma melhora na eficiência com baixos níveis de irradiância, como é possível observar na tabela 2.1.

Nível de irradiância	Eficiência do MPPT		Potência de saída do MPPT		Tempo de convergência do MPPT (em segundos)	
	Teórico	Medido	Teórico	Medido	Teórico	Medido
$650 \frac{W}{m^2}$	95%	60%	180W	100W	0	0
$500 \frac{W}{m^2}$	92%	51%	90W	50W	0	0
$250 \frac{W}{m^2}$	87%	Divergente	60W	Divergente	0,8	33.6
$100 \frac{W}{m^2}$	85%	Divergente	20W	Divergente	0	80

Tabela 2-1 – Comparação entre técnicas MPPT de eficiência, potência de saída e tempos de convergência

Fonte Adaptado de LIU ET AL. (2017)

2.3 Rastreamento Solar

Devido à rotação da Terra, um determinado ponto em seu solo só recebe radiação solar durante algumas horas do dia. Isso implica que o painel solar só produzirá energia durante um determinado período do dia.

Um raio solar que incide sobre a Terra com um determinado ângulo pode ser decomposto em duas componentes: uma perpendicular ao solo e outra paralela. Na figura 2.1, é possível observar a decomposição de um raio solar incidente em um determinado ponto.

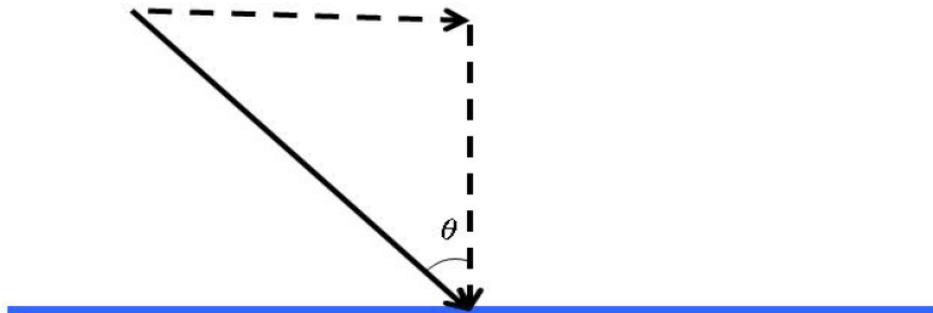


Figura 2.1 – Decomposição do raio solar incidente

Fonte SHAYANI, 2006

Para produzir energia solar, o painel fotovoltaico utiliza apenas a componente vertical dos raios solares. Ou seja, a energia produzida é proporcional ao cosseno do ângulo θ formado entre o solo e os raios incidentes.

O sistema de rastreamento solar tem por objetivo seguir o movimento do sol durante o dia, de modo que o painel esteja sempre perpendicular com os raios solares. Assim, o ângulo θ será constante ao longo do dia e igual a 0° , logo, $\cos\theta = 1$ durante todo o dia.

Na Figura 2.2 pode-se observar como fica o comportamento teórico de um painel utilizando o sistema de rastreamento solar contra outro que não utiliza essa técnica, sem considerar os efeitos da atmosfera.

Na Figura 2.3 é possível observar como o painel com rastreamento solar se comporta durante o dia em relação aos raios solares.

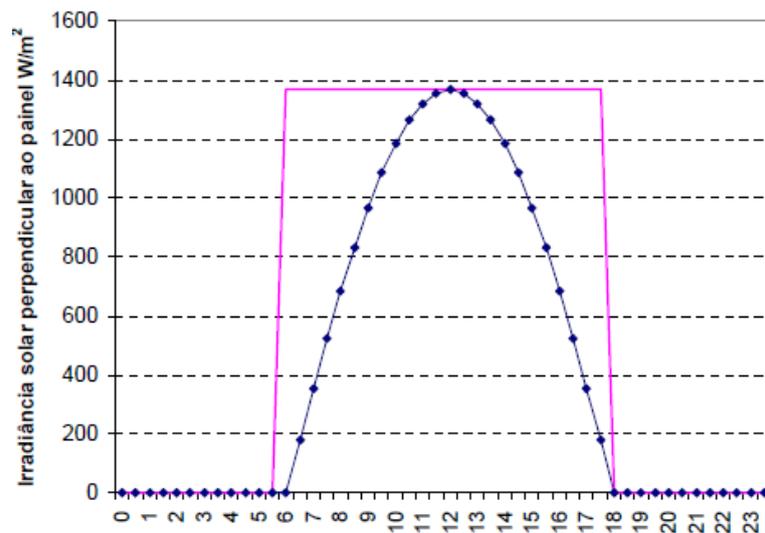


Figura 2.2 – Comportamento do painel com rastreamento vs sem rastreamento

Fonte SHAYANI, 2006

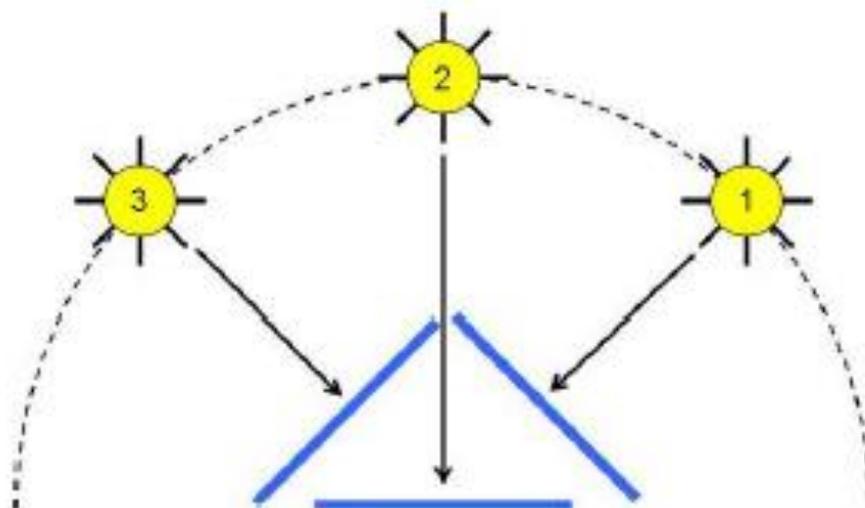


Figura 2.3 – Comportamento do painel ao longo do dia

Fonte SHAYANI, 2006

Com a utilização dessa técnica, o painel pode aproveitar melhor o sol, melhorando sua eficiência de conversão de energia solar em elétrica durante o dia.

Massa de Ar é definida pela ABNT como a razão entre o caminho ótico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção do zênite ao nível do mar.

Ao desconsiderar o efeito da massa de ar, é possível observar um aumento de 57% no desempenho de um painel solar. Caso seja considerado o efeito da massa de ar, o ganho é um pouco menor, ficando em 48% (SHAYANI, 2006).

Na Figura 2.4 é possível observar o desempenho de painéis extraterrestres, que desconsideram a massa de ar, e painéis no solo, com e sem a utilização de rastreamento solar, ao longo de um dia.

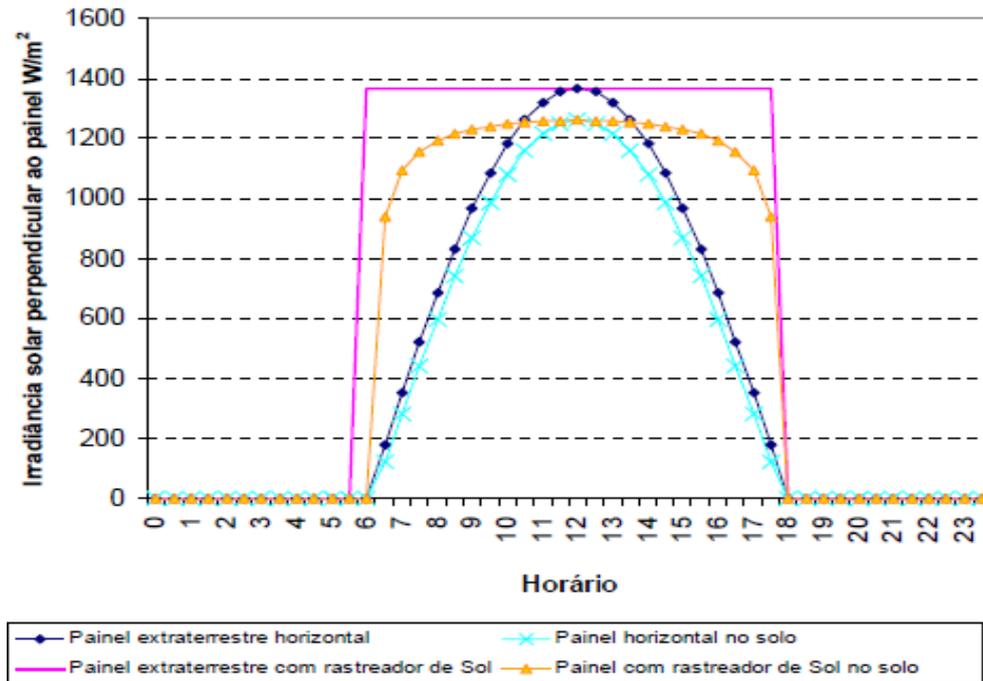


Figura 2.4 – Comportamento de um painel considerando massa de ar vs desconsiderando massa de ar

Fonte SHAYANI, 2006

Existem diversas formas de aplicação de um sistema de rastreamento em um sistema de geração de energia fotovoltaica. Muitas pesquisas são realizadas nessa área, tendo como objetivo apresentar novas formas de aplicar estas técnicas de rastreamento.

Ahmed e Khan (2014) desenvolveram um sistema de rastreamento solar baseado em um timer. Nesse sistema proposto, o painel teria determinadas posições definidas de acordo com o horário do dia e giraria a uma velocidade pré-definida. Segundo eles, o sistema desenvolvido seria capaz de aumentar a eficiência do sistema de geração em até 60%, durante 6 horas por dia de funcionamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho, assim como os métodos utilizados para atingir os objetivos.

3.1 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são associações entre células fotovoltaicas e são os responsáveis pela geração de eletricidade, fenômeno que acontece por meio do efeito fotovoltaico. Essas células podem ser associadas em série ou em paralelo. A associação em série faz com que a tensão de saída seja maior, enquanto mantém a corrente constante. Já a associação em paralelo mantém a tensão de saída constante e aumenta a corrente. O painel possui tantas células ligadas, tanto em série quanto em paralelo, quanto forem necessárias para atingir os níveis de tensão e corrente desejados, o que torna esse sistema extremamente flexível.

Diversos materiais podem ser utilizados na construção das células, mas todas funcionam pelo mesmo princípio. As maiores diferenças entre os materiais são os custos de produção e o rendimento. Posteriormente será feita uma comparação entre os materiais.

3.1.1 História das células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos capazes de transformar energia solar em elétrica por meio do efeito fotoelétrico. Esse efeito foi observado pela primeira vez por Alexandre-Edmond Becquerel, um físico francês, no ano de 1839 e confirmado por Heinrich Hertz no ano de 1887. Quando uma luz com determinada frequência incide em um material metálico, este libera elétrons de sua superfície, que vão em direção a uma outra placa colocada à frente que possui uma energia potencial maior, formando assim uma corrente elétrica entre os dois materiais, que dura até que a luz seja bloqueada. (Sears et al, 1983 apud Faria, 2014).

As primeiras células fotovoltaicas industriais foram construídas em 1956, fato que foi possível devido à utilização da microeletrônica. Inicialmente a utilização de painéis solares não era economicamente viável, devido ao seu alto custo de produção.

Portanto, as primeiras aplicações das células fotovoltaicas foram para geração de energia autônoma em satélites artificiais, onde os custos da produção dos painéis não eram consideráveis tendo em vista os custos totais do projeto e os benefícios trazidos pela utilização desse tipo de tecnologia. O baixo peso, aliado com a robustez e a praticidade de produzir energia no espaço sem a necessidade da utilização de um banco extenso de baterias fizeram com que essa tecnologia fosse amplamente adotada para essas aplicações.

Após comprovar o sucesso desse tipo de geração de energia em satélites, os painéis solares começaram a ser utilizados para a geração de energia em estações remotas de telecomunicações. Isso permitiu às empresas de telecomunicações a ampliação de seu sinal sem despendar altos investimentos para a transmissão de energia elétrica até regiões isoladas.

Em 1973, com o advento da crise do petróleo, as pesquisas na área de geração de energia fotovoltaicas aumentaram. Porém, ainda havia o fator limitante, que era o custo de produção das placas pela quantidade de energia gerada por elas. Por causa disso, mesmo com o aumento nas pesquisas, o desenvolvimento dessa tecnologia ainda era lento. Segundo Nascimento (2004), em 1978 a produção de energia já chegava a 1 MWp/ ano. Quinze anos após, devido ao aumento na produção e às pesquisas na área, esse valor já atingia 60 MWp/ano.

A década de 90 foi decisiva para a ampliação dessa tecnologia. Diversos programas mundiais procuravam mostrar a viabilidade da utilização da energia fotovoltaica, principalmente para eletrificação de zonas rurais nos países em desenvolvimento.

3.1.2 O efeito fotovoltaico

Para construir as células fotovoltaicas, são utilizados materiais semicondutores. Esses materiais possuem características intermediárias entre condutor e isolante. Um dos semicondutores mais utilizados é o silício.

Normalmente, o silício se apresenta em forma de areia. Para obter o silício puro, que será utilizado na construção da placa, é necessário processar o silício. Porém, os cristais de silício não apresentam elétrons livres em sua composição. Por isso, é necessário realizar um outro procedimento, chamado dopagem, que consiste em acrescentar pequenas quantidades de outros elementos, de forma a alterar as propriedades do material

Por meio da dopagem do silício com fósforo, consegue-se um material com elétrons livres, ou seja, um material do tipo N. Por outro lado, por meio da dopagem do silício com o boro ao invés do fósforo, obtém-se um material de características invertidas, ou seja, há falta de elétrons livres, material chamado de tipo P.

Para compor uma célula solar, é utilizada uma fina camada de um material do tipo N e uma camada mais espessa do tipo P. Além disso, também são necessários um filme antirreflexo e contatos metálicos. A figura 3.1 representa como é construída uma célula fotovoltaica.

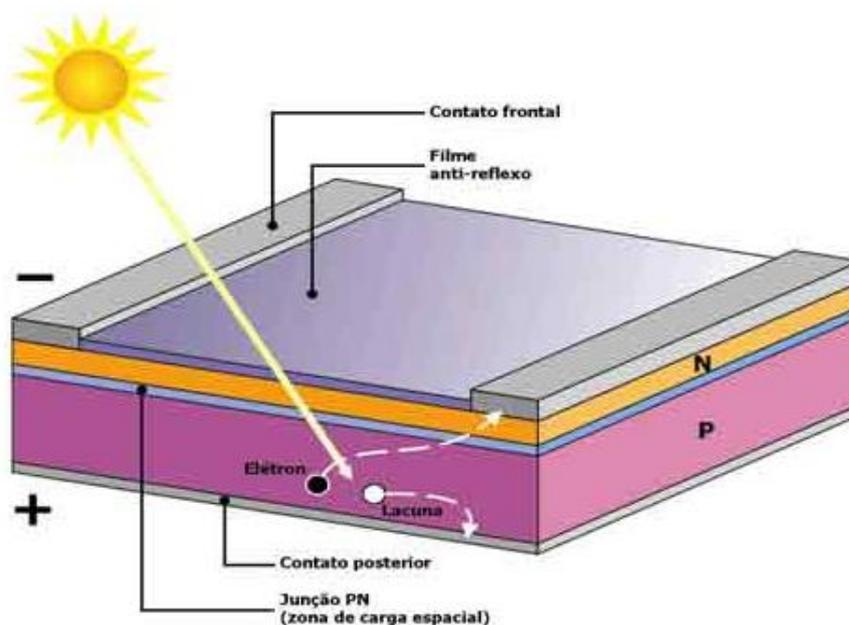


Figura 3.1 – Construção de uma célula fotovoltaica

Ao unir os materiais P e N, na chamada junção PN, um campo elétrico é formado, pois os elétrons livres do material N preenchem as lacunas disponíveis no material P. Quando a luz incide sobre o material, os fótons chocam-se contra os elétrons, fornecendo-lhes energia, transformando-os assim em condutores. Dessa forma, os elétrons, devido ao campo elétrico presente na junção PN, são orientados e fluem do material N para o material P.

Ao conectar um condutor entre os dois contatos da célula é gerada uma corrente elétrica. Essa corrente se manterá enquanto houver incidência de luz sobre a célula. Esse efeito é chamado de efeito fotovoltaico. A célula não é capaz de armazenar energia. Para que isso aconteça, deve-se conectar o sistema a uma bateria.

Quanto maior a incidência de luz, mais fótons fornecerão energia aos elétrons. Ou seja, a corrente é proporcional à quantidade de luz que incide sobre a célula.

3.1.3 Tipos de painéis fotovoltaicos

As placas de energia fotovoltaicas podem ser construídas de diferentes formas. Cada tipo de construção possui suas vantagens e desvantagens. Serão apresentadas a seguir algumas das construções mais comuns e também algumas pesquisas de novos tipos de construção.

3.1.3.1 Painel solar de silício monocristalino

As células construídas com esse tipo de material são chamadas de células de primeira geração. São as mais utilizadas no mercado, pois o processo de fabricação desse tipo de célula é

bastante conhecido. Porém este processo é muito caro. O silício utilizado para a construção da célula deve possuir um altíssimo grau de pureza (na faixa de 99,9999%) e, para atingir esse grau de pureza, utiliza-se um processo lento e com um alto grau de rigor em sua fabricação.

Neste processo, o cristal é extraído em um forno com temperaturas na ordem de 1000°C. Após a extração do silício, deve-se dopar o material e cortar o cristal em finas fatias, da ordem de 300 micrometros. Esse processo acarreta em perdas no material. Isso faz com que o valor das placas deste material seja elevado.

Uma grande vantagem desse tipo de construção é sua eficiência elevada, podendo atingir cerca de 22%. A vida útil do painel é estimada entre 25 e 30 anos. Outra vantagem desse tipo de painel é o fato de seu desempenho ser superior ao de painéis de silício policristalino em dias de pouca luz.

O painel de silício monocristalino é facilmente identificável por meio de sua coloração, que é uniforme em toda a placa. A figura 3.2 representa uma placa solar construída utilizando esse tipo de silício.

Para o presente trabalho, esse tipo de painel foi o escolhido, principalmente por questões de disponibilidade no mercado e custos.



Figura 3.2 – Painel solar monocristalino

3.1.3.2 Placa de silício policristalino

Esse tipo de placa começou a ser desenvolvida com um objetivo: reduzir os custos finais do painel solar. O processo de fabricação das células de silício policristalino se assemelha bastante ao das células de silício monocristalino. Porém, para as células de silício policristalino, o controle de qualidade é menos rigoroso. Os cristais de silício são fundidos em um bloco, fazendo com que sejam formados vários cristais, ao invés de um único. Com isso, o custo de fabricação desse material é menor, levando a um painel com um preço mais acessível.

Porém, esse menor rigor no processo de fabricação gera um produto com uma menor pureza, o que faz com que o painel solar possua uma menor eficiência. A eficiência desse tipo de placa alcança até 18%, em painéis comerciais.

Dessa forma, um painel vai gerar menos energia por metro quadrado. Logo, para suprir uma determinada demanda de energia, será necessária uma área maior para a instalação do sistema de geração, se comparado com a mesma demanda sendo suprida por painéis de silício policristalino.

Além do preço menor, outra vantagem desse tipo de painel é a menor quantidade de silício residual que é gerado durante o processo de fabricação. Ou seja, aproveita-se melhor a matéria prima disponível, gerando menos desperdício.

Da mesma forma que o painel solar monocristalino, a vida útil estimada do painel solar policristalino é de 25 a 30 anos.

É possível identificar um painel desse tipo pela sua coloração não uniforme. Devido ao seu processo de fabricação, o painel acabado possui diversas formações de cristal em sua superfície. Na figura 3.3 é possível observar um painel solar policristalino.



Figura 3.3 – Painel solar policristalino

3.1.3.3 Painel solar de silício amorfo

Esse tipo de célula solar possui um processo de fabricação com um custo muito baixo, tanto em termos de energia quanto de matéria prima. As células solares produzidas dessa forma utilizam apenas 1% do silício necessário para a produção de células de silício monocristalinas e policristalinas.

Porém, devido à sua baixa eficiência energética, esse tipo de célula, até recentemente, só era utilizado para aplicações de pequena escala, como por exemplo, calculadoras e relógios.

No entanto, com o avanço da tecnologia, aplicações em larga escala já estão sendo possíveis. Para que isso seja alcançado, é utilizada uma técnica de fabricação chamada empilhamento, que consiste em combinar várias camadas de silício amorfo, de forma a atingir taxas mais elevadas de eficiência energética, atingindo até 9% de eficiência. Porém, esse processo de empilhamento é um processo caro.

Além da baixa eficiência, outra grande desvantagem é a degradação mais rápida das células desse tipo de painel, podendo perder um pouco de sua eficiência já nos primeiros meses de utilização.

Na figura 3.4 está representada uma célula de silício amorfo típica. É possível observar que a célula apresenta uma coloração marrom, tornando-a facilmente distinguível das demais apresentadas.



Figura 3.4 – Painel solar amorfo

3.1.3.4 Painel solar de telureto de cádmio

Esse tipo de painel solar é o único painel a superar a relação de custo/eficiência dos painéis solares de silício cristalino, fazendo com que conseguisse uma parcela significativa no mercado de painéis solares. Sua eficiência é de até 16%.

Esse tipo de painel é utilizado principalmente em grandes usinas de geração de energia solar.

3.1.3.5 Painel solar de cobre, índio e gálio (CIGS)

Em comparação aos outros tipos de painel, esse é um dos que apresenta o maior potencial em termos de eficiência. É uma tecnologia ainda em desenvolvimento, cuja produção comercial se iniciou na Alemanha apenas em 2011.

Apresenta uma grande vantagem por não possuir cádmio, que é um material tóxico, em sua composição. Outra vantagem desse tipo de painel é sua flexibilidade. Se montado sobre um substrato que também é flexível, pode ser moldado para ser montado em superfícies não planas.

Já é possível encontrar painéis com eficiência em torno de 13% para comercialização no Brasil. Mas vale ressaltar que esse tipo de painel ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento, o que pode levar a um aumento na eficiência desses painéis nos próximos anos. A figura 3.5 mostra um painel CIGS.

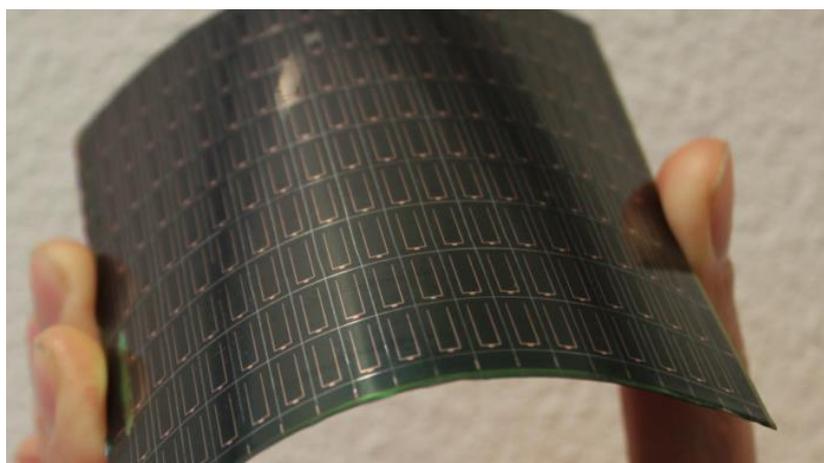


Figura 3.5 – Painel solar CIGS

3.1.3.6 Painel Fotovoltaico orgânico

Esse tipo de tecnologia de fabricação de painel é a mais atual. Suas células são fabricadas com um polímero que utiliza a eletrônica orgânica, um ramo da eletrônica que utiliza polímeros orgânicos condutores para absorver luz e transportar cargas, de forma a gerar eletricidade por meio do efeito fotovoltaico.

É um tipo de painel flexível, com um baixo custo de produção, feita utilizando processos de impressão, com máquinas simples e materiais abundantes. Porém, são poucas as empresas que conseguem produzir esse tipo de células para escala industrial.

Uma desvantagem desse tipo de painel é a baixa eficiência, exigindo uma área e investimento maiores em relação às placas de silício. Além disso, sua vida útil é mais curta, elevando o gasto com manutenção dos equipamentos. A figura 3.6 mostra um painel fotovoltaico orgânico.

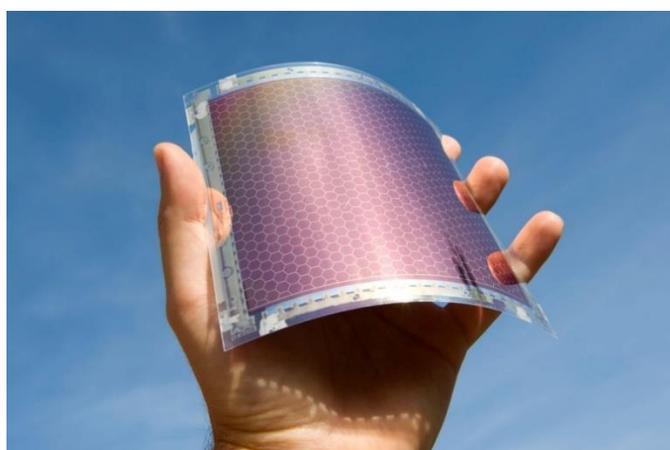


Figura 3.6 – Painel solar orgânico

3.1.4 Curva característica de um painel solar

Cada painel solar possui diferentes características de tensão e corrente em sua saída. Por meio de medições desses dois parâmetros, é possível construir um gráfico da tensão de saída, V_o , e da corrente de saída, I_o . O gráfico resultante é conhecido como a curva característica de um painel fotovoltaico. A figura 3.7 mostra a curva característica de um determinado painel.

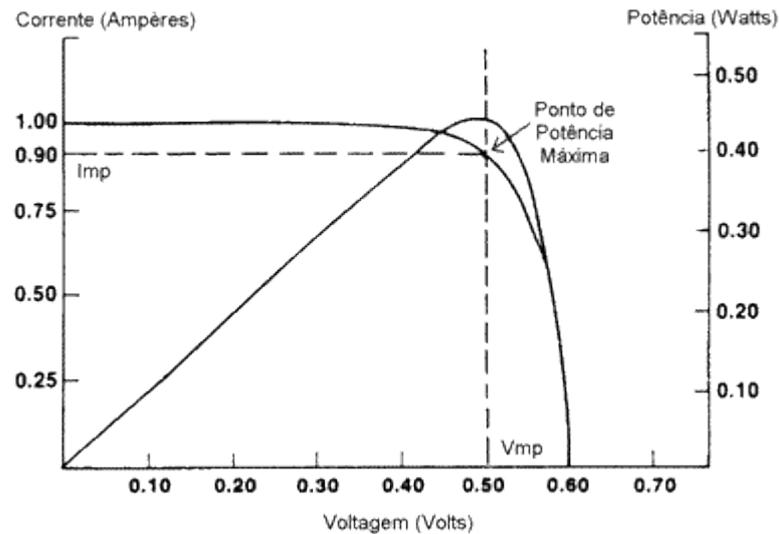


Figura 3.7 – Curva característica de um painel solar

Ao analisar o gráfico da curva característica, é possível observar que a corrente do painel se mantém praticamente constante em uma determinada faixa de operação do painel. Ao aumentar a tensão de saída do painel acima de um determinado valor, há uma queda brusca na corrente, corrente essa que chega a zero quando o painel atinge sua tensão nominal, chamada de tensão de circuito aberto.

O chamado ponto de máxima potência, ou MPP, é o ponto onde o resultado da multiplicação da corrente e da tensão de saída é o maior possível.

Isso quer dizer que para que o painel fotovoltaico trabalhe com sua máxima potência de saída, ele deve trabalhar sempre com a tensão de saída correspondente ao ponto de máxima potência. Para isso, é necessário um conversor CC-CC na saída, que será responsável por controlar a tensão de saída do painel fotovoltaico com o objetivo de manter o painel nesse ponto de máxima potência.

Porém, um mesmo painel fotovoltaico pode possuir mais de uma curva característica. Isso se deve ao fato de que a curva característica depende de fatores como o nível de radiação solar

no momento e a temperatura do painel. Portanto, os parâmetros de um determinado painel solar em seu ponto de máxima potência são diferentes de acordo com as diferentes condições de radiação solar e temperatura.

Por exemplo, em dias quentes, assim como em dias nublados, onde nível de radiação é menor, a tensão no ponto de maior potência é mais baixa. A figura 3.8 e 3.9 mostram respectivamente como a temperatura e o nível de radiação solar influenciam na curva característica de um determinado painel.

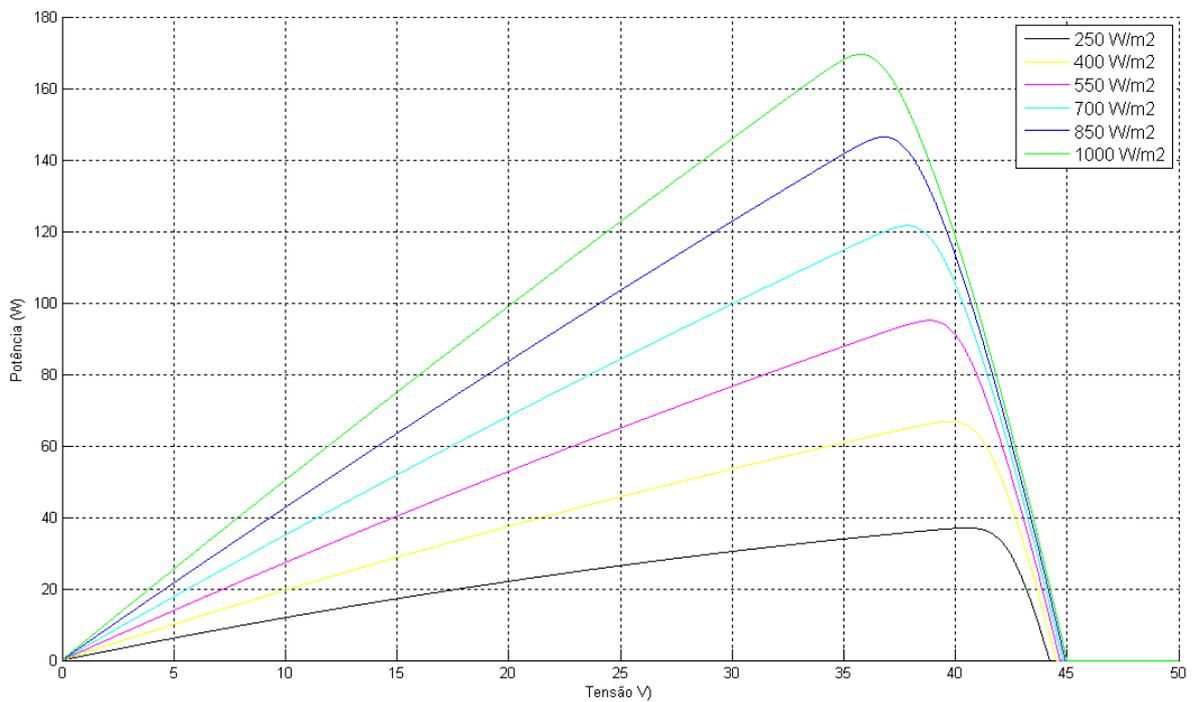


Figura 3.8 – Influência da temperatura no gráfico de tensão x corrente de um painel solar

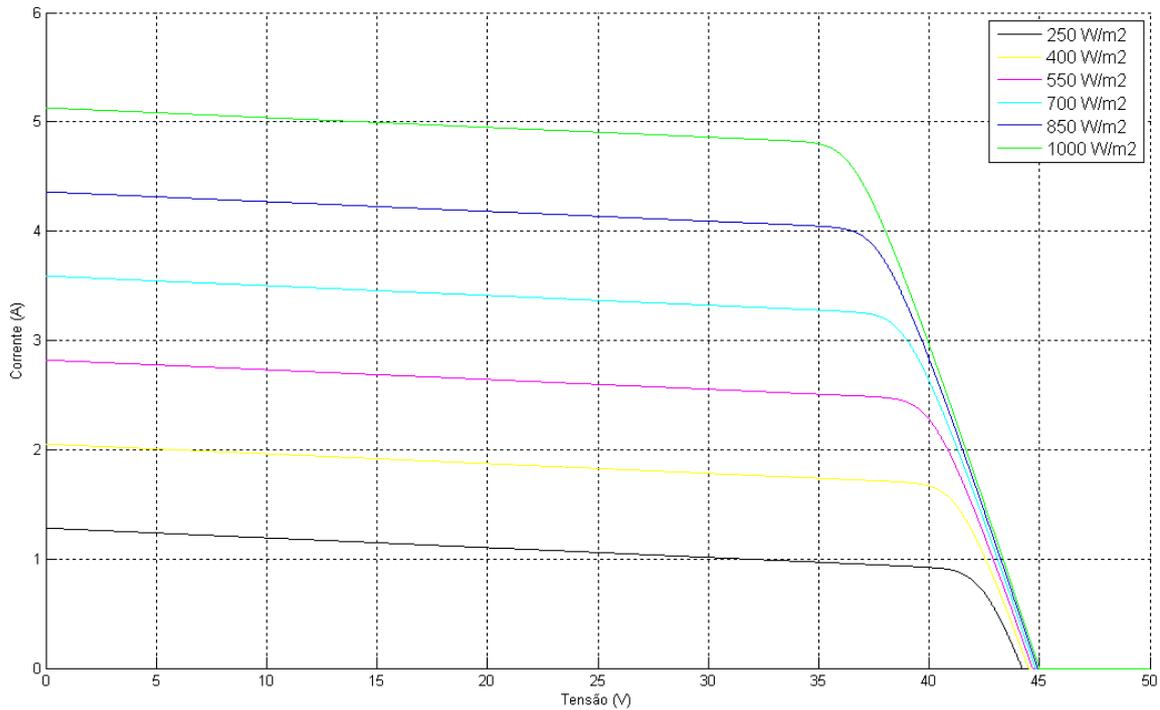


Figura 3.9 – Influência do nível de irradiância no gráfico de tensão x corrente de um painel solar

Dessa forma, se o conversor CC-CC na saída do painel não estiver programado para lidar com essas diferenças de temperatura e radiação solar, o sistema de geração terá uma eficiência mais baixa.

Para evitar que isso aconteça, existem técnicas para determinar esse ponto de máxima potência, chamadas de *Maximum Power Point Tracking*, que serão responsáveis por controlar o chaveamento do conversor, de forma a manter o painel funcionando em seu ponto de máxima potência, mesmo havendo mudanças na temperatura e no nível de radiação solar.

3.2 Conversor Buck

O conversor Buck é um conversor CC-CC utilizado para obter uma tensão contínua ajustável a partir de uma fonte de corrente contínua fixa. Para isso, esse conversor utiliza uma chave, por meio da qual o circuito será ligado e desligado de forma a alterar a tensão média na saída. Esse conversor permite obter apenas uma tensão de saída menor que a tensão de entrada.

A chave que normalmente é utilizada é o Mosfet. Uma das vantagens da utilização do Mosfet sobre o transistor, é o fato da potência suportada pelo Mosfet ser superior à do transistor.

O chaveamento constante do Mosfet gera oscilações em alta frequência no circuito. Para atenuar essas oscilações, é necessário utilizar um filtro composto por um indutor e um

capacitor, que garantem que a tensão chegue constante na carga. Além desse filtro, é necessário utilizar um diodo, que estabelece um caminho de retorno para a corrente do indutor quando a chave do Mosfet está aberta.

As maiores vantagens desse tipo de conversor são o fato de que a tensão de saída não depende da carga instalada no circuito e também a variação linear da tensão de saída com o ciclo de trabalho, desde que a corrente não seja inferior à chamada corrente crítica, o que garante flexibilidade e facilidade no controle da tensão do circuito.

Ao ser utilizado na saída dos painéis fotovoltaicos, o conversor Buck pode aumentar a eficiência na geração de energia. O conversor atua de forma a controlar a tensão de forma que o painel trabalhe sempre em um ponto onde a potência será máxima. Para que isso aconteça, é necessário utilizar uma técnica para calcular esse ponto de máxima potência e controlar a frequência de chaveamento do conversor de forma a ajustar a tensão de forma a trabalhar nessa faixa de máxima potência.

3.3 Rastreamento do máximo ponto de potência (MPPT)

As técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência têm diversas aplicações nas mais diferentes áreas de pesquisas e indústria. Na geração de energia fotovoltaica, esse tipo de técnica é utilizado em um conversor DC-DC de forma com que o painel trabalhe sempre no meu ponto de maior potência. Basicamente, essas técnicas são algoritmos implementados por meio de uma combinação entre um circuito eletrônico de controle e um software. A figura 3.10 representa o funcionamento de um sistema MPPT genérico, onde as variáveis são lidas pelo controlador, que vai gerar um sinal para atuar o conversor DC-DC de forma a obter o máximo de potência do painel.

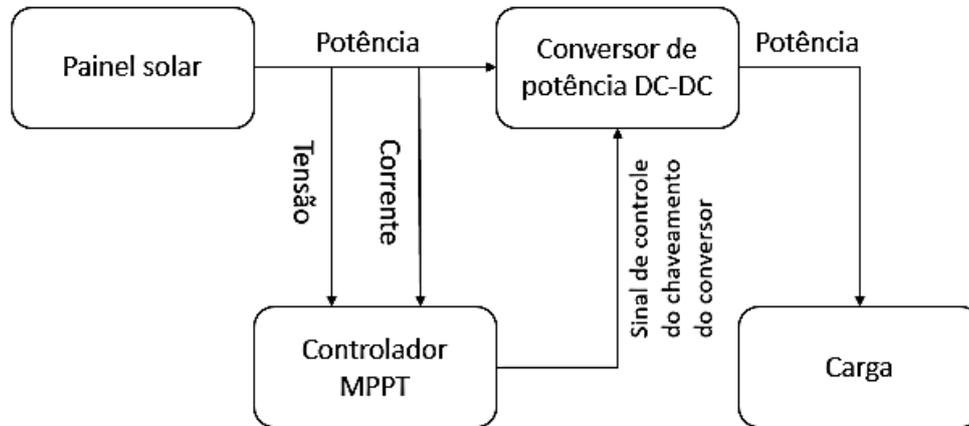


Figura 3.10 – Sistema MPPT genérico

Aqui será apresentada a justificativa para a utilização dessas técnicas, algumas das técnicas mais conhecidas e utilizadas e também uma comparação entre as técnicas.

3.3.1 Justificativa para a utilização das técnicas MPPT

Segundo Vaz (2015), devido ao posicionamento do sol mudar durante ao longo do dia, a geração de energia em um painel durante o dia não é igual à capacidade máxima do painel. Isso faz com que a eficiência na geração de energia seja menor.

A região de máxima potência gerada por um determinado painel é extremamente dependente das condições meteorológicas, como temperatura e radiação. Mudanças nessas condições podem fazer com que o painel não opere na região de máxima potência (RIOS, 2015).

Sendo assim, pode-se utilizar as técnicas MPPT para que o painel funcione em seu ponto de máxima potência, ou seja, gerando o máximo de energia possível em um determinado momento do dia, mesmo havendo alteração nas condições meteorológicas no local.

3.3.2 Técnicas MPPT mais comuns

As técnicas MPPT mais encontradas na bibliografia são Perturbe e Observe (P&O), método da Condutância incremental e Lógica Fuzzy. Cada uma dessas técnicas possui características diferentes, que justificam seu uso. Os principais fatores que levam à escolha de uma determinada técnica são sua precisão, custo computacional e complexidade de implementação do algoritmo de controle.

Uma determinada técnica pode possuir uma precisão muito grande, porém, caso seu algoritmo seja complexo, seu uso pode ser descartado em casos onde a precisão não é tão crítica. De

forma análoga, não se pode utilizar uma técnica MPPT simples em um processo onde é requerida uma alta precisão.

A seguir, as características e o princípio de funcionamento das três técnicas serão analisados.

3.3.2.1 Perturbe e observe (P&O)

Também conhecido por subida da encosta, é um método bastante simples para encontrar o ponto de máxima potência. Para utilizar esse método é feita a leitura dos parâmetros do sistema em um determinado instante. Esses valores são armazenados. Após feita essa leitura, é feita uma perturbação no sistema, como por exemplo, a variação da tensão na saída do painel fotovoltaico.

Após feita a perturbação, uma nova leitura nos parâmetros é executada. Os novos valores são comparados com os valores lidos anteriormente para verificar se houve melhora na saída do sistema. Caso a saída do sistema tenha sido melhor que a anterior, os valores armazenados são atualizados e uma nova perturbação é executada. Caso contrário, o sistema simplesmente executa uma perturbação em sentido contrário, no caso dos painéis, reduzindo a tensão de saída do painel.

Se a perturbação nos dois sentidos forem piores, o estado de atual do painel é o de maior potência, pois a curva do painel só possui um ponto de máxima potência. A figura 3.11 representa a lógica utilizada para a implantação desse algoritmo.

É o método mais simples para se rastrear o ponto de máxima potência de um determinado sistema. Além da simplicidade da implantação do código, é um algoritmo não necessita de uma alta capacidade de processamento do microprocessador, o que faz com que seu gasto energético seja baixo.

Sua maior desvantagem, é que o valor do passo, ou seja, o valor da variação da tensão de saída do painel deve ser bem planejado, pois caso seja muito grande, o painel pode não conseguir atingir o ponto de máxima tensão. Por outro lado, se for muito pequeno, o painel pode demorar muito tempo para atingir o ponto, gerando gastos desnecessários de energia.

No presente trabalho, esse foi o método escolhido para ser utilizado, devido à sua simplicidade de implementação e baixa necessidade de processamento.

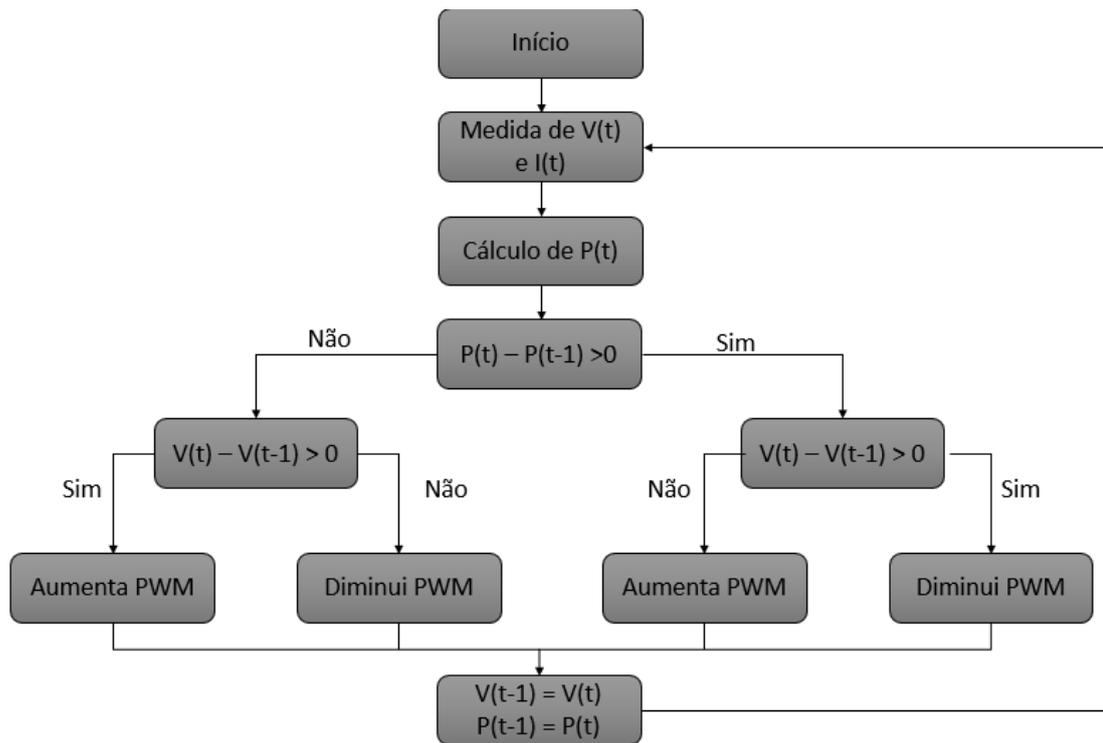


Figura 3.11 – Funcionamento do algoritmo P&O

3.3.2.2 Condutância incremental

Segundo Vaz (2015) o método da condutância incremental é o melhor entre os métodos tradicionais de rastreamento do ponto de máxima potência. Esse método funciona de uma forma semelhante ao método perturbe e observe. Porém, a determinação do tamanho do incremento ou decremento do valor de referência é feita por meio da análise da curva de derivada entre a tensão e a potência. Isso faz com que a resposta dinâmica do sistema tenha um ótimo desempenho e apresente uma pequena oscilação.

O algoritmo funciona da seguinte forma: Os valores de $V(t)$ e $I(t)$ são lidos utilizando de sensores. Por meio da leitura dos valores, as derivadas dV e dI são calculadas, utilizando os valores previamente calculados.

De acordo com o resultado da derivada, é possível dizer se o ponto máximo está longe ou não. Caso o valor da derivada seja alto, quer dizer que o ponto de máximo ainda está longe, pois houve uma grande variação no último passo. Caso o valor da derivada dV e dI sejam zero, isso quer dizer que o sistema se encontra no seu ponto de máximo.

Após a execução do algoritmo, o valor de referência V_{ref} é atualizado e o algoritmo é repetido.

A desvantagem desse algoritmo seria se o sistema possuísse uma grande oscilação. Mas o sistema em questão apresenta uma dinâmica lenta, o que faz com que esse algoritmo apresente um ótimo resultado. Na figura 3.12 é apresentado o funcionamento do algoritmo da condutância incremental.

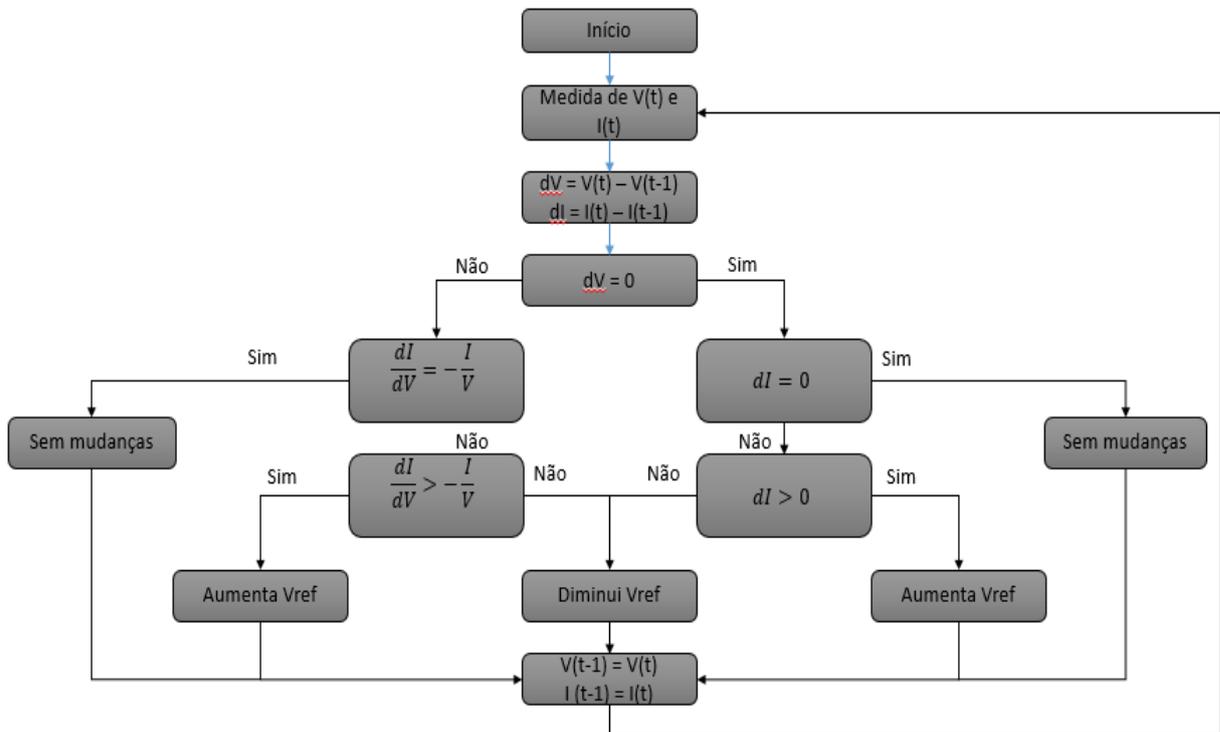


Figura 3.12 – Funcionamento do algoritmo Condutância incremental

3.3.2.3 Lógica Fuzzy

A lógica Fuzzy é um método de controle complexo, que consiste em classificar o grau de pertinência de uma determinada variável de controle em uma classe definida anteriormente. Ao contrário de outros métodos de separação, uma variável não está contida em apenas um grupo, ela pode pertencer a mais de um grupo, sendo que em cada um deles, possuirá um determinado grau de pertinência. Esse processo é chamado de Fuzificação.

Após executar esse processo, a entrada será processada no microcontrolador, que irá comparar o sinal de entrada com uma base de conhecimento previamente carregada. Um sinal de controle será gerado, também na forma fuzzy.

O próximo passo é fazer o processo inverso, ou seja, de acordo com o grau de pertinência da variável de saída gerada pelo microcontrolador em cada grupo, é possível atribuir um valor numérico. Esse valor será o sinal de controle que irá atuar na planta para produzir a saída

desejada. A figura 3.13 mostra o diagrama de blocos de um sistema de controle por lógica Fuzzy.

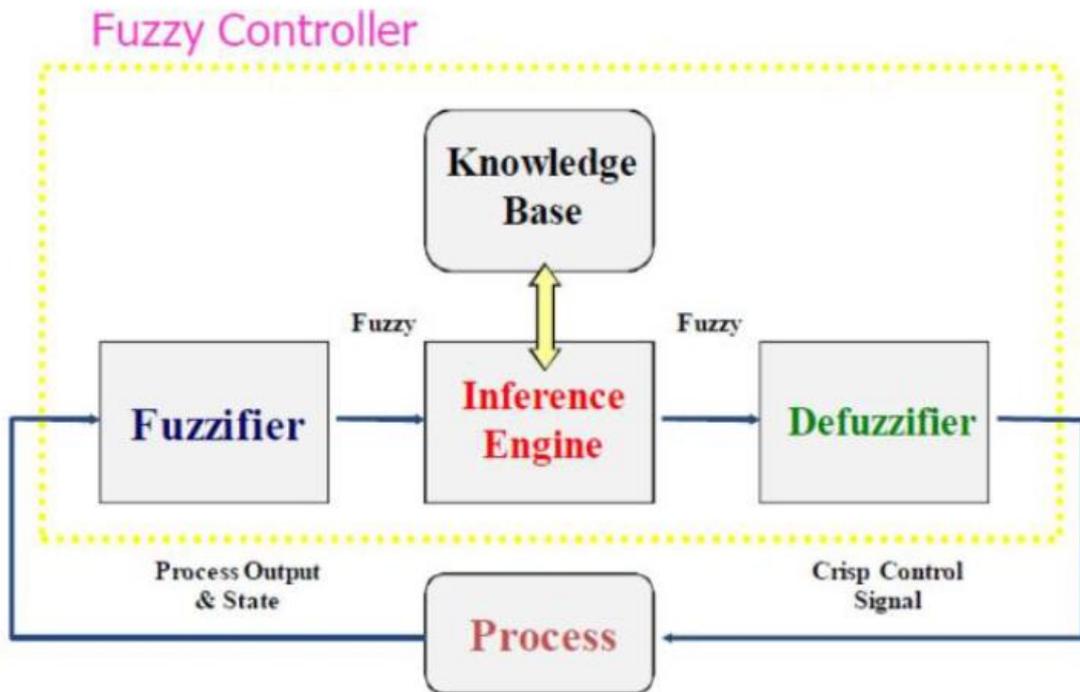


Figura 3.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle por lógica Fuzzy

Fonte Zakariah et al., 2015

A técnica de controle por lógica Fuzzy apresenta um desempenho superior ao método da condutância incremental e também ao método Perturbe e Observe. Porém, como ponto negativo, é um algoritmo complexo e que demanda um maior custo computacional que os outros.

3.3.3 Comparativo entre as técnicas

Em seu estudo, Selman e Mahmood (2016) compararam o desempenho das três técnicas apresentadas na seção anterior utilizando simulações realizadas no software Matlab. Os testes foram realizados sob diversas mudanças na incidência solar e sob diferentes temperaturas, nas quais o desempenho de cada uma das técnicas foi avaliado. Os resultados mostraram que todas as três técnicas possuem um desempenho parecido e conseguem fazer com que o sistema atue no ponto de máxima potência. Os resultados obtidos pelos autores nos testes com diferentes incidências e temperaturas estão representados nas figuras 3.14 e 3.15 respectivamente.

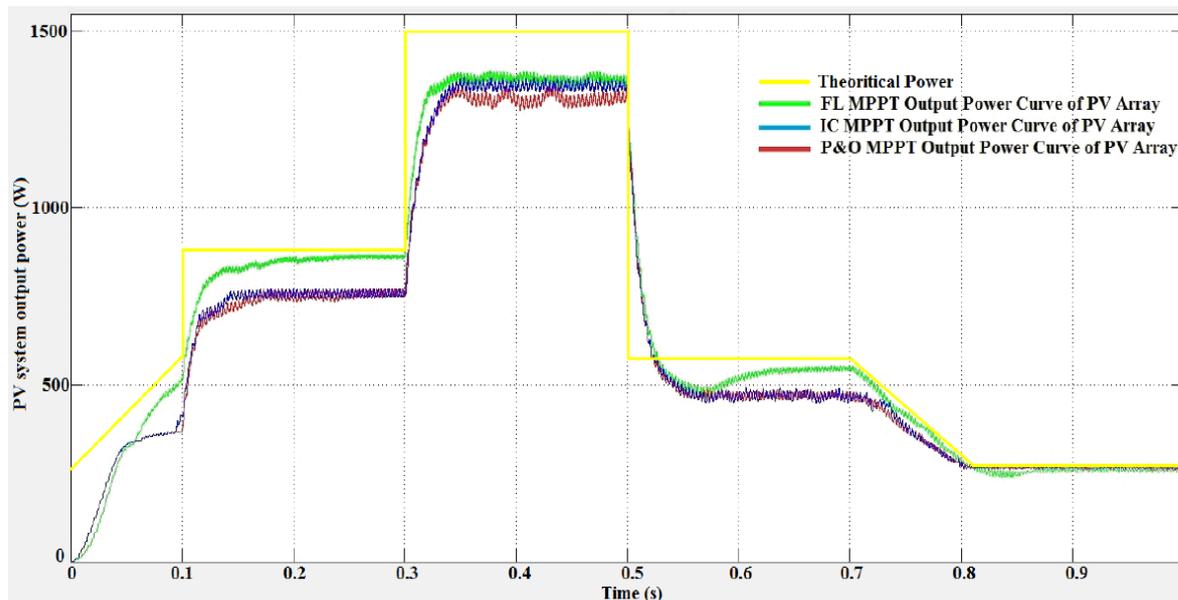


Figura 3.14 – Desempenho das três técnicas sob diferentes níveis de radiação solar

Fonte Selman; Mahmood, 2016

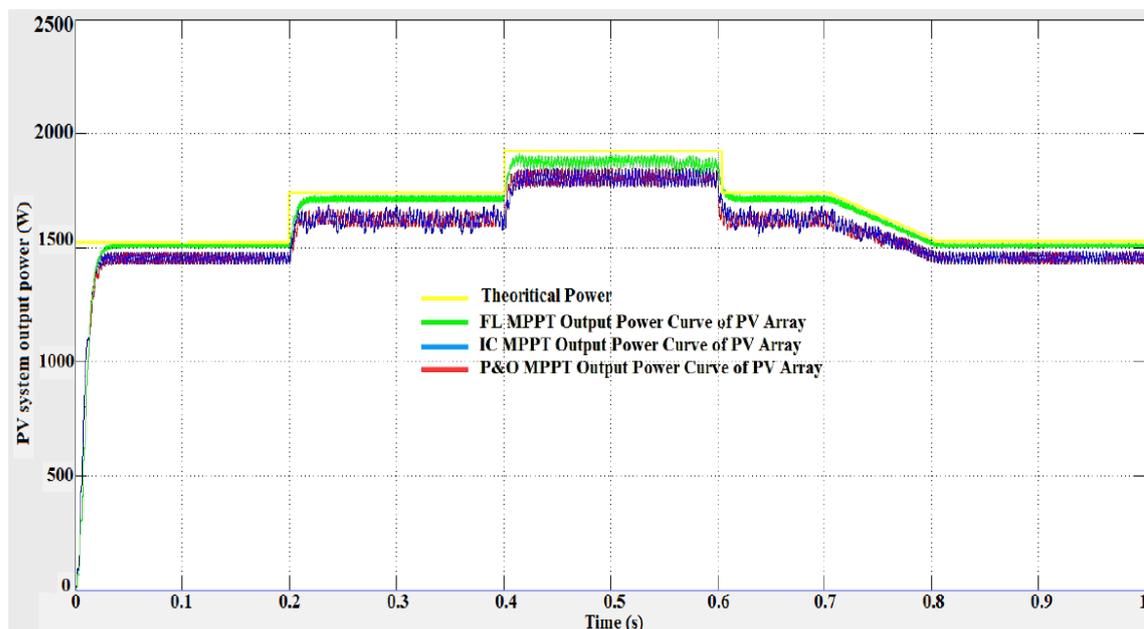


Figura 3.15 – Desempenho das três técnicas sob diferentes temperaturas

Fonte Selman; Mahmood, 2016

Os algoritmos P&O e o da condutância incremental possuem uma eficiência elevada, porém ligeiramente inferior à lógica Fuzzy, sendo que esse último extrai maior potência em todas as condições estudadas pelos autores. Também é possível observar que os três algoritmos apresentam oscilações em torno do ponto de máxima potência do sistema, o que causa uma

pequena perda de energia em relação à potência teórica calculada. A eficiência de cada algoritmo nas diferentes condições de radiação solar pode ser observada na tabela 3.1.

Irradiância ($\frac{W}{m^2}$)		1000	600	400	200
Potência ideal do painel (W)		1500	880	570	272
MPPT – Perturbe e observe	Potência	1300	750	470	260
	Eficiência	87%	85%	83%	96%
MPPT – Condutância incremental	Potência	1350	765	470	260
	Eficiência	90%	87%	83%	96%
MPPT – Lógica Fuzzy	Potência	1365	850	530	260
	Eficiência	91%	95,4%	94%	96%
A eficiência do MPPT é calculada pela seguinte relação: $Eficiência = \frac{potência\ medida}{Potência\ ideal\ do\ painel}$					

Tabela 3-1 – Eficiência de cada algoritmo sob diferentes condições de radiação solar

Fonte Adaptado de Selman; Mamood, 2016

3.4 Microcontrolador Arduino

O Arduino é uma plataforma de hardware e software de código aberto e de fácil utilização. As placas Arduino são capazes de ler determinadas entradas, utilizando sensores, processar essas entradas internamente e gerar determinadas saídas, que podem ser sinais luminosos, mensagens em LCD, comandos de acionamento de outros dispositivos. Para isso, é necessário realizar a montagem de um circuito eletrônico para interligar os sensores e demais componentes ao Arduino e também desenvolver um código, onde estão as instruções que serão interpretadas pelo microcontrolador.

O Arduino se originou na Itália, e surgiu de um projeto de pesquisa no Interaction Design Institute of Ivrea no início da década de 2000. A primeira placa foi apresentada no ano de 2005 e tinha como objetivo ajudar alunos, que não possuíam experiência prévia em eletrônica ou programação de microcontroladores, a desenvolver protótipos funcionais que necessitassem desses conhecimentos.

O Arduino foi o primeiro equipamento de código aberto amplamente distribuído e foi desenvolvido de tal forma a permitir que as pessoas que utilizassem esse hardware pudessem compartilhar seus conhecimentos entre si, por meio da divulgação de códigos-fonte, exemplos, tutoriais e mesmo com ajuda para encontrar erros nos códigos.

Devido a esse fato, segundo seus desenvolvedores, as placas Arduino têm sido o cérebro de milhares de projetos ao redor de todo o mundo. A comunidade usuária do produto disponibiliza uma grande quantidade de conhecimento.

O grande sucesso dessa empresa abriu caminho para que mais pessoas tivessem interesse em se tornar desenvolvedores de tecnologia e esse fato fez com que o mercado se mantivesse em pleno crescimento, especialmente com o surgimento do IOT.

Além disso, outras empresas aproveitaram do crescimento desse mercado para desenvolver novos módulos, tornando a plataforma ainda mais completa. Isso fez com que o número de aplicações utilizando esta plataforma aumentasse ainda mais.

Algumas das principais vantagens para a utilização dessa plataforma são:

- O baixo custo dos equipamentos, tanto da placa em si, quanto dos módulos; a possibilidade de programação em multiplataformas (Windows, Linux, Mac);
- Um ambiente de programação simples e flexível, que facilita o aprendizado de novos usuários, mas sem deixar de oferecer opções avançadas para usuários experientes
- A facilidade de expansão do projeto, tanto por parte de software quanto de hardware devido à modularidade do sistema e ao constante desenvolvimento por parte da empresa e da comunidade.

3.5 Motores de corrente contínua (Motores CC)

O motor de corrente contínua recebe esse nome devido à forma de alimentação utilizada para seu funcionamento. Ele é utilizado nas mais diversas aplicações, desde aplicações simples como brinquedos infantis, até aplicações em trabalhos importantes, como motores utilizados para controlar braços robóticos em indústrias, ou equipamentos médicos para cirurgias, por exemplo.

Um dos fatores para que esse tipo de motor seja amplamente utilizado é a facilidade realizar o controle de velocidade e posição nesse tipo de motor. Para fazer esse controle, basta alterar a tensão de alimentação do motor, enquanto para realizar a mesma coisa em um motor de

corrente alternada, deve-se variar a frequência da alimentação. Portanto, realizar o controle de um motor CC é bem mais simples.

Por causa disso, esse motor é amplamente utilizado em aplicações em indústrias que exigem um controle fino de velocidade.

Como todo sistema físico, a dinâmica do motor é regida por um modelo matemático. A modelagem matemática do motor de corrente contínua será discutida na seção seguinte.

Para que seja possível fazer o controle de velocidade, é necessário fazer a medição da velocidade do motor. Uma das possíveis formas para realizar essa medida, é utilizando um equipamento chamado encoder.

O encoder é um transdutor responsável por fazer a leitura da velocidade de rotação do motor. Ele é acoplado ao eixo do motor e possui um disco perfurado, um emissor de luz e um sensor ótico. Quando o motor gira, o disco do encoder irá girar, fazendo com que o sensor ótico perceba pulsos. Esses pulsos serão contabilizados e o circuito integrado ao encoder fará a conversão do sinal para velocidade. A leitura de velocidade é bastante precisa e tem uma boa resolução, o que permite que o controle de velocidade ou posição do motor seja bastante eficiente.

Neste trabalho, foi utilizado um motor CC para girar o eixo onde está fixado o painel. A alimentação do motor é feita por meio de uma tensão $V_{cc} = 5V$, feita diretamente do painel.

O acoplado a uma engrenagem com um fator de redução $K = 378$, para permitir um controle mais preciso da posição, e também a um encoder, que irá realizar a medição da velocidade do motor. A figura 3.16 mostra o motor com a engrenagem na parte inferior e o encoder na parte superior.



Figura 3.16 – Motor CC com encoder e redução utilizados na montagem

No capítulo seguinte os detalhes da montagem do circuito de leitura e de controle, e o modo como foi feito o controle de posição do motor serão detalhados.

3.5.1 Modelagem matemática do motor CC

Um motor é um equipamento eletromecânico que, quando aplicado uma entrada elétrica em seus terminais, produz uma saída em forma de deslocamento mecânico rotacional. A modelagem matemática pode ser dividida em duas partes: uma parte elétrica e outra mecânica. Os principais parâmetros a serem observados estão representados na figura 3.17.

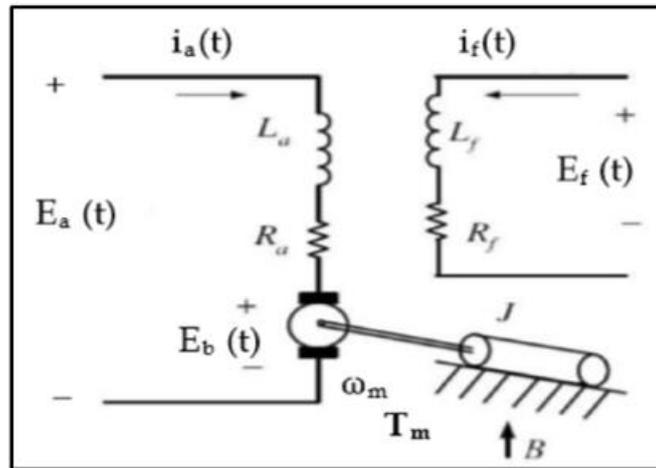


Figura 3.17 – Representação dos principais parâmetros para modelagem do motor

Onde os parâmetros são: E_a tensão de armadura, I_a corrente de armadura e R_a resistência de armadura, E_f tensão de campo, I_f corrente de campo, R_f resistência de campo, L_f indutância de campo, E_g força contra eletromotriz, τ torque mecânico, ω velocidade angular, J momento de inércia da máquina, B coeficiente de atrito e K_g constante de força contra eletromotriz.

A dinâmica do circuito de armadura é regida pela seguinte equação:

$$E_a(t) = R_a * I_a(t) + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b(t)$$

Já a equação do torque é dada por:

$$\tau(t) = J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B\omega_m(t)$$

Mas, como o campo do motor CC em um motor de excitação independente, com ímãs permanentes, é mantido com valor de tensão e corrente constantes, pode-se dizer que:

$$T_m = K_t * I_a(t)$$

E a força contra eletromotriz gerada pelo motor é proporcional à velocidade, e é dada por:

$$E_g = K_g * \omega(t)$$

A posição do motor em um determinado instante de tempo é dada por:

$$\theta(t) = \omega(t) * t$$

Ao aplicar a transformada de Laplace nas equações anteriores, considerando as condições iniciais nulas, são obtidas as seguintes equações:

$$I_a = \frac{E_a(s) - E_g(s)}{L_a s + R_a}$$

$$\omega(s) = \frac{\tau(s)}{J s + B}$$

$$\tau(s) = I_a(s) * K_t$$

$$E_g = K_g * \omega(s)$$

$$\theta(s) = \frac{\omega(s)}{s}$$

Dessa forma, é possível determinar o diagrama de blocos do motor de corrente contínua, representado na figura 3.18, onde o sinal de entrada é a tensão nos terminais do motor v_t e a saída é a posição angular θ do motor.

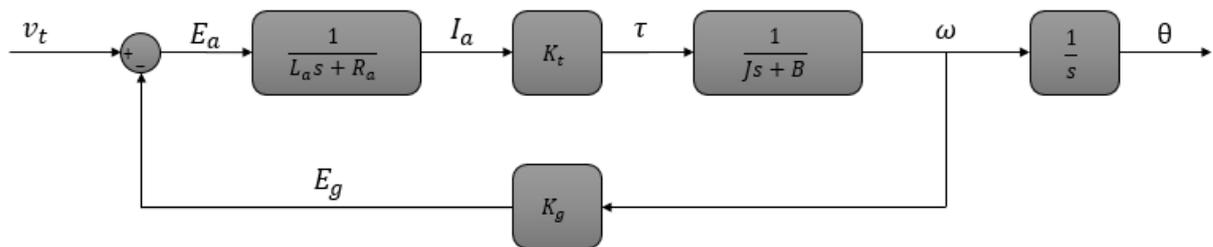


Figura 3.18 – Diagrama de blocos de um motor CC

Para realizar o acionamento e o controle do motor em ambos os sentidos de rotação, é utilizado um circuito conhecido como Ponte H. O funcionamento desse dispositivo será explicado a seguir.

3.5.2 Ponte H

A ponte H é um circuito utilizado na elétrica e eletrônica com o principal objetivo de realizar o acionamento de motores de corrente contínua em ambos os sentidos, permitindo assim que o motor trabalhe nos seus quatro quadrantes de operação, ou seja, trabalhe como motor ou gerador em ambos os sentidos. Além disso, esse dispositivo permite o acionamento de um dispositivo de potência elevada a partir de sinais de comando de baixa potência.

Por meio do uso desse circuito, é possível inverter o valor da tensão de saída de uma fonte de corrente contínua fornecido a uma determinada carga, o que no caso de um motor, altera seu

sentido de giro. Esse circuito recebe este nome devido à representação gráfica do circuito, que lembra uma letra H.

Esse circuito é composto por quatro chaves que são acionadas de forma a mudar a tensão fornecida à carga. Na figura 3.19 é mostrada a representação gráfica desse circuito.

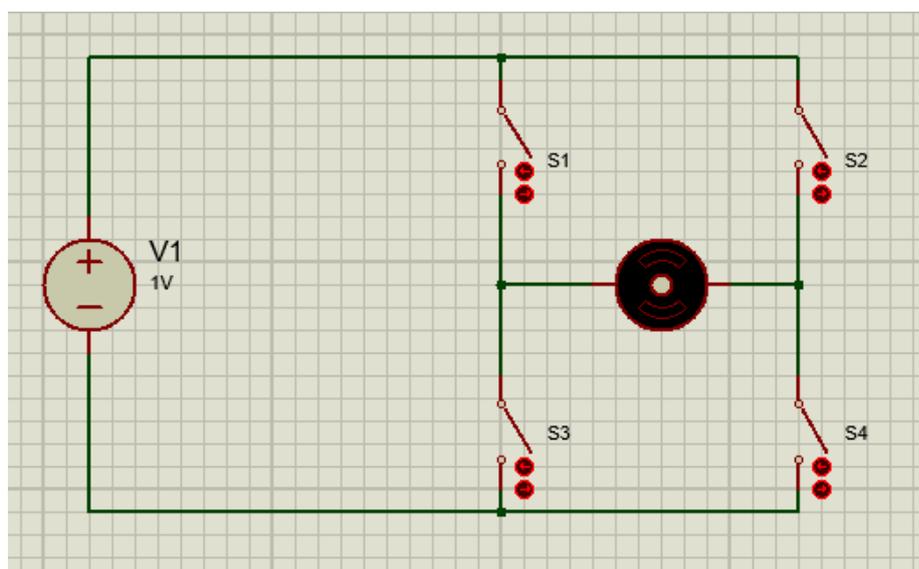


Figura 3.19 – Representação da Ponte H

Para acionar o motor, controla-se o acionamento das chaves S1, S2, S3 e S4. Nesse caso, ao se acionar simultaneamente as chaves S1 e S4, o motor gira em um sentido. Por outro lado, caso as chaves S2 e S3 sejam acionadas, o motor gira em sentido contrário. Além disso, é possível alterar a velocidade com a qual o motor irá girar, controlando a frequência de chaveamento das chaves. Essa frequência de chaveamento pode ser alterada utilizando um acionamento PWM, por exemplo.

Porém, para utilizar esse circuito, é necessário tomar precauções para que as chaves S1 e S3 ou S2 e S4 não sejam acionadas simultaneamente, pois isso causaria um curto circuito na fonte, podendo danificar os equipamentos.

3.6 Controle por alocação de Polos

No presente trabalho, o método escolhido para realizar o controle de posição do motor foi o controle por alocação de polos discretos. Após definir parâmetros de desempenho como o tempo de acomodação t_s e máximo valor de pico M_p , é possível utilizar a equação de segunda ordem para calcular onde os polos da equação devem estar localizados. Dessa forma, as seguintes equações são utilizadas.

$$\zeta = -\frac{\ln(M_p)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(M_p)^2}}$$

$$\omega_n = \frac{4}{t_s * \zeta}$$

$$\omega_d = \omega_n * \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Onde os parâmetros ζ , ω_n e ω_d são conhecidos, respectivamente, por fator de amortecimento, frequência natural e frequência natural amortecida. Ao resolver a equação $G(s)$, encontra-se os valores dos polos pelos quais o lugar das raízes do sistema a ser controlado deve passar, para que os parâmetros de desempenhos desejados sejam atendidos.

Caso o lugar das raízes do sistema não passe por esses polos, é necessário inserir novos polos e zeros no sistema. Existem diversas formas de inserir esses novos polos e zeros. A forma adotada nesse trabalho será apresentada no próximo capítulo.

4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do presente trabalho se deu por meio de pesquisas para obter o referencial teórico necessário para iniciar o desenvolvimento da parte prática do trabalho, seguido pela montagem do circuito eletrônico, desenvolvimento do código do microcontrolador, que é responsável por alterar o ciclo de trabalho do conversor para rastrear o ponto de máxima potência do sistema e também fazer o controle de posição do motor. Cada um dos passos referentes à parte prática será detalhado a seguir.

4.1 Montagem do circuito eletrônico

O circuito eletrônico montado é o responsável por fazer a leitura da corrente e tensão geradas pelo painel e, dessa forma, enviar as informações para o Arduino, que faz o processamento das informações de acordo com o código implementado, e controla o chaveamento do conversor buck, que altera a tensão de saída do painel, de forma a atingir o ponto de máxima potência na saída do sistema.

O modelo de Arduino selecionado para esta montagem foi o Arduino Nano. Essa escolha foi devido ao tamanho compacto do componente. Sendo assim, a montagem final ocupa menos espaço e possui um gasto menor de energia, por ter menos componentes eletrônicos do que outros modelos similares. A figura 4.1 é o modelo Nano utilizado na montagem.

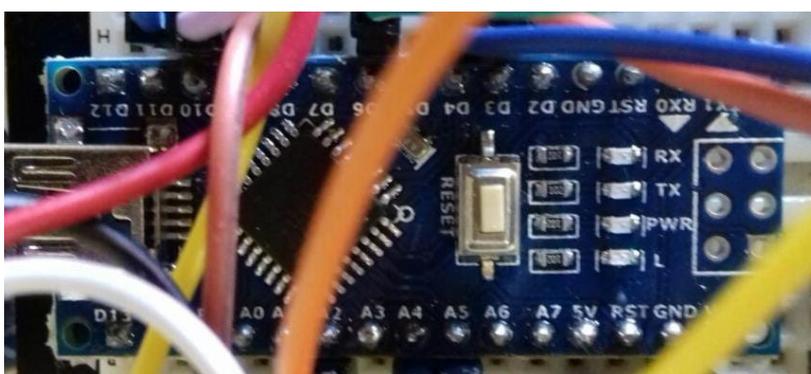


Figura 4.1 – Arduino Nano utilizado na montagem

Para realizar a leitura da tensão e corrente do painel, o componente eletrônico utilizado é o INA219. Este é sensor permite obter uma medida precisa da tensão e corrente produzidas pelo sistema e já fornece os valores de corrente e tensão em Ampères e Volts, respectivamente. Dessa forma, não é preciso fazer a conversão do valor lido na porta analógica do Arduino, que é um valor entre 0 e 1024, para essas unidades. Uma foto do sensor INA219 está na figura 4.2.

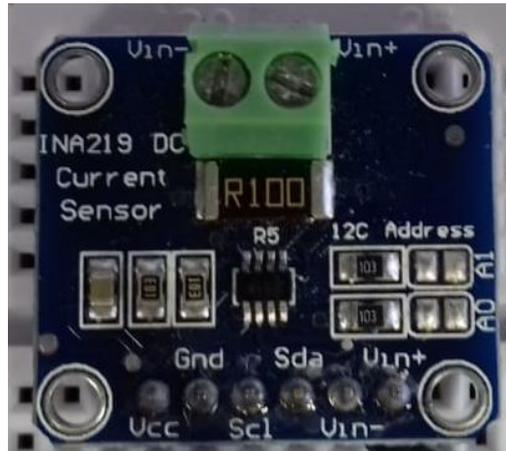


Figura 4.2 – Sensor INA219

O controle da tensão do painel é feito utilizando um conversor Buck, similar ao apresentado no capítulo anterior. Para fazer o acionamento do Mosfet, deve-se aplicar uma tensão de 5V no terminal Gate em relação ao Source. Portanto, como o Mosfet está sendo acionado pela própria tensão de alimentação do painel, a escolha foi por instalar esse componente na saída do sistema, já que dessa forma, o Source estará aterrado e o acionamento do componente pode ser feito utilizando o próprio pino do Arduino.

O diagrama mostrando a montagem do sistema está representado na figura 4.3 e uma foto da montagem na figura 4.4.

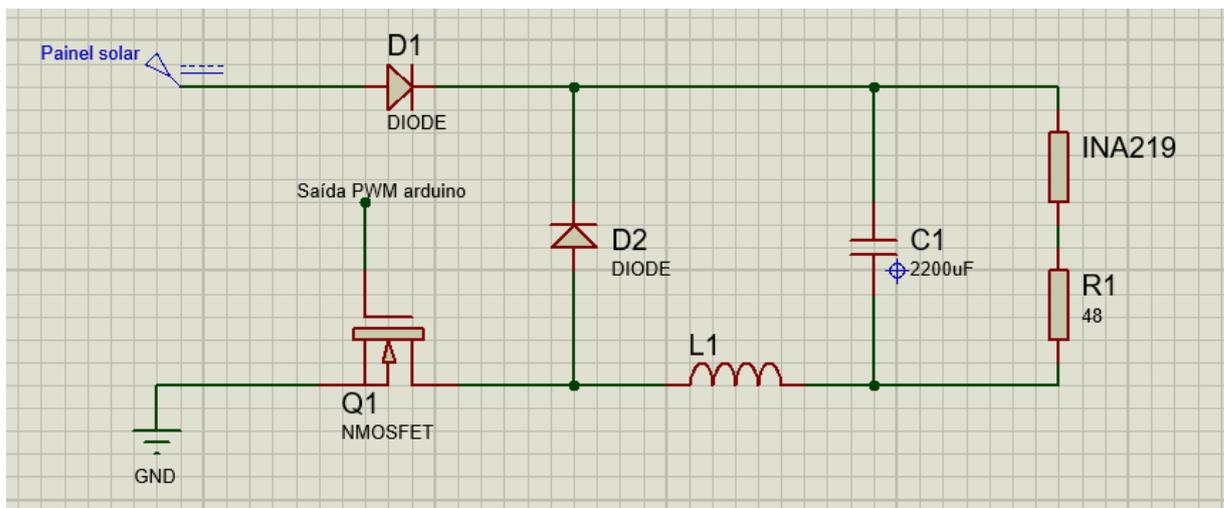


Figura 4.3 – Diagrama do circuito eletrônico feito em *software*

O diodo $D1$ funciona como uma proteção, para evitar que haja transmissão de energia ao painel em determinadas situações, como por exemplo no caso de a carga ser uma bateria e a

tensão gerada pelo painel for menor que a tensão presente na bateria. Tal situação poderia danificar o painel permanentemente.

Já o diodo $D2$ funciona como roda livre, ou seja, mantém o circuito fechado para os casos onde o mosfet $Q1$ não estiver conduzindo. Nessas situações, o capacitor $C1$ e o indutor $L1$ trabalham em conjunto para manter a tensão na carga constante durante um determinado tempo.

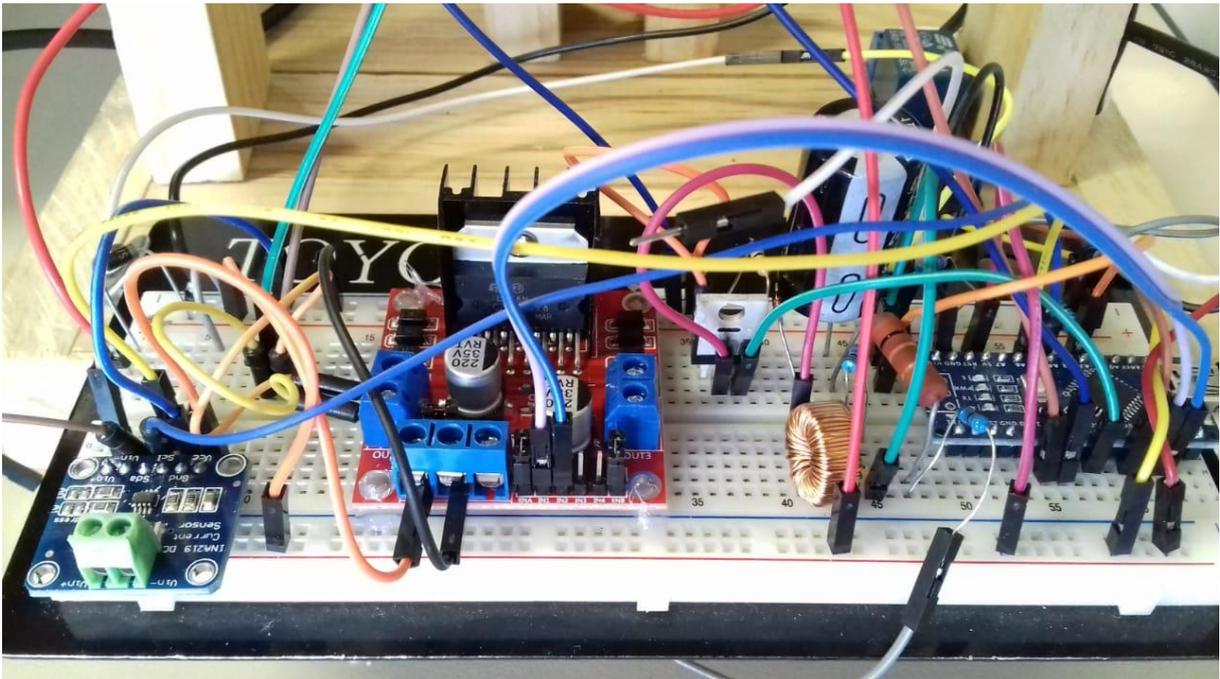


Figura 4.4 – Circuito eletrônico montado

4.2 Desenvolvimento do código do microcontrolador

A programação do microcontrolador pode ser dividida em duas etapas, sendo a primeira a responsável por aplicar as técnicas de controle MPPT e a segunda parte responsável por fazer o controle de posição do motor. Cada uma das partes será executada de forma independente uma da outra e com frequências diferentes. A independência torna o algoritmo mais eficiente, já que o controle do motor e o MPPT não dependem de si para serem executados.

O código responsável pelo MPPT irá rodar em um intervalo $T_{s_1} = 50 \text{ ms}$ e o código responsável por fazer o controle de posição do motor, a um intervalo $T_{s_2} = 5 \text{ ms}$.

4.2.1 Código do MPPT

O algoritmo selecionado para fazer o rastreamento do ponto de máxima potência é o perturbe e observe. A escolha por esse algoritmo é devido à sua simplicidade. Para um sistema simples como o proposto no trabalho, não é necessário projetar uma técnica de controle complexa.

Além disso, um algoritmo simples implica em um menor gasto de processamento. Para justificar o uso do controlador de carga MPPT, esse deve possuir um baixo consumo de energia, já que o objetivo é melhorar a eficiência da produção de energia do sistema fotovoltaico.

Para realizar a leitura dos parâmetros, necessária para utilizar o algoritmo MPPT, os seguintes comandos são utilizados.

```
tensão = ina219.getBusVoltage_V();
corrente = ina219.getCurrent_mA();
```

Após fazer a leitura dos parâmetros necessários, já é possível fazer a implementação do código MPPT seguindo a lógica mostrada no diagrama do capítulo anterior. Primeiramente, o algoritmo fará a comparação do valor da potência atual com a potência anterior. Caso a potência atual seja menor que a potência lida no ciclo anterior, o seguinte código será executado.

```
if (potencia_mW < potencia_anterior){
    if (tensao > tensao_anterior){
        D = D +2;
        if (D > 255){ //Limita o valor do ciclo de trabalho
            D = 255; } }
    if (tensao < tensao_anterior) {
        D = D - 2;
        if (D < 2){ //Limite inferior do valor do ciclo de trabalho
            D = 2; } } }
```

Após comparar a potência, o algoritmo faz a comparação entre o valor de tensão lido neste ciclo e o valor da tensão do ciclo anterior. Caso a tensão lida for maior que a tensão anterior, o algoritmo irá incrementar o valor da variável D, que é a variável que controla o valor do PWM. Caso contrário, o valor de D será decrescido.

Porém é necessário fazer uma limitação para os valores que D pode assumir, já que o algoritmo PWM do Arduino só permite variáveis entre 0 e 255.

Caso a potência lida seja maior que a potência anterior, as seguintes linhas de código serão executadas.

```
if (potencia_mW > potencia_anterior) {  
    if (tensao < tensao_anterior) {  
        D = D +2;  
        if (D > 255){  
            D = 255;    }    }  
    if ( tensao > tensao_anterior) {  
        D = D - 2;  
        if (D < 2){ //evita do ciclo de trabalho ficar superior ao limite  
            D = 2;    }    }    }  
}
```

De forma análoga à anterior, após fazer a comparação entre a potência, o algoritmo compara os valores lidos de tensão. Porém, a lógica nesse caso é invertida. Caso a tensão lida seja menor que a anterior, o valor de D é acrescido e caso seja maior que a anterior, decrescido.

Feita a atualização da variável D, é preciso enviar o novo valor de D para o PWM do Arduino, que irá alterar o ciclo de trabalho do Mosfet, alterando assim a tensão de saída do sistema, e também atualizar os valores das variáveis anteriores de potência e tensão, para serem utilizadas no ciclo seguinte. Isso é feito nas seguintes linhas de código.

```

analogWrite(PINO_MOSFET,D); //envia o valor atualizado de D

potencia_anterior = potencia_mW; //atualiza do valor de potencia_anterior

tensao_anterior = tensao; //atualiza o valor da tensao_anterior

```

4.2.2 Controle de posição do motor

Para fazer o controle de posição do motor, o controlador escolhido foi o controlador discreto por alocação de polos.

O código é dividido em duas seções. A primeira parte é feita por meio de um software de simulação numérica, onde são feitos os cálculos dos parâmetros do controlador de forma a atingir os requisitos desejados e garantir a estabilidade do sistema.

O primeiro passo a ser executado é inserir os parâmetros do motor, que foram obtidos previamente. Além dos parâmetros do motor, também são definidos o tempo de amostragem T e a constante de redução da engrenagem, K_{eng} .

$$K_e = .0253$$

$$K_t = K_e$$

$$R_a = 12$$

$$L_a = 0.00216$$

$$J_m = 1.3e - 6$$

$$B_m = 4.175e - 6$$

$$K_{eng} = 378$$

$$T = 0.005$$

Depois de inserir as constantes, o próximo passo é definir as equações da parte elétrica, chamada nesse caso de G_e , e a equação mecânica, chamada G_m . Com isso é possível definir a equação em malha fechada da velocidade do motor, chamada G_{v1} , que já foi simplificada, ficando na realização mínima.

$$G_e = \frac{1}{(La * s + Ra)} = \frac{1}{0,00216s + 12}$$

$$G_m = \frac{1}{J_m * s + B_m} = \frac{1}{1,3 * 10^{-6}s + 4,175 * 10^{-6}}$$

$$G_{v1} = \frac{G_m * K_t * G_e}{1 + K_e * G_m * K_t * G_e}$$

$$G_{v1} = \frac{9.01 * 10^6}{s^2 + 5559 s + 2.458 * 10^5}$$

O controlador do sistema é do tipo discreto, por isso é interessante de, antes de fazer o controle discretizar também a planta. Para discretizar sistemas, utiliza-se algum circuito segurador, de ordem n . No presente trabalho, a planta foi discretizada utilizando um segurador de ordem zero, que possui a seguinte equação.

$$G_{h0} = \frac{1 - e^{-sT}}{s}$$

Dessa forma, o novo sistema será: $G = G_{v1} * G_{h0}$. Após realizar a multiplicação, é aplicada a transformada Z no sistema G para obter a função de transferência discreta do sistema., chamado de G_d .

$$G_d = \frac{0.0177 z^2 + 0.01887 z + 4.335 * 10^{-5}}{z^3 - 1.8 z^2 + 0.8002 z - 8.497 * 10^{-13}}$$

Com isso, é possível construir o lugar das raízes desse sistema, que indica a localização dos polos e zeros do sistema não controlado. O lugar das raízes é representado na figura 4.5.

Depois de obter o lugar das raízes do sistema, são definidos os parâmetros de desempenho desejados no sistema, que são o tempo de acomodamento t_s e máximo valor de pico M_p . por meio desses parâmetros, obtém-se os valores das constantes ζ, ω_n e ω_d , utilizando as seguintes equações.

$$t_s = 0.05$$

$$M_p = 0.1$$

$$\zeta = -\frac{\ln(M_p)}{\sqrt{(\pi^2 + \ln(M_p))^2}} = 0.5912$$

$$\omega_n = \frac{4}{t_s * \zeta} = 135.3283$$

$$\omega_d = \omega_n * \sqrt{1 - \zeta^2} = 109.1501$$

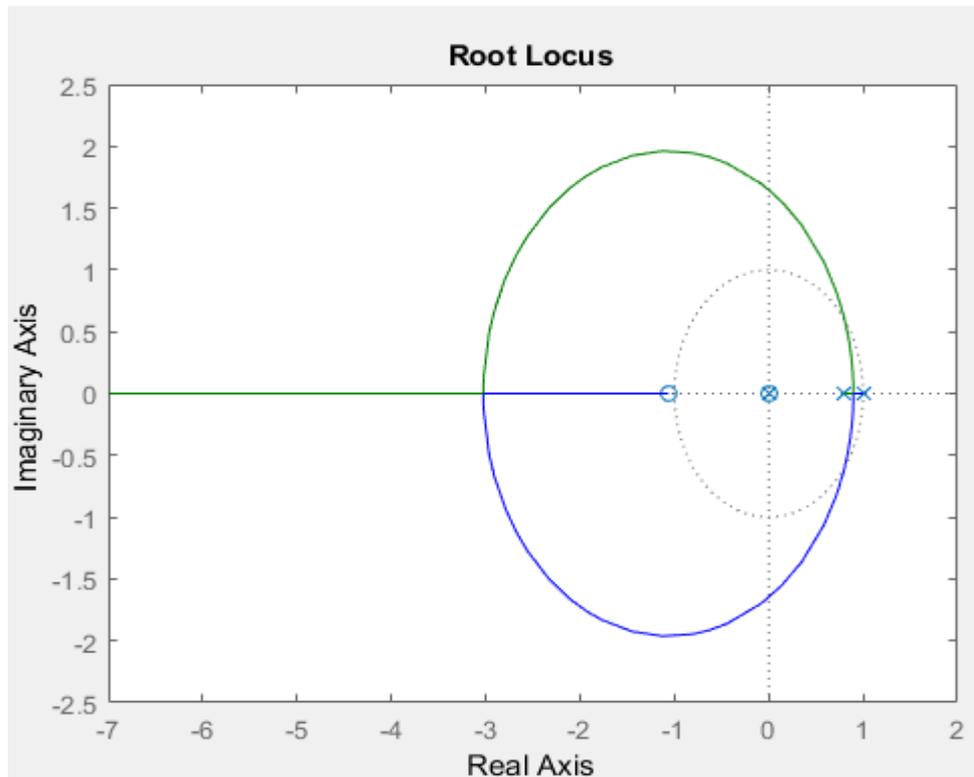


Figura 4.5 – Lugar das raízes do sistema discreto não controlado

Fonte Autor

Com os parâmetros ζ , ω_n e ω_d definidos, é possível determinar a localização dos polos que vão garantir o desempenho desejado. Para fazer essa localização, as seguintes equações são utilizadas.

$$mod = e^{-\zeta * \omega_n * T} = 0,6703$$

$$fase = \omega_d * T = 0.5458$$

$$p_z = mod * (\cos(fase) + j * \sin(fase)) = 0.5729 \pm 0.3479i$$

É possível observar pelo lugar das raízes que o sistema não passa por esse polo. Portanto, é necessário adicionar novos zeros e polos de forma a modificar o lugar das raízes do sistema para que este passe pelos polos p_z .

O último passo para fazer o controle é definir os polos e zeros que serão introduzidos pelo controlador de forma a fazer com que o sistema siga dos parâmetros desejados. Como a planta do sistema já possui um integrador, que anula o erro em regime permanente, foram

adicionados um polo e um zero no sistema. Assim, o controlador discreto G_c é da seguinte forma.

$$G_c = \frac{z - 0.8002}{z - 0.45}$$

O lugar das raízes do sistema após a inserção do controlador G_c está representado na figura 4.6. Analisando a figura, percebe-se que o lugar das raízes passa pelos polos p_z calculados anteriormente, que garantem que os parâmetros de desempenho são atendidos.

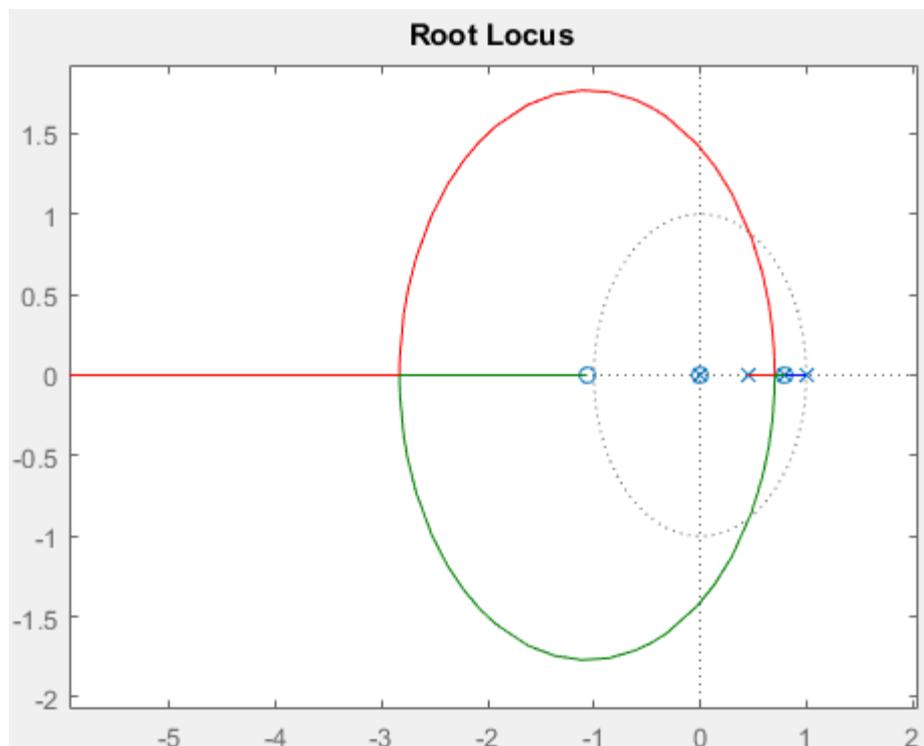


Figura 4.6 – Lugar das raízes do sistema com o controlador

Fonte Autor

Após obter o gráfico do lugar das raízes, determina-se o ganho necessário para que o sistema tenha exatamente os polos calculados. Nesse caso, o valor do ganho é de $K = 5,2$.

Após executar essa seção, já com os parâmetros do controlador definidos, o próximo passo a ser executado é a programação no microcontrolador. Nessa programação, o controlador projetado recebe os dados do sistema, aplica o ganho calculado e envia os dados para o motor, que é controlado, obtendo assim a resposta desejada.

É necessário executar essa parte do código com a mesma frequência com a qual o controlador foi projetado, ou seja, a cada 5 ms. Para assegurar que o código seja executado nesse tempo, a função *runEvery(t)* é utilizada.

Para fazer o controle, é necessário verificar a posição atual do sistema. Para realizar essa leitura, é utilizado o encoder. Sabendo a quantidade de pulsos, é possível saber a posição exata do motor, apenas utilizando uma conversão de pulsos para radianos, o que é feito na seguinte linha de código.

```
y1 = _EncoderTicks / ENC_RES * 2 * PI;
```

Após fazer a leitura da posição do motor, esse valor é comparado com a referência desejada, gerando o sinal de erro. Para evitar que o motor chegue a posições onde a energia gerada não é suficiente para movimentá-lo, o valor da referência é limitado ao a variável *ANGMAX*. O valor da variável de erro será passado ao controlador para gerar o sinal de controle, chamado de *u*.

```
if(ref>ANGMAX)
ref = ANGMAX;
if(ref<-ANGMAX)
ref = -ANGMAX;
e = (ref * D2R * K_ENG) - y1;
u = 5.2 * e -4.16 * e_ant + 0.45 * u;
```

Após esse cálculo, a variável de erro anterior *e_ant* é atualizada, para que na próxima iteração ela seja utilizada. Como o motor está ligado diretamente no painel, o valor de *u* é saturado ao valor da leitura atual de tensão. Somente nesse momento a função que fará o acionamento do motor é chamada e o valor. A função só irá funcionar caso a variável *LIGAMOTOR*, que indica se o motor pode ser ligado, for positiva.

```
e_ant = e;  
  
if (u > VMAX)  
    u = VMAX;  
  
if (u < -VMAX)  
    u = -VMAX
```

Dessa forma o motor segue a referência desejada, que é informada por meio de um valor na porta serial.

5 RESULTADOS

Para comprovar a eficiência do sistema desenvolvido, foram realizados testes em laboratório, utilizando uma lâmpada halógena para obter uma condição uniforme durante as realizações dos testes.

Os testes foram divididos em quatro partes. Em um primeiro momento, é realizado um teste para verificar a eficiência da utilização da técnica MPPT em um sistema sem distúrbios. Os resultados do sistema com MPPT são comparados com dois sistemas onde o chaveamento do Mosfet do conversor é fixo.

No teste seguinte, são introduzidos dois distúrbios no sistema, sendo o primeiro feito por meio da rotação do painel durante alguns momentos, o que faz com que a carga acionada pelo painel fique diferente ao longo do tempo; e o segundo distúrbio consiste em cobrir uma parte do painel em alguns momentos. Dessa forma a incidência de luz no painel será diferente.

O terceiro teste tem como objetivo testar a eficiência do sistema seguidor solar. Por último, também é feito um teste para verificar a eficiência do conversor buck, por meio da comparação da medida da potência de saída do painel e da potência na saída do conversor.

5.1 Testes da eficiência do MPPT sem distúrbio

Nesse teste, é possível avaliar a eficiência da implementação do algoritmo MPPT. Para isso, uma variável foi implementada no código do controlador, tendo como função armazenar o valor da leitura da potência num determinado instante de tempo. A cada repetição, esse valor é incrementado. Esse processo é repetido durante 5 minutos e o resultado analisado.

O teste foi dividido em três etapas. Nos dois primeiros o chaveamento PWM foi feito utilizando um valor fixo, ou seja, não há atuação do MPPT. No primeiro teste, o valor do PWM foi fixado em $D = 127$ e no segundo o valor foi $D = 255$.

No primeiro teste, com o PWM utilizando 50% do valor máximo, a energia total gerada foi de 109,1Ws. Já no segundo, com o PWM em 100%, o total de energia gerado foi de 152Ws.

Para realizar a última parte do teste, o código passou a funcionar com o MPPT. A energia total gerada nessa última etapa foi de aproximadamente 157Ws. O resultado do teste pode ser observado na figura 5.1. Na figura 5.2 está demonstrado o ciclo de trabalho do PWM durante o teste com MPPT.

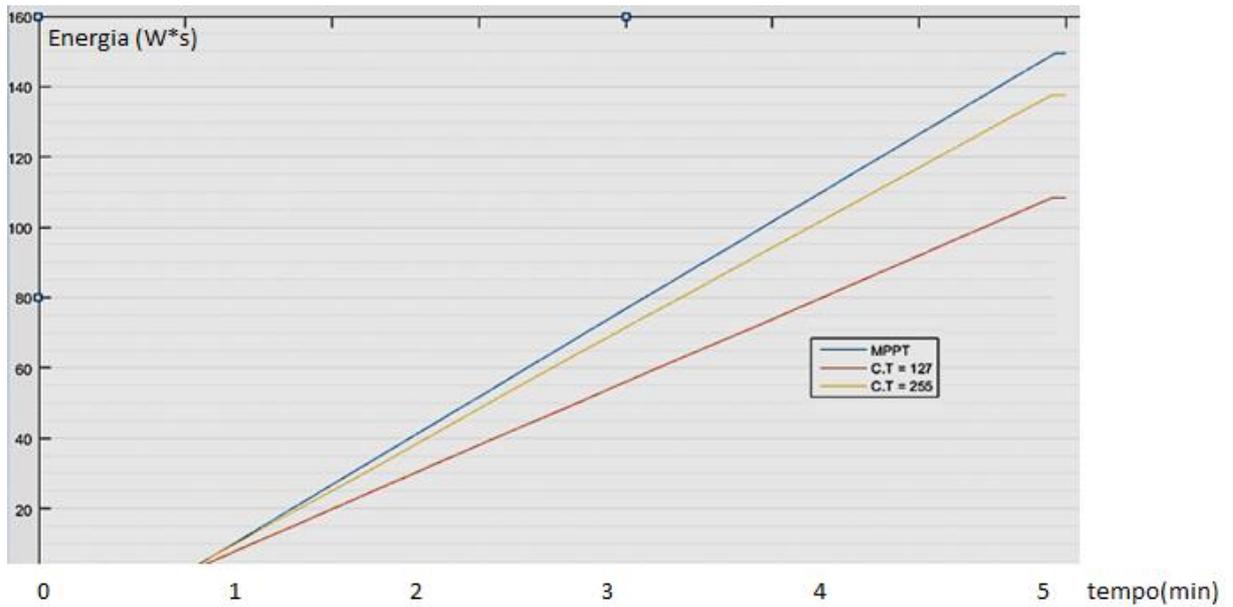


Figura 5.1 – Comparação entre a energia (em Ws) gerada pelos três sistemas ao longo dos 5 minutos de teste

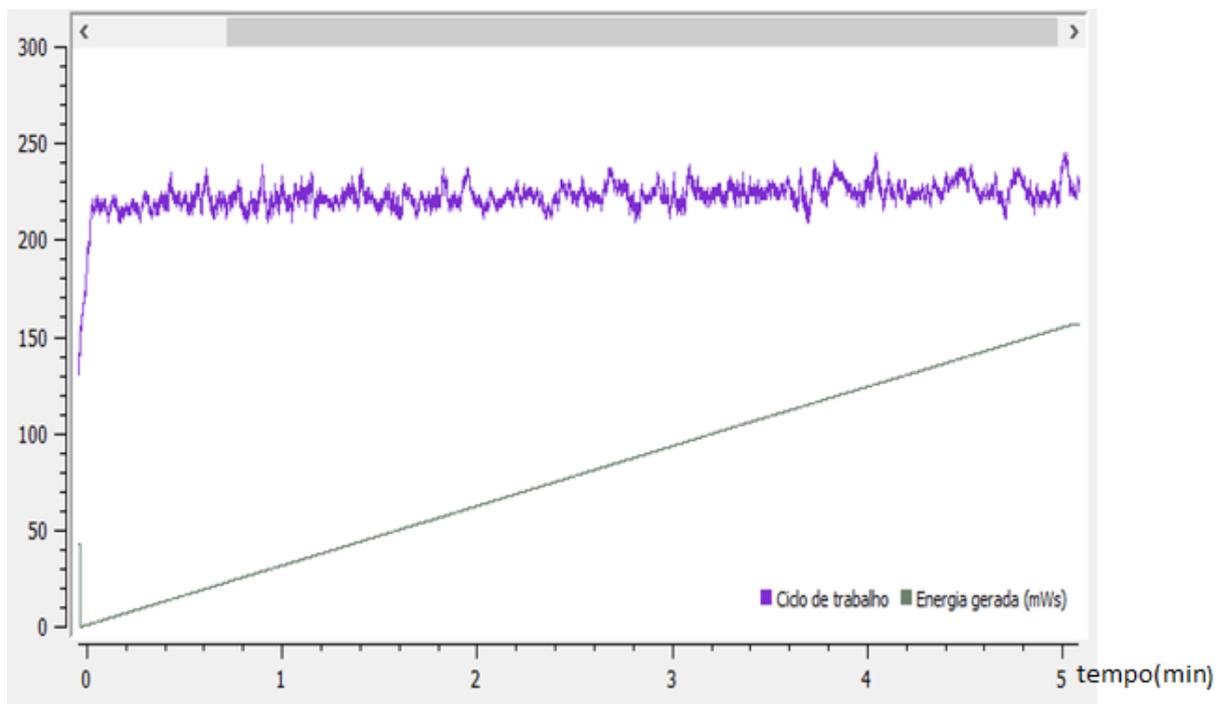


Figura 5.2 – Energia gerada e ciclo de trabalho, durante o teste com o MPPT

Com esse teste, foi possível perceber que utilizando o MPPT apenas um pequeno aumento na produção de energia. Um dos motivos para que esse aumento fosse pequeno é que o ciclo de

trabalho médio foi de quase 100%. Isso quer dizer que, para uma carga fixa e sem distúrbios no sistema, pode-se definir um valor fixo para o chaveamento.

5.2 Testes da eficiência do MPPT com distúrbio

No teste anterior é possível observar que, em um sistema estável e sem distúrbios, o MPPT apresenta apenas uma pequena vantagem sobre um sistema com chaveamento fixo. Por isso, nesse teste as condições de ambiente serão alteradas de duas maneiras: Por meio do acionamento do motor, o que simula a inserção de novas cargas no sistema e também pela cobertura parcial dos painéis, o que faz com que a incidência seja menor durante um determinado instante de tempo, simulando o encobrimento dos painéis por nuvens.

Esse teste se aproxima mais das condições reais de utilização de um painel, pois durante um dia, a carga alimentada pelo painel não é necessariamente fixa e as condições do ambiente não são constantes. Na tabela 5.1 estão demonstradas as mudanças de condições feitas de acordo com o tempo de simulação.

Tempo Inicial (s)	Tempo final (s)	Ângulo Painel	Cobertura
0	30	0	-
30	60	0	Superior
60	90	15	-
90	120	15	-
120	150	25	-
150	180	0	-
180	210	0	Inferior
210	240	-15	-
240	270	-15	Inferior
270	300	-25	-

Tabela 5-1 – Metodologia utilizada para realização dos testes

Da mesma forma que na seção anterior, foram realizados dois testes sem a utilização do algoritmo MPPT, sendo que no primeiro teste o valor do chaveamento é fixo em 50% e no segundo o valor chaveamento foi fixado em 100%.

A energia total gerada em 5 minutos para o teste com o chaveamento em 50% foi de 99 Ws. Já no teste com o chaveamento em 100%, o total de energia gerado no mesmo intervalo de

tempo foi de 105 Ws. É possível perceber que a diferença entre os valores de energia gerados nos dois testes foi menor. Isso aconteceu porque o ponto de máxima potência do sistema se afastou do ponto de chaveamento em 100% e se aproximou do ponto de chaveamento em 50%.

Durante a realização do teste com o ciclo de trabalho em 100%, foi possível observar que, ao tentar girar o motor, este permanecia imóvel. Isso ocorreu porque, devido à mudança da carga, a curva característica do painel mudou. Com isso, a potência gerada pelo painel não foi suficiente para fazer com que o motor girasse.

Por fim, é realizado o teste utilizando o algoritmo MPPT. O gráfico da potência gerada pelos sistemas em cada etapa do teste está representado na figura 5.3.

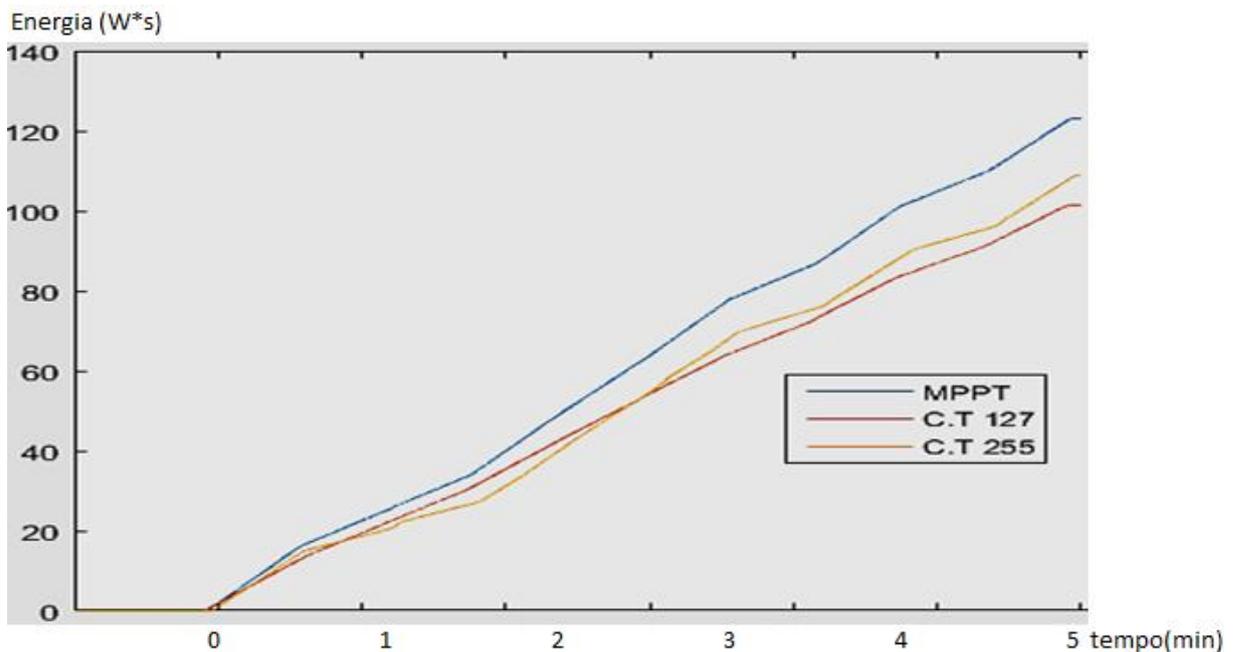


Figura 5.3 – Comparação entre a energia gerada pelos três sistemas ao longo do teste

O total de energia gerado nessa última etapa do teste foi de 128 Ws. Na figura 5.4 é possível observar a variação do ponto de máxima potência do sistema. Ao mudar a carga a ser ligada no circuito, nesse caso ao fazer a ligação do motor, e também ao diminuir a incidência de luz no painel, o ponto de máxima potência do sistema muda, logo o algoritmo tem que alterar o chaveamento do conversor de forma a continuar gerando o máximo de potência.

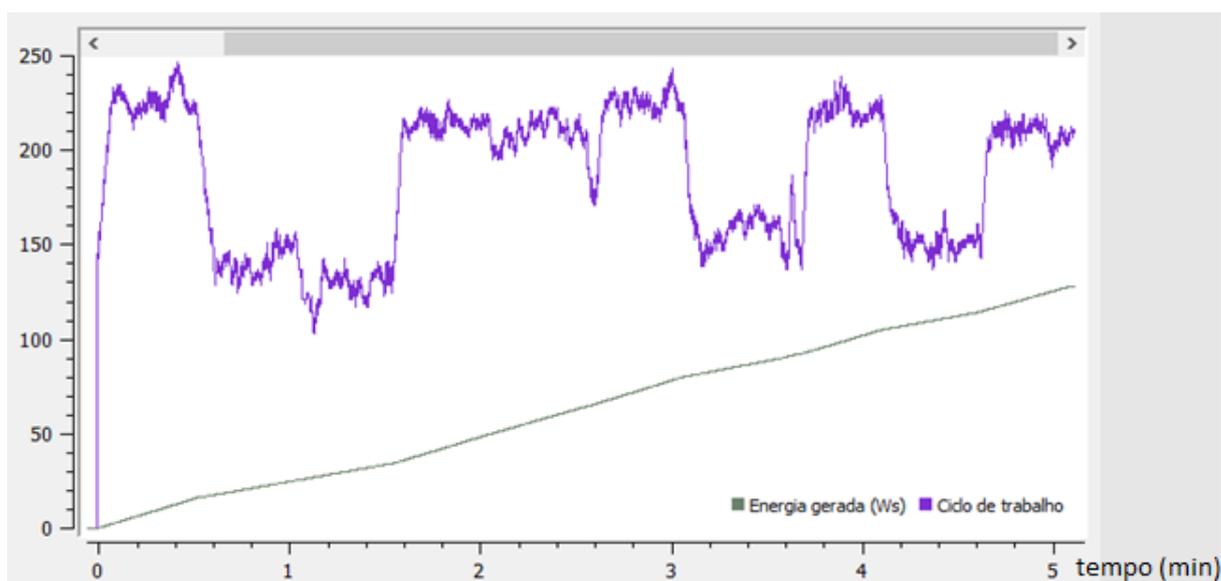


Figura 5.4 – Energia gerada, em Ws, com o MPPT em funcionamento

Com esse teste é possível concluir que, para condições de radiação e cargas que não sejam constantes, o controlador de carga MPPT apresenta um desempenho superior em relação aos que mantém o chaveamento do PWM em um valor fixo. O aumento na eficiência foi de 21,9% em relação ao teste com chaveamento em 100% e de 29,9% em relação ao chaveamento em 50%.

Portanto, aplicar a técnica MPPT em um controlador de carga de um sistema real faz com que a eficiência na geração de energia fotovoltaica seja maior, já que as condições climáticas e as cargas acionadas pelos painéis sempre se alteram.

5.3 Testes da eficiência do seguidor solar

Ao longo do dia, o sol se movimenta em relação ao painel. Para simular isso em laboratório, é realizado um teste dividido em duas etapas. Na primeira etapa, o painel permanece fixo, com a lâmpada apontando diretamente para ele. Essa etapa do teste simula o caso em que o painel solar segue o sol ao longo do dia, pois com o seguidor solar ligado, o painel vai sempre seguir a referência do sol, fazendo com que este aponte diretamente para o painel durante todo o dia. Em 5 minutos de teste, o total de energia gerado foi 146,8 Ws. Na figura 5.5 observa-se a potência disponível para a carga ao longo do teste.

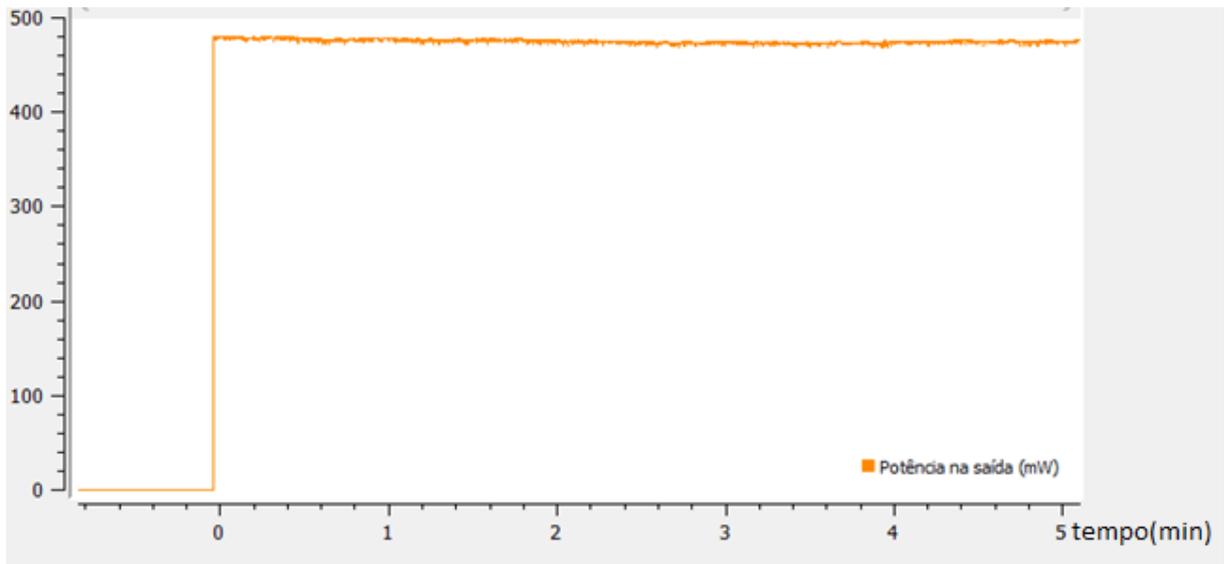


Figura 5.5 – Potência na saída do conversor durante o teste com o painel seguindo o sol

Por outro lado, na segunda etapa, o painel é girado alguns graus a cada intervalo de tempo pré-definido, o que seria o caso de um painel fixo, onde o sol só fica apontado diretamente para o painel durante o meio dia.

Para realizar o segundo teste, o motor é girado 8 graus a cada 30 segundos, iniciando do posição $\theta = -40^\circ$ e finalizando na posição $\theta = 40^\circ$.

Analisando o gráfico da figura 5.6, é possível observar a energia disponível na saída do painel. O total de energia gerado durante essa segunda etapa dos testes é de 127,9 Ws. Também é interessante notar a variação da potência gerada durante o dia, tanto na entrada quanto na saída do conversor. Na figura 5.7 é possível comparar o desempenho dos dois painéis.

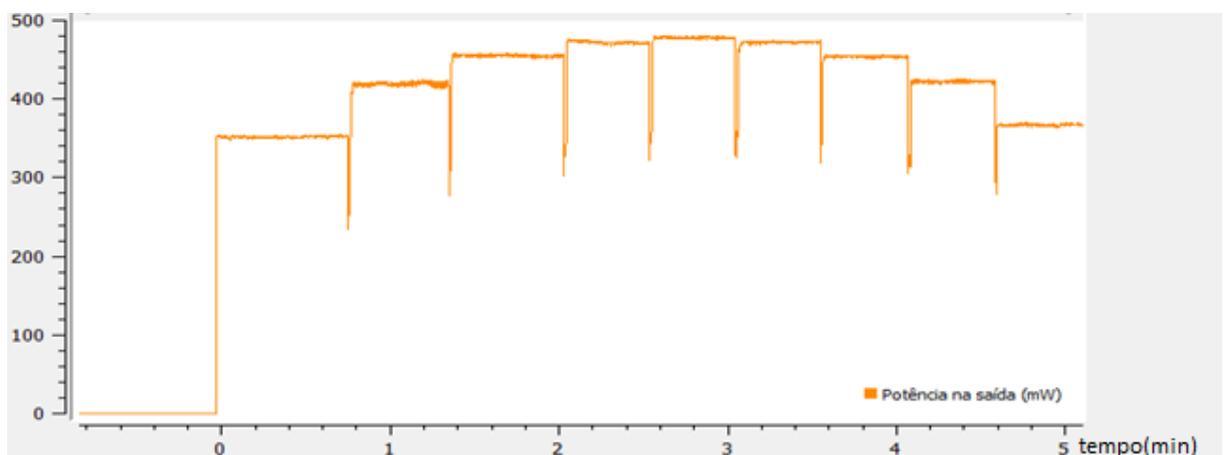


Figura 5.6 – Potência na saída em Watts do conversor ao longo dos 5 minutos de teste

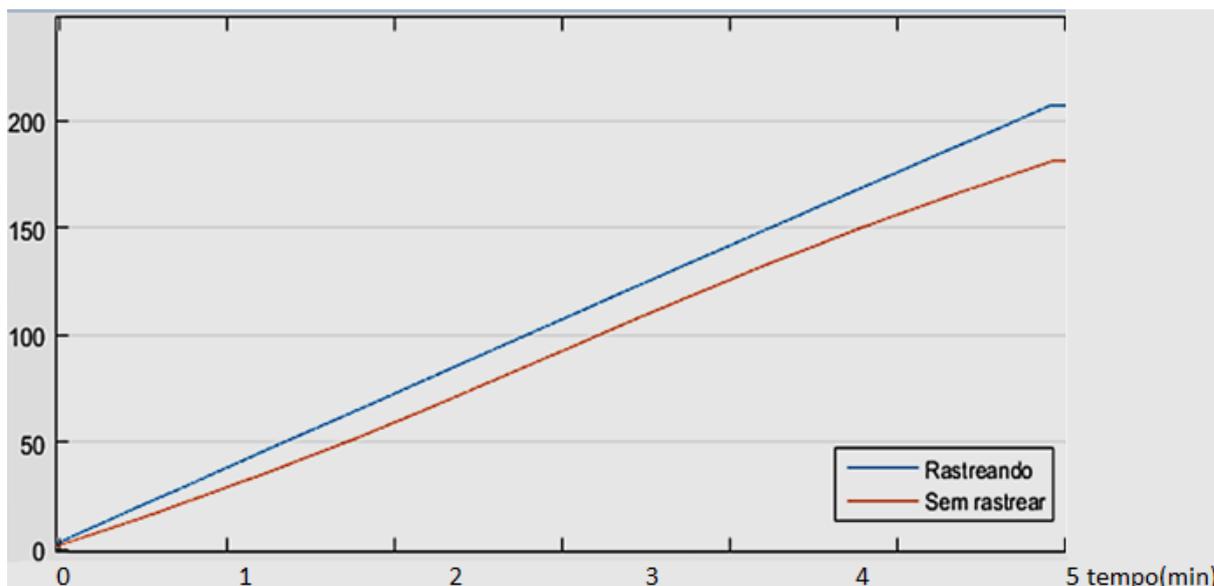


Figura 5.7 – Comparativo entre o teste rastreando o sol e sem rastrear

Analisando o resultado as duas partes do teste, percebe-se que há um ganho em utilizar o seguidor solar no sistema. No caso da simulação realizada, o ganho foi de 14,77%.

Porém, por mais que o ganho não seja tão elevado, há outro fator a ser levado em consideração, que é a variação da potência disponível para a carga. O sistema que segue o sol disponibiliza uma potência bem uniforme para a carga, enquanto o sistema fixo apresenta uma variação da potência disponível de aproximadamente 30%, o que não é desejável.

5.4 Teste de eficiência do conversor buck

Um fator importante que deve ser levado em consideração, é a eficiência do conversor buck. Para obter essa eficiência, basta dividir a potência de saída do conversor pela potência de saída do painel. O valor resultante é um valor entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor a eficiência do conversor.

Para realizar este teste, a frequência de chaveamento do PWM que aciona o Mosfet do conversor é de 62,5 KHz. A frequência está diretamente relacionada à eficiência desse conversor. Uma frequência baixa produz uma saída com maiores oscilações, porém o rendimento do conversor é melhor. Por outro lado, ao utilizar uma frequência de acionamento maior, a saída é mais constante e o rendimento do conversor é pior.

O teste teve duração total de 5 minutos e foi feito utilizando o algoritmo MPPT. Os resultados obtidos podem ser analisados ao observar as figuras 5.8, onde estão a potência gerada pelo

painel e a potência na saída do conversor, e a figura 5.9, onde está representado o rendimento do painel durante no mesmo intervalo de tempo.

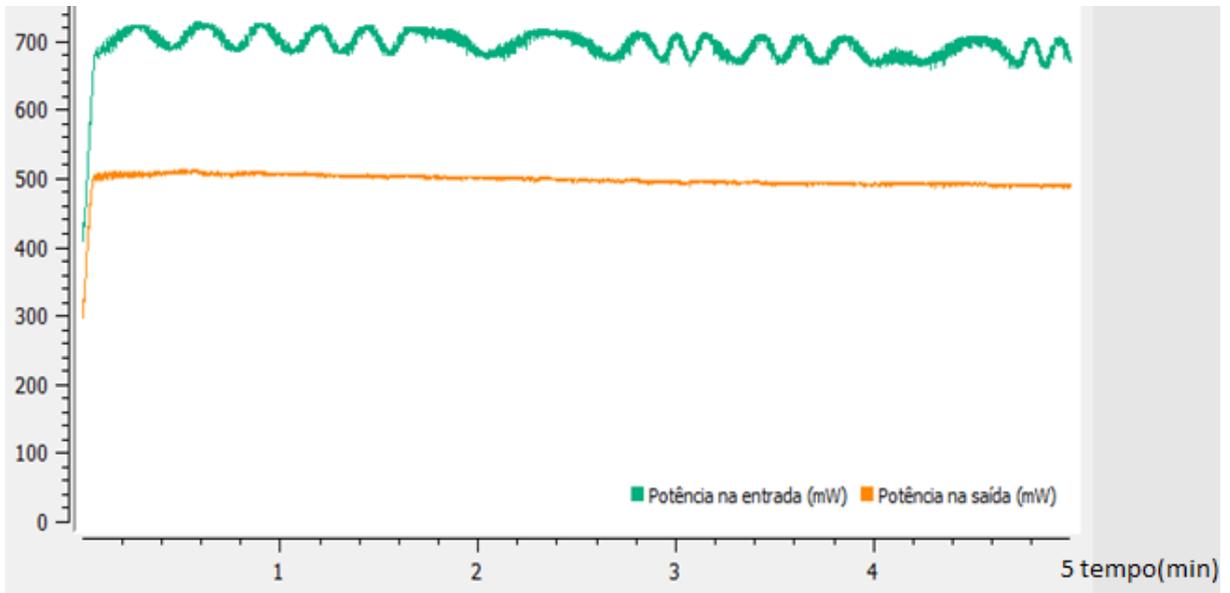


Figura 5.8 – Potência gerada na saída no painel e potência na saída do conversor

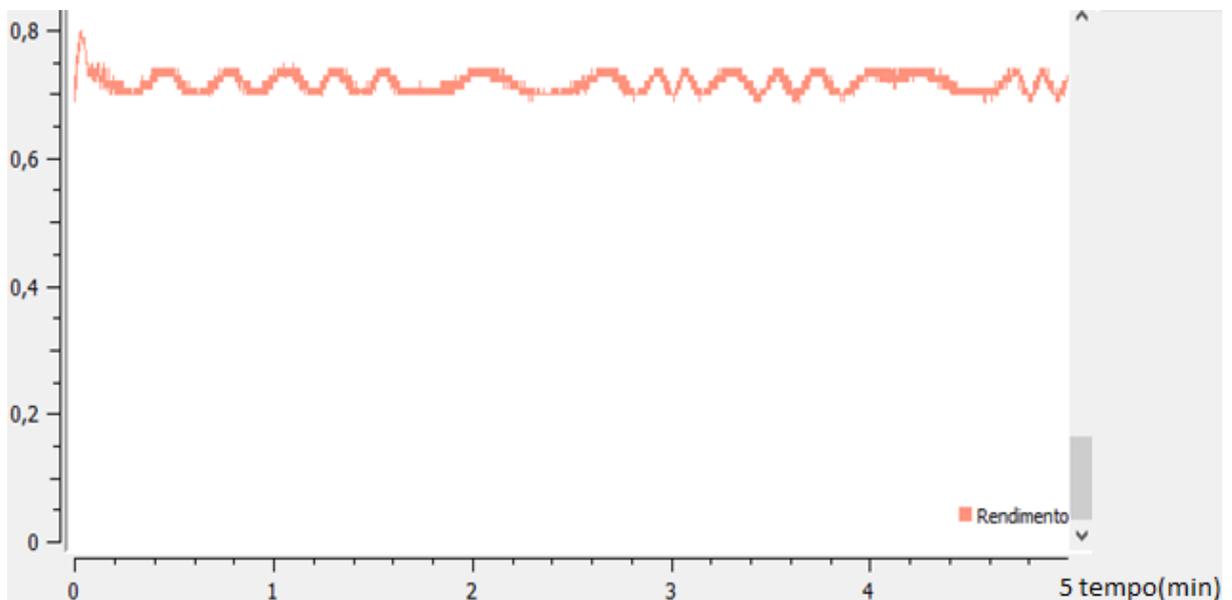


Figura 5.9 – Rendimento do conversor buck

Por meio da análise desse resultado, é possível observar que a eficiência varia ao longo do teste, mas o valor médio está em torno de 73%. Outra característica que é possível observar nos resultados, é que a potência de saída do conversor possui menos oscilação que a potência gerada pelo painel. Isso acontece por causa da forma de construção do conversor, que possui

um filtro composto por um indutor e um capacitor. Essa característica representa uma vantagem na utilização desse conversor no sistema.

6 CONCLUSÃO

Novas formas de geração de energia são necessárias para suprir as demandas energéticas mundiais, que são cada vez maiores. As fontes tradicionais de geração de energia impactam o meio ambiente, portanto, novas tecnologias estão sendo introduzidas no mercado. Uma dessas soluções é a geração de energia fotovoltaica. Porém, o baixo rendimento dos painéis é um fator que eleva os custos para a implementação dessa tecnologia, visto que é necessário instalar uma quantidade grande de painéis para gerar uma quantidade de energia.

O projeto aqui sugerido consistiu em uma avaliação de algumas técnicas utilizadas para aumentar a eficiência de um sistema de geração de energia fotovoltaica. Utilizando um microcontrolador de baixo custo, juntamente sensores e técnicas de otimização, é possível fazer com que o painel trabalhe próximo ao seu ponto de máxima potência, ou seja, fornecendo o máximo valor de energia para a carga em um determinado intervalo de tempo.

Devido às condições climáticas locais, foram feitas apenas simulações em laboratório, onde os painéis foram dispostos em frente a uma lâmpada halógena, que permite um ambiente de testes controlado.

No primeiro teste, foi avaliada a eficiência da técnica MPPT perturbe e observe em um sistema em que a carga instalada e as condições de radiação não mudavam. Foi constatado que, para esse tipo de caso, o ganho ao utilizar a técnica MPPT é muito pequeno.

Porém, durante o segundo teste, em que o sistema possuía uma carga variável e também variação da incidência de luz painel, o que na prática representa a maioria dos sistemas de geração, a técnica MPPT implementada fez com que o sistema gerasse 12,2% mais energia durante os cinco minutos de teste em relação ao sistema que não utiliza o chaveamento. O sistema também foi capaz de gerar 17,4% a mais de potência em relação ao sistema que possuía o ciclo de trabalho de 50%.

Isso prova que a implementar uma técnica MPPT, nesse caso a técnica perturbe e observe, faz com que o sistema de geração de energia fotovoltaica seja mais eficiente.

Outra avaliação feita ao longo do trabalho foi o caso de um seguidor solar. Para isso, o teste foi dividido em duas etapas. Como a fonte de luz é fixa, na primeira etapa, o painel ficou em uma posição fixa, representando o sistema que segue o sol, pois os raios incidentes estão sempre perpendiculares à superfície do painel. Na segunda etapa, o painel foi girado, para simular o movimento do sol em relação a um painel fixo.

Nesse caso, houve um aumento na produção de energia do sistema seguidor em relação ao sistema fixo de 14,77%.

Por último, mais um teste foi realizado, com o objetivo de testar a eficiência do conversor buck, usado para fazer o chaveamento da tensão de saída do painel. Esse teste comprovou que o conversor utilizado possui uma eficiência média de 73%, além de fazer com que a tensão fornecida à carga seja mais constante.

Portanto, os dois sistemas propostos no trabalho para melhorar a eficiência de um painel fotovoltaico obtiveram um resultado satisfatório.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

No presente trabalho foram utilizados painéis com pouca capacidade de geração de energia e apenas uma técnica MPPT para analisar a viabilidade da utilização dessa técnica para aumentar a eficiência do sistema de geração. Além disso, no sistema de rastreamento solar, o controle foi manual.

Para trabalhos futuros pode-se sugerir a implementação dos sistemas propostos nesse trabalho em painéis comerciais de maior escala, além de utilizar a energia gerada para fazer a carga de uma bateria.

Além disso, outra sugestão é fazer uma comunicação entre o Arduino e um banco de dados online que contenha a posição solar local, de forma a fazer o rastreador solar operar de forma autônoma.

7 REFERÊNCIAS

- AHMED, Al Jumlat. Performance Evaluation of Solar Panel and Proposed New Algorithm of Solar Tracking System. 2014, [S.l: s.n.], 2014. p. 9–13.
- BEM, Julio César Trevisan Dal *et al.* Solução para bombeamento de água em propriedades rurais utilizando energia solar fotovoltaica. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 7, n. 1, p. 50–57, 2017. Disponível em: <<https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/146/144>>.
- BRAUN, Priscila *et al.* A integração dos sistemas solares fotovoltaicos em seis aeroportos brasileiros utilizando diferentes tecnologias de células solares. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 1, n. 1, p. 12–22, 2016. Disponível em: <<https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/37>>.
- CHANDWANI, Ashwin; KOTHARI, Abhay. Design , Simulation and Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Solar based Renewable Systems. 2016, [S.l: s.n.], 2016. p. 539–544.
- DA SILVA, Clerismar Fernandes; DRACH, Patrícia Regina Chaves; BARBOSA, Gisele Silva. Energia solar como solução energética sustentável em cidade compactas. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 5, n. 31, p. 68–77, 2017.
- LIU, Hwa-dong; LIN, Chang-hua. A MPPT Control Strategy of Solar Power Systems for Low Irradiance Conditions. p. 932–935, 2017.
- MOREIRA, Altair Antunes; BUENO, Eduardo; TESSARO, Antônio Pedro. Intelligent Autonomous Photovoltaic System in Rural Areas for Low-. p. 134–142, 2017.
- NASCIMENTO, Rodrigo Limp. *ENERGIA SOLAR NO BRASIL: SITUAÇÃO E PERSPECTIVAS.* . [S.l: s.n.], 2017.
- NASCIMENTO, Cássio Araújo Do. *Princípio De Funcionamento Da Célula Fotovoltaica.* 2004. 21 f. 2004.
- NIGAM, Akhil; GUPTA, Abhishek Kumar. Performance and simulation between conventional and improved perturb & observe MPPT algorithm for solar PV cell using MATLAB / simulink. 2016, [S.l: s.n.], 2016. p. 0–3.
- RIOS, Willian. Estudo dos Limites de Operação de Conversores CC-CC Aplicados à Sistemas Fotovoltaicos Com o Uso de Dados Reais de Radiação Solar. 2015. 77 f. Universidade Federal do Pampa, 2015.

SELMAN, Nasir Hussein; MAHMOOD, Jawad Radhi. Comparison Between Perturb & Observe , Incremental Conductance and Fuzzy Logic MPPT Techniques at Different. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 5, n. 7, p. 12556–12569, 2016.

SOUZA, Raquel O; MASOTTI, Demerval R; GRITTI, Tânia R. Estudo da aplicação de energia solar fotovoltaica no segmento de negócios SOHO - Small Office Home Office. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 6, n. 1, p. 51–54, 2016.

THOMAZ, Rodrigo. *Demanda de Energia Elétrica no Brasil: 1995-2015*. 2017. 54 f. Universidade Federal do Paraná, 2017.

VAZ, Benhur Goulart. Estudo e Implementação de Técnicas para a Maximização da Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos. 2015. 81 f. Universidade Federal do Pampa, 2015.

ZAKARIAH, Azwaan *et al*. Medium size dual-axis solar tracking system with sunlight intensity comparison method and fuzzy logic implementation. *Jurnal Teknologi*, v. 77, n. 17, p. 145–157, 2015.