



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ESTUDO DE RENDIMENTO E TEMPERATURA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM USO DE TÉCNICA DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

Gustavo Marques Mattos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro
Abril de 2016

ESTUDO DE RENDIMENTO E TEMPERATURA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM USO DE TÉCNICA DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

Gustavo Marques Mattos

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Examinada por:

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

Regina Célia da Silva Barros Allil, D.Sc.

Fábio Vieira Batista de Nazaré, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL de 2016

Mattos, Gustavo Marques

Estudo de Rendimento e Temperatura de Painéis Fotovoltaicos com Uso de Técnica de Concentração Solar/Gustavo Marques Mattos. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2016.

XVI, 75 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 59 – 60.

1. Energia Renovável e Limpa.
 2. Concentração da luz do Sol.
 3. Energia Solar.
 4. Painel Fotovoltaico.
 5. Rastreamento do Sol.
- I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Estudo de Rendimento e Temperatura de Painéis Fotovoltaicos com Uso de Técnica de Concentração Solar.

*À minha mãe Fátima pelo dom
da vida e pelo amparo ao longo
desses anos.*

*À minha sobrinha Isadora por
me proporcionar uma nova
perspectiva de vida.*

Agradecimentos

Agradeço à Deus por me dar forças em cada momento difícil dessa jornada.

Aos meus pais, Raimundo e Fátima, pelo amor e carinho dedicados e às minhas tias Inês e Ângela, também por todo o suporte financeiro.

Agradeço ao meu irmão Guilherme e à minha irmã Patrícia pela amizade e pelo esforço em me apoiar em tudo que precisei.

À minha sobrinha Isadora pelos sorrisos doces que compram minha felicidade e por me ensinar a ser pai.

Aos meus cães Nina, Rakelly e Marvin pelas mordidas, brincadeiras e lambidas.

À minha terapeuta, Márcia Sayão, que me fez enxergar melhor as coisas da vida e me ajudou a dar a volta por cima.

Agradeço também aos meus amigos de Teresópolis, aos meus colegas de faculdade e aos meus colegas de laboratório pelos momentos de descontração, apoio e orientação neste trabalho.

A todos os professores que contribuíram com a minha formação.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

ESTUDO DE RENDIMENTO E TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM USO DE TÉCNICA DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

Gustavo Marques Mattos

Abril/2016

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Curso: Engenharia de Controle e Automação

A energia solar vem como uma fonte promissora para suprir a demanda de abastecimento energético por se tratar de uma fonte de energia renovável e limpa. Motivado por isso, o presente trabalho foca-se no rendimento de painéis fotovoltaicos. Para o projeto desenvolvido, foi conduzido um estudo que emprega uma técnica de concentração da luz do Sol, buscando o aumento na conversão da energia solar para energia elétrica. Isto é feito utilizando um painel fotovoltaico e espelhos que concentram na face captadora a radiação incidente. De forma a obter um desempenho ainda melhor nessa conversão, os espelhos se movimentam de acordo com um algoritmo que informa ao sistema a posição em que se encontra o Sol a cada momento. Desse modo, é feito o rastreamento do Sol, fazendo com que uma quantidade otimizada de radiação seja refletida no painel. Como consequência, espera-se que sua temperatura aumente, fazendo com que seu rendimento diminua. Um outro estudo análogo ao anterior foi realizado usando, dessa vez, a técnica tradicional de captação onde, em seguida, ambos foram comparados a fim de se chegar a uma conclusão sobre qual dos dois sistemas é mais eficaz, o concentrador ou o tradicional.

Palavras-chave: Energia Renovável e Limpa, Concentração da luz do Sol, Energia Solar, Painel Fotovoltaico, Rastreamento do Sol.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Control and Automation Engineer.

**EFFICIENCY AND TEMPERATURE STUDY OF PHOTOVOLTAIC PANELS
USING SOLAR CONCENTRATION TECHNIQUE**

Gustavo Marques Mattos

April/2016

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Course: Control and Automation Engineering

Solar energy is a promising source to meet the energy supply demand, because it is a renewable and clean energy. Motivated by this, the present work focuses on the performance of photovoltaic panels. For the project developed, a study was conducted employing a technique of concentrating sunlight, seeking an increase in the conversion of solar energy to electricity. This is done using a photovoltaic panel and mirrors, concentrating on the panel face, the radiation incident. In order to get an even better performance in this conversion, the mirrors move in accordance with an algorithm that tells the system the position at which the Sun is. Thus, the solar tracking works so that an optimized amount of radiation is reflected on the panel. As a result, it is expected that its temperature rises causing its performance to decrease. Another study, analogous to the previous one, was carried out using, this time, the traditional technique of capture. Then, both were compared in order to reach a conclusion about which of the two systems is more effective, the concentrating or the traditional one.

Keywords: Renewable and Clean Energy, Concentration of Sunlight, Solar Energy, Photovoltaic Panel, Solar Tracking.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	4
1.3 Metodologia	5
1.4 Organização do Texto	5
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Um Pouco de História	7
2.2 Concentração Solar Térmica	8
2.2.1 Sistema Concentrador do Tipo Prato	9
2.2.2 Sistema Concentrador do Tipo Torres de Potência	9
2.2.3 Sistema Concentrador do Tipo Calhas Parabólicas	10
2.3 Concentração Solar Fotovoltaica	10
2.3.1 Sistema Concentrador Fotovoltaico do Tipo Prato	11
2.3.2 Sistema Concentrador Fotovoltaico do Tipo Calhas Parabólicas	12
2.3.3 Sistema Concentrador Fotovoltaico do Tipo Micro Prato	13
2.3.4 Lentes de Fresnel como Concentradores Fotovoltaicos	13
2.4 A Energia Fotovoltaica no Brasil	15
3 Aspectos Teóricos	16
3.1 Fontes de Energia	16
3.2 O Efeito Fotoelétrico	17
3.3 O Efeito Fotovoltaico	19
3.3.1 Semi-condutores Não-dopados	19
3.3.2 Semi-condutores Dopados	20
3.4 Células Fotovoltaicas	20

3.4.1	Princípio de Funcionamento	21
3.4.2	Tipos de Células Fotovoltaicas	22
3.5	Características Elétricas de um Painel Fotovoltaico	23
3.5.1	Corrente e Tensão	23
3.5.2	Potência	24
3.6	Grandezas de Influência no Rendimento	24
3.6.1	Influência da Temperatura	25
3.6.2	Influência da Radiação	26
3.7	Orientação dos Módulos Fotovoltaicos	27
3.7.1	Ângulo Azimutal	27
3.7.2	Ângulo de Elevação	28
3.7.3	Gráficos de Posição Solar	28
4	Descrição do Sistema	31
4.1	Sistema Tradicional	33
4.2	Sistema Concentrador	34
4.2.1	Rastreamento Solar	34
4.3	Aquisição de Dados	36
4.3.1	Radiação	37
4.3.2	Temperaturas	38
4.3.3	Tensão e Corrente	39
4.4	Máxima Potência	39
5	Resultados e Discussões	43
5.1	Verificação do Funcionamento do Circuito de Chaveamento	43
5.2	Verificação do Funcionamento do Módulo de Monitoramento de Máxima Potência	44
5.3	Experimentos que Relacionam Potência e Radiação	46
5.4	Experimentos que Relacionam Potência e Temperatura	47
5.5	Cálculo do Rendimento do Painel do Sistema Concentrador	50
5.6	Comparação de Rendimento dos Sistemas Concentrador e Tradicional	51
5.7	Outras Discussões Sobre os Resultados	53
6	Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros	57
Referências Bibliográficas		59
A Fluxograma do Algoritmo <i>Perturbe & Observe</i>		61
B Fluxograma do <i>Firmware</i> do Sistema de Controle dos Motores de Azimute e Elevação		62

C *Firmware* do Sistema de Aquisição e Condicionamento de Dados 63

D *Firmware* do Sistema de Tratamento dos Dados 68

Listas de Figuras

1.1	Consumo de energia elétrica nas últimas décadas e previsão até 2030.	2
1.2	Matriz energética brasileira.	3
1.3	Crescimento do uso da energia fotovoltaica no mundo.	3
1.4	Média anual da incidência de radiação solar no planeta.	4
2.1	Sistemas fotovoltaicos aplicados.	8
2.2	Usina fotovoltaica Cidade Azul, em Santa Catarina.	8
2.3	Sistema concentrador do tipo prato – <i>dish engine</i> .	9
2.4	Sistema concentrador do tipo torre de potência solar – <i>solar power tower</i> .	10
2.5	Sistema concentrador do tipo calhas parabólicas – <i>parabolic through</i> .	11
2.6	Sistema concentrador fotovoltaico do tipo prato.	12
2.7	Sistema concentrador fotovoltaico do tipo calhas parabólicas.	12
2.8	Sistema concentrador fotovoltaico do tipo micro prato.	13
2.9	Lente de Fresnel aplicada em um CPV.	14
2.10	Sistema concentrador instalado utilizado neste trabalho.	15
3.1	O efeito fotoelétrico.	17
3.2	O espectro da luz.	18
3.3	Cristal de silício não-dopado.	19
3.4	Cristal de silício dopado: tipos <i>n</i> e <i>p</i> .	20
3.5	O efeito fotovoltaico.	21
3.6	Curva característica de corrente e tensão de um painel fotovoltaico.	24
3.7	Curva característica de potência e tensão de um painel fotovoltaico.	25
3.8	Curva corrente <i>vs</i> tensão característica de um PV para diferentes valores de temperatura.	25
3.9	Curva corrente <i>vs</i> tensão característica para diferentes valores de radiação.	26
3.10	Esquema que identifica o ângulo azimutal.	27
3.11	Esquema que identifica o ângulo de elevação.	28
3.12	Posição do Sol ao longo de um ano, no Rio de Janeiro.	29

4.1	Foto de satélite que mostra a localização dos sistemas.	31
4.2	Espectros de irradiação do painel utilizado e da luz do Sol.	32
4.3	Sistema fotovoltaico tradicional.	33
4.4	Sistema fotovoltaico concentrador.	34
4.5	Esquema do funcionamento do rastreamento solar.	35
4.6	Diagrama de blocos do sistema de rastreamento solar.	35
4.7	Janela de interface com o operador do programa de rastreamento. . .	36
4.8	Desenho esquemático do circuito de aquisição e condicionamento de sinal.	37
4.9	Estação meteorológica.	38
4.10	Diagrama geral da aquisição dos sinais.	39
4.11	Desenho esquemático do circuito de chaveamento.	40
4.12	Gráfico teórico explicativo do funcionamento de um sinal PWM. . .	41
4.13	Gráfico teórico explicativo do algoritmo <i>Perturbe & Observe</i>	41
4.14	Módulo de monitoramento de máxima potência e seu interior detalhado.	42
5.1	Gráfico experimental para o painel concentrador das curvas de corrente e potência em função da tensão.	44
5.2	Curva corrente <i>vs</i> tensão do painel KS-5T fornecida pelo fabricante. .	44
5.3	Procedimentos utilizados para a validação do módulo de monitoramento de máxima potência.	46
5.4	Gráficos experimentais de corrente <i>vs</i> tensão do PV KS-5T para diferentes procedimentos.	47
5.5	Gráficos de radiação incidente e de máxima potência para dados do dia 25/09/15.	48
5.6	Gráficos de temperatura ambiente e do painel sobrepostos ao gráfico da máxima potência para dados do dia 25/09/15.	49
5.7	Gráficos de temperaturas ambiente e do painel para dados do dia 23/06/15.	49
5.8	Representação da janela do programa que exibe a comunicação na porta serial.	50
5.9	Gráficos comparativos da potência fornecida pelos sistemas para dois dias diferentes.	52
5.10	Gráfico comparativo de reflectância de alguns materiais empregados em revestimentos de espelhos.	53
5.11	Luxímetro.	54
5.12	Gráfico comparativo entre os valores de radiação solar concentrada e direta.	55

5.13 Gráfico comparativo entre os valores de intensidade da luz concentrada e direta.	56
---	----

Lista de Tabelas

2.1 Algumas vantagens e desvantagens de sistemas fotovoltaicos concentradores (CPV)	14
3.1 Comparação entre alguns dos diversos tipos de células fotovoltaicas.	22
4.1 Características elétricas dos painéis fotovoltaicos utilizados no terraço. .	32
5.1 Características elétricas do painel fotovoltaico utilizado para os testes de bancada.	45

Lista de Abreviaturas

AM	Massa de Ar, p. 31
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica, p. 14
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio, p. 22
CPV	Concentrated Photovoltaics, p. 10
CSP	Concentrating Solar Power, p. 7
CT	Centro de Tecnologia, p. 30
HCPV	High Concentrated Photovoltaics, p. 11
IHM	Interface Homem Máquina, p. 34
IR	Índice de Refração, p. 52
LCPV	Low Concentrated Photovoltaics, p. 11
LIF	Laboratório de Instrumentação e Fotônica, p. 1
MC	Módulo de Controle, p. 34
MMMP	Módulo de Monitoramento de Máxima Potência, p. 5
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, p. 38
MPP	Ponto de Máxima Potência, p. 24
NASA	National Aeronautics and Space Administration, p. 7
NREL	National Renewable Energy Laboratory, p. 11
PCB	Placa de Circuito Impresso, p. 35
PV	Painel Fotovoltaico, p. 3
PWM	Pulse Width Modulation, p. 38

- P&O Perturbe & Observe, p. 39
- UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 4
- UMC Unidade de Monitoramento e Controle, p. 34

Capítulo 1

Introdução

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) para o projeto Fazenda Solar inerente a AMPLA, empresa de fornecimento de energia elétrica para algumas cidades do estado do Rio de Janeiro.

1.1 Motivação

O ser humano está cada vez mais dependente do uso da energia elétrica. Ele a usa para quase todos os fins: no trabalho, em casa, no lazer e em tudo em que a eletricidade precisa estar presente. Preocupa que, nas últimas décadas, seu consumo tem aumentado bastante, como mostra a Figura 1.1. Na década de 80, o consumo mundial era de cerca de 6.000 TWh (terawatt-hora), passando a dobrar em 2005. A partir dessa data, o consumo dá uma guinada e se prevê que, em 2030, o valor terá mais do que dobrado em um mesmo espaço de tempo, evidenciando um crescimento ainda mais rápido.

Devido a esse aumento e com uma previsão alarmante para o crescimento do consumo de energia elétrica, a questão da poluição do planeta Terra preocupa bastante os ambientalistas. Desde quando se iniciou a Revolução Industrial no século XVIII, agentes poluentes têm sido emitidos indiscriminadamente em toda a atmosfera. Há alguns anos, toda essa preocupação se tornou ainda mais evidente quando vieram à tona notícias de que o planeta estava demonstrando que havia chegado ao seu limite.

Fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, como o petróleo, são as mais utilizadas nos dias de hoje no mundo. Elas causam efeitos nocivos ao meio-ambiente, devido à emissão dos gases tóxicos produzidos. Dentre as consequências desses efeitos estão: a chuva ácida, a destruição da camada de ozônio e a mudança no clima global [1]. Os órgãos de governo buscam substituir essa forma de obtenção de energia por outras mais limpas e rentáveis.

No Brasil, a matriz energética é bem variada. Com o seu potencial hídrico,

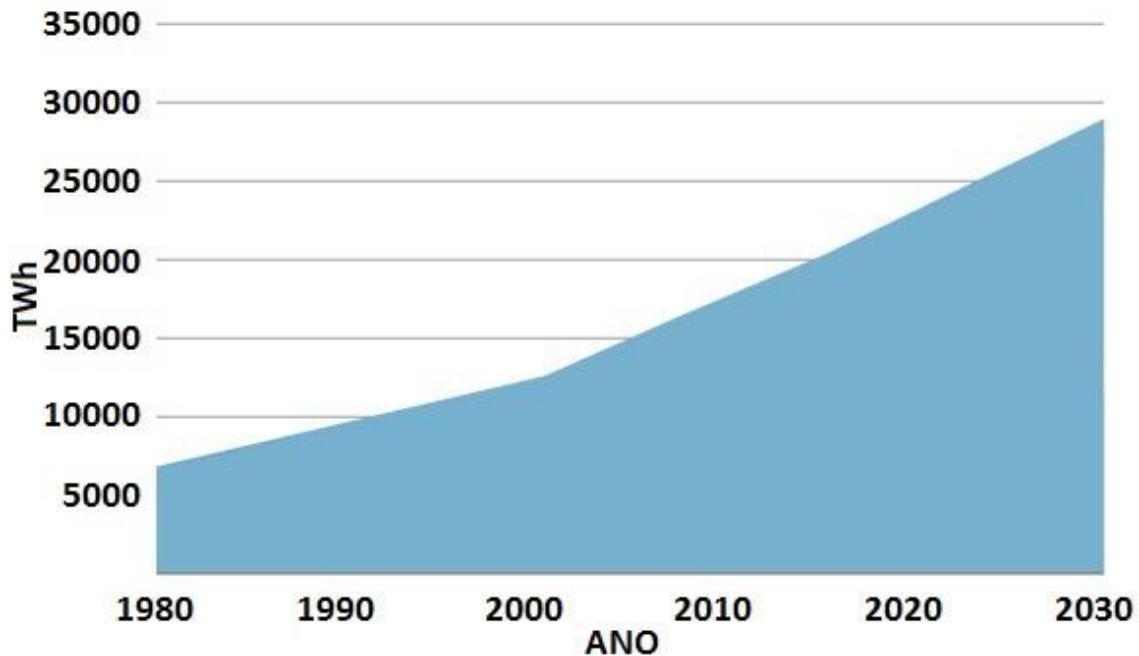


Figura 1.1: Consumo de energia elétrica nas últimas décadas e previsão até 2030.
Fonte: IEA World Energy Outlook, 2009.

a maior parcela responsável pela produção de energia no país vem das usinas hidrelétricas. Em seguida aparece a energia que vem de combustíveis fósseis. No caso, essas fontes de energia são poluidoras e não-renováveis. Já as parcelas eólica, biomassa, nuclear e solar são renováveis, mas também as de menor expressão. Isso evidencia a necessidade do aumento da produção de energia proveniente dos recursos que não se esgotam, uma vez que há uma preocupação principalmente com a poluição gerada por combustíveis fósseis e, no caso do Brasil, o impacto ambiental causado pelas usinas hidrelétricas. Isso tudo pode ser observado no gráfico da Figura 1.2, que mostra também que há uma parcela da matriz energética brasileira correspondente à energia que se importa.

Usinas hidrelétricas gerariam energia limpa e renovável, no entanto, as bacias hidrográficas ao redor do planeta não são distribuídas uniformemente, além de que existem regiões onde a construção desse tipo de usina não seria viável. Além disso, esse tipo de geração de energia é muito dependente da água, que às vezes pode se tornar escassa em períodos de pouca ou nenhuma chuva. Usinas nucleares também são limpas, mas são perigosas pois têm potencial de destruir regiões e levar muitas pessoas à morte. Para atender toda a demanda por energia que aumenta cada vez mais com o passar dos anos e de forma que agrida menos a natureza, a energia solar fotovoltaica apresenta uma boa solução. Ela oferece diversas vantagens. Por ser uma fonte de energia renovável, ela é inesgotável e sistemas que a utilizam têm uma longa vida útil. Além disso, as centrais energéticas requerem manutenção mínima porque são bastante robustas e podem ser instaladas em uma localização próxima

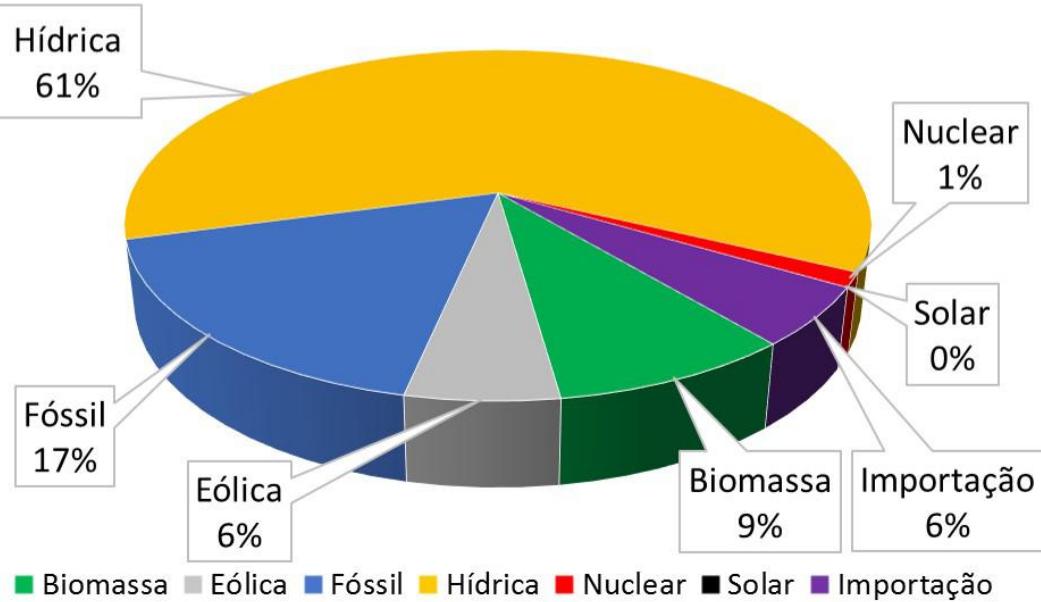


Figura 1.2: Matriz energética brasileira.

Fonte: Banco de Informações de Geração – ANEEL, 2016.

ao ambiente em que será usufruída a energia. Isso ocorre porque a instalação dos equipamentos não obriga que sejam feitos investimentos consideráveis em linhas de transmissão, proporcionando atender a demanda por energia de regiões remotas. Motivado por esses e outros aspectos, o uso da energia fotovoltaica tem crescido no mundo como mostra a Figura 1.3.

Dentre os outros fatores vantajosos que podem ser citados encontra-se o fato de que a tecnologia de fabricação de painéis fotovoltaicos (PV) tem evoluído, tornando-os cada vez mais eficientes e baratos. Aliado a isso, países que se encontram

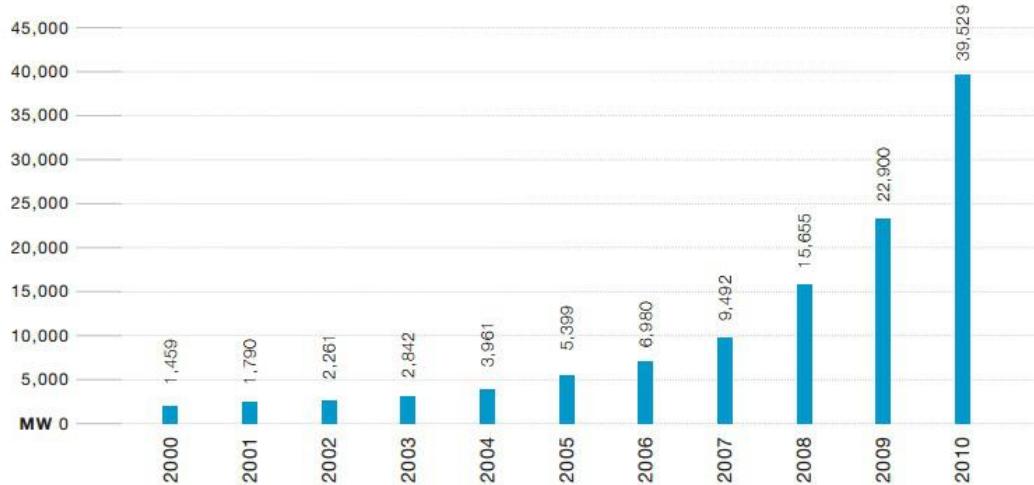


Figura 1.3: Crescimento do uso da energia fotovoltaica no mundo.

Fonte: Global Market Outlook For Photovoltaics Until 2015, EPIA.

em regiões tropicais, como por exemplo o Brasil, possuem uma enorme oferta na incidência de radiação do Sol (sendo isso evidenciado pela Figura 1.4), o que viabiliza ainda mais o uso desse tipo de energia nessas áreas.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho se dá pela implementação de um sistema de geração de energia elétrica através da utilização de painéis fotovoltaicos. Ele é baseado em uma técnica de concentração solar que utiliza espelhos, que têm como propósito refletir no painel concentrador uma quantidade de radiação do Sol maior que a que incide diretamente na superfície terrestre. Sendo assim, tornaria-se possível

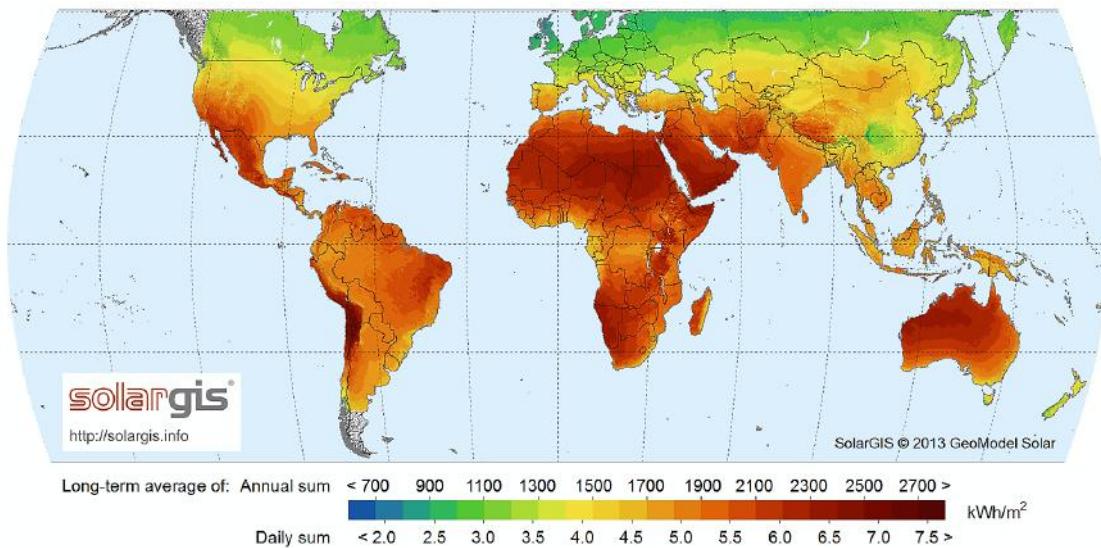


Figura 1.4: Média anual da incidência de radiação solar no planeta.

Fonte: <http://solargis.info>.

aumentar a conversão energética de suas células, fazendo-as gerar mais energia quando comparadas às do painel empregado na forma sem concentração. Além disso, a energia gerada por ambos os sistemas precisa ser direcionada para um banco de baterias, onde existe um inversor que tem como objetivo injetar na rede a energia gerada.

Dessa forma, para técnica de concentração ser considerada vantajosa, o sistema concentrador deve cumprir com o seu objetivo e apresentar uma maior produção de energia quando comparado a outros modelos em que a forma tradicional de obtenção é utilizada.

Para fins de comparação sobre suas eficiências e para avaliar se a concentração solar implica em algum prejuízo na conversão energética, esses dois tipos de sistemas foram implementados no terraço do Centro de Tecnologia da UFRJ (Universidade

Federal do Rio de Janeiro), onde puderam ser estudados e analisados de acordo com os dados gerados.

1.3 Metodologia

Os sistemas em análise operam da seguinte forma: o concentrador funciona com três espelhos e com um painel fotovoltaico; já o sistema tradicional utiliza somente um painel. Todos os dois foram instalados em um local considerado adequado, pois apresenta incidência plena de radiação do Sol ao longo do dia sem formação de sombras e não apresenta risco de vandalismo. Ambos funcionam de forma independente. No sistema concentrador, os espelhos são utilizados para refletir no painel a radiação solar que incide sobre eles. Esses espelhos rastreiam a posição do Sol de forma a maximizar a quantidade de radiação refletida.

Ao estarem funcionando os sistemas, alguns dados precisaram ser adquiridos para o estudo. Portanto, usou-se sensores respectivos aos tipos de medida que se queria avaliar, tais como: temperatura, radiação, tensão e corrente. A temperatura do painel foi medida através do sensor eletrônico LM-35, a radiação solar incidente foi medida com um piranômetro da marca SQUITTER e a corrente que circula pelo circuito em que o painel aparece como a fonte, com um sensor linear de efeito Hall da marca AMPLOC. Todos esses sinais foram enviados ao Módulo de Monitoramento de Máxima Potência (MMMP), onde foram adquiridos por um sistema microprocessado, o ARDUINO UNO, no qual o sinal de tensão do painel foi condicionado para ser medido diretamente nele. Todos foram calibrados a fim de se obter medidas confiáveis.

Para outros dados, como temperatura ambiente, e para fins de calibração foi usada uma estação meteorológica da marca Davis, modelo Vantage Pro 2, que mede de forma confiável diversos tipos de variáveis climatológicas.

Os valores dos dados obtidos foram condicionados através de um código de programa na linguagem Python, que os coloca em um formato adequado para que um sistema remoto possa lê-los e armazená-los em uma base de dados na rede local. Dessa forma, todo o estudo pôde ser conduzido valendo-se de gráficos e tabelas para concluir sobre a eficiência do sistema concentrador.

1.4 Organização do Texto

O texto está organizado em seis capítulos: 1. Introdução; 2. Revisão Bibliográfica; 3. Aspectos Teóricos; 4. Descrição do Sistema; 5. Resultados e Discussões; 6. Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros.

O capítulo 1 expõe a motivação para realizar este trabalho, mostrando a importância do estudo nessa área. Expõe também o objetivo que se tem ao realizar esta pesquisa, deixando claro o que será feito nela. Este objetivo ao ser cumprido, beneficiará um enorme volume de pessoas. E, por fim, apresenta a metodologia empregada no projeto como um todo.

No capítulo 2 evidencia-se o que tem sido feito na área de energia solar ao redor do mundo, tanto na do tipo térmica, quanto na do tipo fotovoltaica. É visto que a energia solar térmica baseia-se, principalmente, em técnicas de concentração solar para aquecimento, enquanto a fotovoltaica em células solares, concentradas ou não. Este capítulo elucida a respeito dessas técnicas de concentração apresentando as que são mais usadas atualmente, além de abordar suas características. Explicita-se ainda, as vantagens do método concentrador empregado neste trabalho, que tem o intuito de gerar eletricidade a partir da energia solar.

Já o capítulo 3 trata de diversos assunto teóricos necessários para o desenvolvimento do projeto e seu entendimento, desde os aspectos mais simples até os mais complexos; dos mais detalhados aos mais gerais. Dessa forma, o leitor pode estar mais próximo de entender todas as nuances que fundamentam a aplicação.

O capítulo 4 descreve todo o sistema, fonte de estudo deste trabalho. Discute a respeito dos equipamentos utilizados, suas características e forma de montagem. Apresenta figuras reais que mostram o projeto instalado e os instrumentos que foram necessários durante a pesquisa, tanto os comerciais quanto os desenvolvidos no laboratório, além dos sensores importantes para a coleta de dados.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos a partir dos elementos descritos, validando aqueles que foram desenvolvidos no laboratório e estabelecendo uma comparação efetiva entre o sistema concentrador proposto e o que é empregado tradicionalmente. Em seguida, algumas discussões são feitas a respeito dos resultados obtidos.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas com a pesquisa e levanta possíveis sugestões para os trabalhos que possam vir a partir deste.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo relata de forma breve a respeito do desenvolvimento de células fotovoltaicas, desde sua criação até os dias atuais. Isso é importante para se entender e valorizar o trabalho dos cientistas envolvidos. Em seguida, são apresentadas algumas tecnologias existentes no mundo na área em questão.

2.1 Um Pouco de História

Desde 1839, quando o efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmond Bequerel, a história da energia fotovoltaica teve que esperar até o início do século XX para que a tecnologia empregada nesse tema pudesse obter um avanço significativo. Somente a partir de 1905, quando Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico, quando surgiu a física dos elementos semi-condutores e quando outras pesquisas foram concluídas, é que foi possível se pensar na energia solar como energia elétrica, após conversão.

Na década de 1950, Calvin Fuller era um químico que trabalhava na *Bell Laboratories*. Ele produziu a primeira célula solar, onde uma barra de silício (um semi-metal semi-condutor) foi dopada com gálio formando uma camada de cargas móveis positivas, do tipo *p*. Em seguida, ela foi mergulhada em um banho de lítio, criando assim, uma zona de elétrons livres chamada de silício do tipo *n*. O físico Gerald Pearson, colega de Fuller, verificou que essa amostra produzia uma corrente elétrica quando era exposta à luz.

A partir daí, a tecnologia evoluiu e elas passaram a ser utilizadas em maior escala desde em satélites da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e no programa espacial soviético, a aplicações em residências (Figura 2.1). A eficiência dessas células nunca havia passado de 20% até que na década de 1980, devido ao investimento em pesquisas nessa área para o uso no espaço, isso foi alcançado pelas células de silício monocristalino. Em seguida, conforme a tecnologia avançava, conseguiu-se uma eficiência de 25% [2].



(a) Satélite. Fonte: www.energylivenews.com.



(b) Residência. Fonte: www.soletrol.com.br.

Figura 2.1: Sistemas fotovoltaicos aplicados.

Foi concluído na época que, visto que as células fotovoltaicas estavam evoluindo e sua importância ficava cada vez maior devido à preocupação com o meio-ambiente, o estudo na área de energias renováveis era promissor e não podia ficar focado somente em aumentar a eficiência de células, mas também em diminuir seu custo e em disseminar seu uso. A tecnologia foi avançando a ponto de que, hoje em dia, não só se desenvolveu painéis fotovoltaicos eficientes, como algumas usinas de energia fotovoltaica estão sendo construídas e algumas já estão prontas e em funcionamento, como a Usina Fotovoltaica Cidade Azul da Figura 2.2, em Santa Catarina, Brasil. Ela representa uma usina fotovoltaica conectada à rede. Além disso, pesquisas feitas em técnicas de Concentração de Potência Solar (CSP) propuseram diferentes maneiras de aproveitar a energia do Sol para sua conversão em energia elétrica.



Figura 2.2: Usina fotovoltaica Cidade Azul, em Santa Catarina.
Fonte: www.tractebelenergia.com.br.

2.2 Concentração Solar Térmica

As tecnologias de concentração solar térmica se apresentam com a finalidade de produzir calor a partir da energia solar. A luz do Sol é concentrada de alguma forma

dependendo da aplicação e do sistema empregado e, em seguida, ao esquentar um fluido, por exemplo, esse calor é utilizado para produzir energia elétrica.

2.2.1 Sistema Concentrador do Tipo Prato

Em 1929, o cientista Robert Hutchings Goddard desenvolveu o primeiro sistema térmico de concentração solar. Ele é chamado de sistema concentrador do tipo prato (*Dish Engine*) [3]. Esse “prato” possui formato côncavo com superfície refletora que concentra os raios solares num pequeno receptor que, por sua vez, absorve o calor e o direciona a um gerador. Atualmente, esse tipo de concentrador solar, como mostra a Figura 2.3, é capaz de gerar 10 MW de potência.



Figura 2.3: Sistema concentrador do tipo prato – *dish engine*.
Fonte: instalacje.gep.com.pl.

2.2.2 Sistema Concentrador do Tipo Torres de Potência

Outra forma de concentração térmica com tecnologia desenvolvida para gerar cerca de 10 MW de potência é conhecida como Torres de Potência (*Power Towers*). Elas começaram a ser projetadas na década de 70 e foram implementadas a partir da década de 80, nos Estados Unidos, mais especificamente, no deserto de Mojave, na Califórnia. Nesse sistema (Figura 2.4), uma grande quantidade de espelhos é colocada por toda uma área circular onde, no centro dela, localiza-se uma torre na qual são concentrados os feixes de luz refletidos por cada um deles. Esses espelhos encontram-se sobre uma estrutura que permite rastrear o Sol. O calor produzido na torre é usado para produzir vapor, que faz funcionar um gerador a turbina.



Figura 2.4: Sistema concentrador do tipo torre de potência solar – *solar power tower*. Fonte: www.sener-power-process.com.

2.2.3 Sistema Concentrador do Tipo Calhas Parabólicas

Há ainda uma forma de concentrar a luz do Sol para produzir energia elétrica, chamada de Calhas Parabólicas. Essa tecnologia surgiu no final do século XIX quando John Ericsson, um engenheiro sueco, desenvolveu uma calha que alimentou um pequeno motor de 373 W [4]. Nesse projeto, o vapor era produzido diretamente dentro do coletor com o calor gerado após a concentração e, em seguida, usado para gerar energia elétrica. Atualmente, essa técnica funciona da seguinte maneira: espelhos parabólicos em formatos de calha são dispostos na direção Norte-Sul. Ao longo do comprimento da calha e no ponto focal dos espelhos são colocados tubos por onde passam certos fluidos que são aquecidos pela radiação solar concentrada (Figura 2.5). Esses fluidos costumam ser alguns tipos de óleo que possuem alta temperatura de ebulição, já que a água evapora já a 100 °C e o calor fornecido realiza esse aquecimento a uma temperatura bastante superior a esse valor. A partir daí, o calor é utilizado para conduzir máquinas que gerem energia elétrica a partir da energia calorífica.

2.3 Concentração Solar Fotovoltaica

O estudo de sistemas concentradores da radiação do Sol em painéis fotovoltaicos também avança. Eles são chamados de sistemas fotovoltaicos concentradores (CPV). Como sistemas desse tipo precisam ser mais eficientes e baratos que os tradicionais, pesquisas são majoritariamente realizadas com o intuito de buscar formas mais eficazes de conversão energética usando tecnologia fotovoltaica. No entanto, esses sistemas ainda não apresentam níveis de eficiência suficientes, o que é possível com



Figura 2.5: Sistema concentrador do tipo calhas parabólicas – *parabolic through*.
Fonte: www.eeremultimedia.energy.gov.

a tecnologia tradicional.

O objetivo principal da tecnologia fotovoltaica concentradora é diminuir o custo e aumentar a eficiência desse tipo de sistema, podendo competir nesses aspectos com as tecnologias de concentração solar comum e a aplicação tradicional de painéis fotovoltaicos, principalmente em áreas em que ocorre radiação direta do Sol [5].

Existem dois tipos de concentração fotovoltaica: HCPV e LCPV . O sistema HCPV visa a concentração solar equivalente a mais de trezentas vezes a radiação do Sol, enquanto o LCPV, a menos de cem vezes. Esse último faz uso de células de silício cristalino e é onde o rastreamento do Sol é feito, principalmente, em apenas um eixo. No sistema HCPV, o rastreamento solar é feito em dois eixos e existem vários tipos de células fotovoltaicos para esse fim, como as de multi-junção, que são mais caras. Elas são feitas de elementos como o gálio, índio, fósforo, germânio e/ou arsênio e alcançam, nas condições ideais, rendimento de cerca de 39%.

2.3.1 Sistema Concentrador Fotovoltaico do Tipo Prato

Existem tecnologias que ainda estão sendo empregadas em fases de testes. O governo australiano financia, por exemplo a tecnologia de espelhos côncavos concentradores. Eles estão localizados no deserto de Alice Springs e possuem diâmetros enormes quando comparados à altura padrão de um ser humano. Esses espelhos concentram a luz do Sol em um ponto focal onde se localizam algumas células fotovoltaicas de alta eficiência. Esse sistema, mostrado na Figura 2.6, como um todo é capaz de gerar 20 kW de energia.



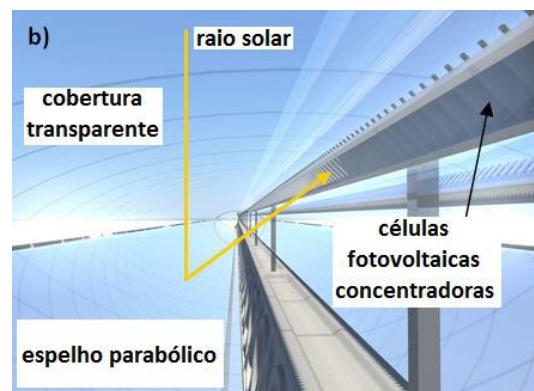
Figura 2.6: Sistema concentrador fotovoltaico do tipo prato.
Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL).

2.3.2 Sistema Concentrador Fotovoltaico do Tipo Calhas Parabólicas

Há uma tecnologia parecida com a de calhas parabólicas (CSP). Nesse caso, o sistema também faz uso de calhas. A radiação incide sobre elas, passando antes pela cobertura transparente que se encontra no sistema. Essas calhas possuem material reflexivo e possibilitam a chegada da luz nas células fotovoltaicas para, enfim, ser feita a conversão. Esse sistema fica localizado na Suíça e é mostrado na Figura 2.7.



(a) Estrutura do sistema.



(b) Detalhe que mostra o funcionamento.

Figura 2.7: Sistema concentrador fotovoltaico do tipo calhas parabólicas.
Fonte: ETH Zürich – Professorship of Renewable Energy Carriers.

2.3.3 Sistema Concentrador Fotovoltaico do Tipo Micro Prato

Para citar uma outra tecnologia em concentração fotovoltaica aplicada nos dias de hoje, existe uma que usa pequenos espelhos côncavos que são colocados lado a lado formando um *array*. Cada espelho desse *array* foca em um ponto a energia solar que incide sobre ele. Nesse ponto se encontram células solares que fazem a conversão da energia do Sol em energia elétrica. Esse sistema pode ser visto na Figura 2.8



Figura 2.8: Sistema concentrador fotovoltaico do tipo micro prato.

Fonte: www.cleanenergyauthority.com.

2.3.4 Lentes de Fresnel como Concentradores Fotovoltaicos

Muitas outras tecnologias usam em seus projetos lentes de Fresnel para concentrar a luz do Sol em um ponto onde, obviamente, se encontra uma célula solar que deve captar a radiação (Figura 2.9). Por fim, tendo em vista todas as tecnologias a respeito de concentração fotovoltaica mostradas nesse capítulo, pode-se fazer um levantamento dos aspectos positivos e negativos desse tipo de sistema (CPV). Essas características estão evidenciadas na Tabela 2.1.

Elucidado por tecnologias como estas citadas, o sistema concentrador empregado neste trabalho consiste no uso de três espelhos alinhados lado a lado na direção Leste-Oeste, com suas faces refletoras voltadas para a direção Norte. Eles se encontram sobre uma estrutura que se move em dois eixos, azimutal e de elevação. O movimento dos espelhos nesses eixos ocorrem de acordo com a posição do Sol, de forma que estes refletem a radiação solar em um painel fotovoltaico que se encontra a uma certa distância, também na direção Leste-Oeste. Porém, neste caso, a face captadora do

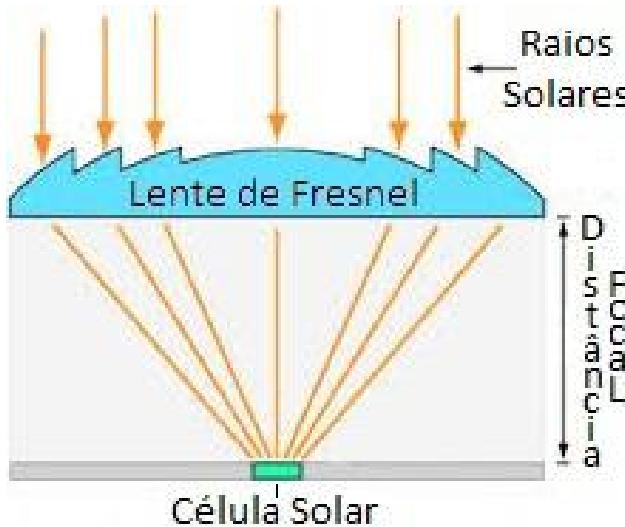


Figura 2.9: Lente de Fresnel aplicada em um CPV. Fonte: Green Rhino Energy – www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php (adaptado).

painel encontra-se voltada para a direção Sul. A energia elétrica convertida a partir da energia solar é armazenada em um banco de baterias. A Figura 2.10 mostra o sistema em questão instalado. Ele visa aumentar a conversão de energia solar em energia elétrica concentrando no painel fotovoltaico toda a radiação incidente nos espelhos. Isso leva a concluir que incide no painel radiação equivalente a três vezes a radiação do Sol.

Tabela 2.1: Algumas vantagens e desvantagens de sistemas fotovoltaicos concentradores (CPV) [5].

VANTAGENS DO CPV	DESVANTAGENS DO CPV
Eficiência alta para radiação direta	LCPV só consegue utilizar uma pequena fração da radiação difusa
Não é necessário resfriamento por água para sistemas que resfriam naturalmente (como é o caso de sistemas CSP)	HCPV não consegue utilizar radiação difusa, somente radiação direta
Possível uso adicional de calor residual	O rastreamento deve ser preciso e confiável
Grande escala de geração de energia (de kW a GW)	Pode requerer limpeza frequente para diminuir perda de incidência de radiação
Pequeno tempo de retorno de energia	Não é facilmente instalado em telhados de casas, por exemplo
Produção praticamente constante ao longo do dia devido ao rastreamento	É melhor utilizado somente em regiões com alto índice de incidência de radiação direta
Menor sensibilidade às variações de preços dos semicondutores	Deficiência na padronização da tecnologia



Figura 2.10: Sistema concentrador instalado utilizado neste trabalho.

Fonte: Projeto Fazenda Solar – LIF-COPPE/UFRJ.

2.4 A Energia Fotovoltaica no Brasil

Todas essas formas de utilização são exemplos do avanço da tecnologia e do consumo desse tipo de energia. Como foi mostrado na Figura 1.1, o consumo de energia elétrica no mundo aumentou bastante e, aliada à preocupação dos governos com relação à poluição ambiental, a produção de eletricidade a partir da energia solar fotovoltaica tem recebido investimentos consideráveis. Baseando-se no que se vê no gráfico da Figura 1.3, conclui-se que o crescimento no mundo do uso desse tipo de energia se dá de forma exponencial. Dessa forma, observa-se que o estudo nessa área é de extrema importância para atender as necessidades da população em geral.

No Brasil, a energia solar fotovoltaica ainda é empregada, em sua maioria, em pequenos sistemas isolados, em locais que não são atendidos pela rede elétrica, por serem de difícil acesso às linhas de transmissão e por se tratar de regiões pobres. Costumam ser utilizados na eletrificação de propriedades rurais, bombeamento de água, centrais remotas de telecomunicações e sistemas de sinalização. Acredita-se que, em breve, o uso da energia solar fotovoltaica esteja focado em sua conexão com a rede. Alguns projetos foram criados na intenção de regularizar e promover esse tipo de energia no país, como o Projeto Estratégico "Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira" da ANEEL.

Capítulo 3

Aspectos Teóricos

Neste capítulo será introduzida a teoria que foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. Dessa forma, o leitor poderá se encontrar mais próximo do entendimento do projeto, tornando-se assim, apto para usufruir desse conhecimento.

3.1 Fontes de Energia

O ser humano tem como maior interesse nas fontes de energia produzir eletricidade para atender a sua demanda, da qual ele é muito dependente. Observa-se que o Sol é a principal dentre elas e corresponde a toda energia utilizada, já que as outras fontes se originam dele. Por exemplo, a energia da biomassa se dá pela energia do Sol captada pelas plantas através da fotossíntese; a energia dos ventos se dá pela aquecimento do ar, gerando diferença de pressão na atmosfera; e assim por diante.

Elas podem ser classificadas de diversas formas, porém, a que mais se adequa neste trabalho é a divisão entre renováveis e não-renováveis. Por energia renovável, entende-se aquela que não se baseia em recursos que são limitados na natureza, como os recursos fósseis. Dessa forma, a energia solar é uma fonte de energia renovável, ou seja, inesgotável [12].

Como exemplos de energias renováveis, pode-se citar: a energia hidrelétrica, que se dá ao aproveitar o fluxo normal das águas de um rio para que elas girem uma turbina, que aciona um gerador; a energia eólica, que há muito tempo é utilizada pelo homem em moinhos, barcos à vela, dentre outros, e que faz uso da energia do vento para girar pás de turbinas acopladas a geradores elétricos; a energia oceânica, que se aproveita da energia contida nos movimentos das ondas no mar; e a energia solar fotovoltaica, objeto de estudo deste trabalho [6].

Vale constar que o conceito de energia renovável está sempre muito ligado ao de energia limpa, já que a produção de eletricidade a partir de fontes desse tipo

não libera resíduos na natureza, o que poderia causar danos ao meio-ambiente e ao próprio ser humano. Ocorre que construir usinas, mesmo que sejam de produção de energia proveniente de fontes renováveis, pode gerar impactos relevantes. Usinas hidrelétricas, como se pode ilustrar, podem alterar o ecossistema de uma região ao se construir as barragens necessárias para seu funcionamento. Deve-se, portanto, levar sempre em consideração o impacto ambiental ao se produzir energia.

3.2 O Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico, representado na Figura 3.1, foi observado pela primeira vez por Bequerel em 1839. Ele se caracteriza pela emissão de elétrons de um material, geralmente metálico, quando exposto à radiação eletromagnética (luz). Essa radiação é constituída por ondas de diferentes frequências e comprimentos. Portanto, acreditava-se que o elétron fosse liberado de uma superfície metálica após armazenar energia suficiente para isso. Logo, por essa visão, era de se esperar que os elétrons emitidos possuíssem maior energia cinética ao se intensificar a radiação eletromagnética incidente sobre o metal. No entanto, o que ocorre é que uma maior quantidade de elétrons é liberada.

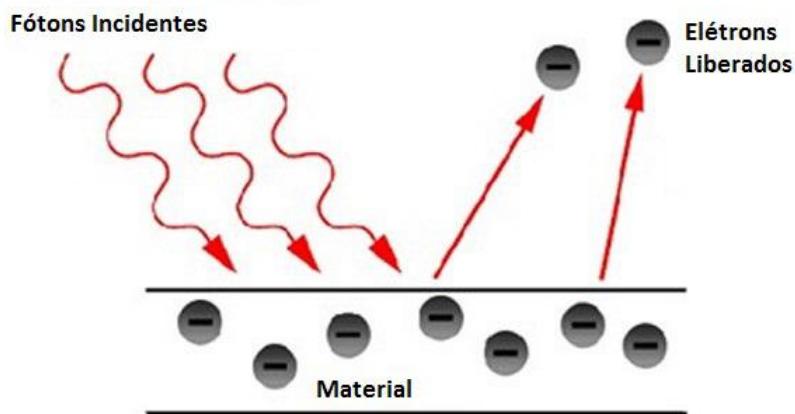


Figura 3.1: O efeito fotoelétrico. Fonte: www.danielnugroho.com (adaptado).

Em 1905, Albert Einstein formalizou os estudos sobre o efeito fotoelétrico e chegou à conclusão que a luz pode ser interpretada tanto como onda quanto partícula, chamada de fóton. Em seu estudo, propôs que um fóton pode ter energia suficiente para ejetar um elétron da banda de valência de um átomo e este adquirir velocidade (energia cinética) ao ser liberado. A equação 3.1 evidencia este fato.

$$E = hf = \phi + E_c^{max}. \quad (3.1)$$

A energia necessária para remover um elétron da camada de valência de um

átomo, ϕ , mas a energia cinética máxima desse elétron, E_c^{max} , é igual à energia da onda eletromagnética, E , que, por sua vez, se dá pelo produto da constante de Planck, h , pela frequência da onda, f , quando esta incide sobre o material. Essa relação é conhecida como “Equação de Planck-Einsten”.

Em ϕ , está intrínseco que

$$\phi = hf_0, \quad (3.2)$$

no qual f_0 é a frequência mínima da onda eletromagnética incidente necessária para o elétron ser expelido; e em E_c^{max} que

$$E_c^{max} = \frac{1}{2}mv_m^2, \quad (3.3)$$

no qual m representa a massa do elétron expelido e v_m sua velocidade.

De acordo com a equação 3.1, a energia cinética dos elétrons liberados aumenta quando incide sobre o material fótons com energia maior, ou seja, ondas eletromagnéticas com uma frequência maior. Como

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (3.4)$$

(onde c é a velocidade de propagação da luz e λ seu comprimento de onda) os elétrons emitidos possuirão mais velocidade quanto menor forem seus comprimentos de onda. Isso significa que, por exemplo, a componente azul do espectro visível fará com que elétrons sejam expelidos do material metálico com maior velocidade. O contrário ocorrerá com a luz vermelha, como se pode concluir a partir da Figura 3.2.

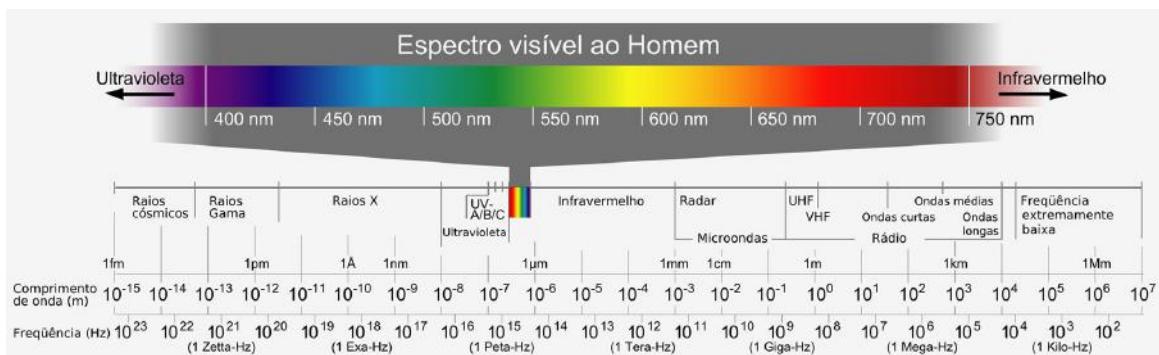


Figura 3.2: O espectro da luz. Fonte: www.biogeolearning.com.

Conclui-se que o efeito fotoelétrico ocorre quando fótons que incidem sobre um material metálico apresentam energia suficiente para retirar elétrons da camada de valência do átomo em que se encontram. Esses elétrons são liberados do material com alguma velocidade, dependendo da energia a que foram submetidos.

3.3 O Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico e químico no qual uma célula fotovoltaica converte luz em eletricidade. Ele está diretamente relacionado ao efeito fotoelétrico mas, diferentemente dele, este se dá em materiais semi-condutores, sendo que o mais utilizado para compor células fotovoltaicas é o silício (Si), onde cada átomo possui quatro elétrons em sua banda de valência. Os átomos se ligam entre si formando uma rede cristalina.

Para se entender melhor o efeito fotovoltaico é necessário conhecer os materiais semi-condutores, que são divididos entre dopados e não-dopados.

3.3.1 Semi-condutores Não-dopados

Os semi-condutores não-dopados são aqueles cujos cristais são formados apenas por um elemento químico, podendo ser exemplificados pelo cristal de silício, representado na Figura 3.3. Neste caso, esse tipo de material se comporta como um excelente isolante elétrico a baixas temperaturas próximas do zero absoluto, já que assim, os orbitais eletrônicos dos átomos estão sempre completos. Em temperaturas maiores, os elétrons da banda de valência do átomo possuem mais energia para transitarem à banda de condução. Dessa forma, alguns elétrons ficam livres gerando, estruturalmente, lacunas no cristal. Essas lacunas passam a possuir a característica de atrair cargas negativas, ou seja, se comportam como íons positivos [7].

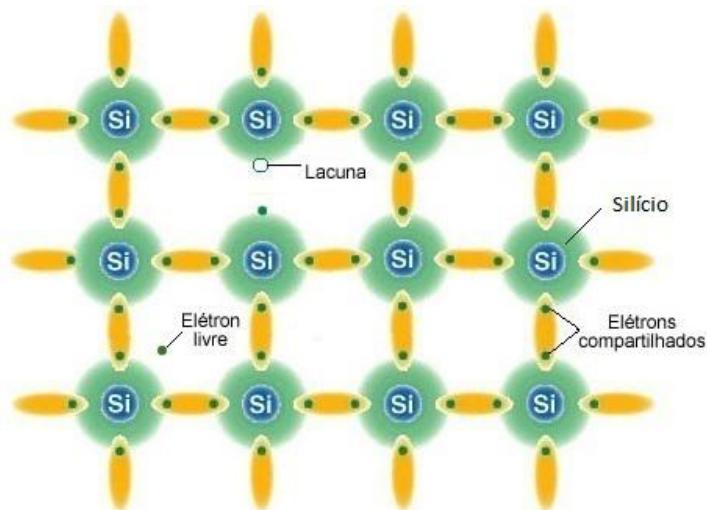


Figura 3.3: Cristal de silício não-dopado.

Fonte: www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica (adaptado).

3.3.2 Semi-condutores Dopados

Os semi-condutores dopados são aqueles que recebem em sua estrutura outros elementos químicos para que o cristal, conforme representado na Figura 3.3, se comporte de maneira diferente quando comparado àqueles não-dopados. Uma estrutura dopada pode ser dividida, ainda, nos tipos *n* ou *p*. Quando o elemento químico dopante for da família 3A da tabela periódica, diz-se que o dopante é do tipo *p* e quando for da família 5A, dopante tipo *n*.

Os dopantes do tipo *n* são também conhecidos como doadores de elétrons. Isso acontece porque o semi-condutor terá um excesso de elétrons quando comparado ao número de lacunas. O fósforo (P) é um elemento da família 5A e, portanto, um dopante desse tipo. No cristal semi-condutor dopado com fósforo, o elétron em excesso pertencente ao átomo do dopante ficará fracamente ligado a ele. Dessa forma, esse elétron precisa de pouca energia para se deslocar à banda de condução, diferentemente do semi-condutor não-dopado, onde essa energia teria que ser maior.

Se, por outro lado, o dopante for um elemento químico da família 3A, como é o caso do boro (B) haverá um excesso de lacunas no cristal. Este dopante fica sendo conhecido como do tipo *p* e é caracterizado como receptor de elétrons. De forma análoga ao dopante da família 5A, o excesso de lacunas faz com que, com pouca energia, um elétron seja atraído para preenchê-lo.

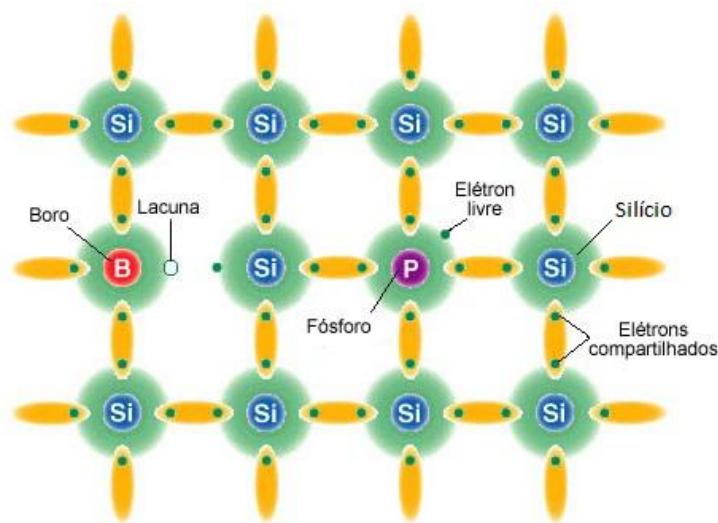


Figura 3.4: Cristal de silício dopado: tipos *n* e *p*.

Fonte: www.infoescola.com/quimica/dopagem-elettronica (adaptado).

3.4 Células Fotovoltaicas

Células fotovoltaicas são os instrumentos que compõem um módulo solar, cujo papel é o mais importante deste trabalho.

3.4.1 Princípio de Funcionamento

Uma célula fotovoltaica possui em sua estrutura o que se chama de junção *pn*. Ela se caracteriza por uma região em que há semi-condutores dopantes dos dois tipos colocados juntos, onde cada um deles fica separado em uma metade. Em cada extremo dessa junção é posicionada uma placa condutora, que facilita o movimento externo ao conjunto das cargas elétricas.

Ocorre que os elétrons livres do lado em que há o semi-condutor do tipo *n* passam para o lado do tipo *p* e encontram as lacunas, que são rapidamente preenchidas por eles. Isso faz com que haja acúmulo de elétrons em um lado da junção, ficando este negativamente carregado e uma diminuição de elétrons do outro, ficando eletricamente positivo. Esse acúmulo de cargas gera um campo elétrico que dificulta o trânsito dos elétrons de um lado pra outro da junção, saturando quando elétrons livres remanescentes do lado do semi-condutor do tipo *n* ficam impossibilitados de transitar para o lado do tipo *p* [8].

Quando uma célula fotovoltaica é exposta à radiação e sobre ela incidem fôtons com energia maior que a de *gap* (energia de separação entre a banda de valência e a de condução), há a formação de pares de elétrons e lacunas, ou seja, as cargas ficam polarizadas na junção. Na presença de um campo elétrico, as cargas são acelerados gerando, assim, uma corrente através dela. Na presença de fios condutores nas extremidades carregadas da célula fotovoltaica em conjunto com uma carga, haverá uma circulação externa de elétrons e, no caso da carga ser uma lâmpada, ela irá acender. Esse fenômeno define o efeito fotovoltaico, a geração de energia elétrica através da energia solar com o uso de uma célula fotovoltaica, como mostra a Figura 3.5.

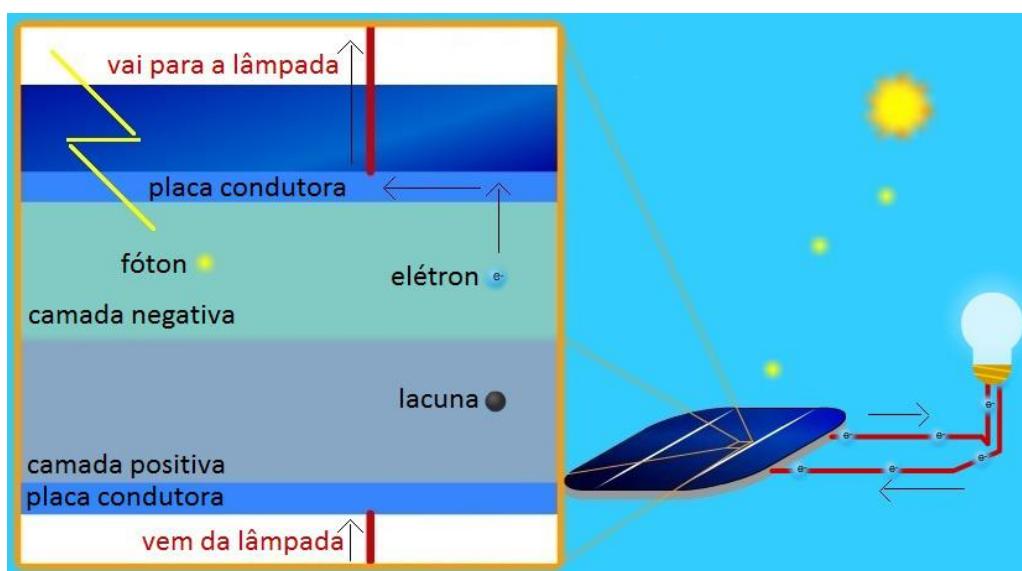


Figura 3.5: O efeito fotovoltaico.

Fonte: nanosense.sri.com/activities/cleanenergy/solarcellanimation.swf.

3.4.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

Hoje em dia, existem diferentes tipos de células fotovoltaicas. A Tabela 3.1 faz uma comparação entre essas tecnologias, sendo que as mais comuns encontradas no mercado são as de silício mono e policristalino e as de filmes finos. As de silício monocristalino são as mais eficientes dentre as que são produzidas em maior quantidade e as que estão disponíveis no mercado. Elas alcançam valores de eficiência de 18% porém, possuem um custo de produção mais elevado do que as dos outros tipos.

Tabela 3.1: Comparação entre alguns dos diversos tipos de células fotovoltaicas.

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações, Gradella et al.

MATERIAL	EFICIÊNCIA EM LABORATÓRIO	EFICIÊNCIA DA CÉLULA COMERCIAL	EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS COMERCIAIS
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Silício cristalino de filme fino	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silício micro-morfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%

O silício policristalino é formado por diversos cristais e é usado na fabricação de algumas células solares, com um custo menor de produção. Os valores nominais de rendimento que esse tipo de célula pode atingir variam de 13% a 15%, o que pode ser compensado por seu baixo custo.

A tecnologia de células de filmes finos é mais recente e apresenta um custo de produção menor ainda, já que não há tanto desperdício em seu processo de fabricação e o consumo de energia para tal é pequeno. Uma vantagem desse tipo de célula é que elas aproveitam melhor a radiação quando esta é pouca ou quando é do tipo difusa (a que não incide diretamente no alvo). Além disso, a temperatura não influencia tanto no rendimento quanto nas outras tecnologias.

Existem vários tipos de módulos de filmes finos. O de silício amorfo apresenta uma baixa eficiência energética que diminui durante os primeiros meses de uso,

devido à degradação provocada pela luz. As células híbridas são combinações das tradicionais com as de filmes finos. Elas são mais eficientes em altas temperaturas e consomem pouca energia em sua fabricação, o que as torna mais atraentes.

As células de telureto de cádmio (CdTe) e CIGS (cobre-índio-gálio-selênio) são as que apresentam melhor eficiência na tecnologia de filmes finos. Ainda assim, as de CdTe não alcançaram o mercado em grande escala porque enfrentam problemas em sua produção, já que o cádmio é tóxico e o telúrio é escasso na natureza. O mesmo ocorre com as células CIGS, só que dessa vez devido ao seu custo elevado de fabricação.

A tecnologia que é usada nos painéis fotovoltaicos deste trabalho é do tipo silício policristalino, já que apresenta um menor custo de aquisição.

3.5 Características Elétricas de um Painel Fotovoltaico

Um painel fotovoltaico é formado por um conjunto de células fotovoltaicas conectadas eletronicamente, podendo ter 36, 54 ou 60 delas, dependendo de sua classe de potência. Esse número tem uma relação direta com a quantidade de energia gerada, uma vez que mais células em um módulo fazem com que estes possuam uma área de captura maior de radiação e, portanto, produzam mais energia.

3.5.1 Corrente e Tensão

Uma fonte elétrica convencional não se compara a um PV. Ele não fornece uma tensão constante em seus terminais. Ela depende de valores de corrente e vice-versa. O painel irá operar em um ponto que depende da carga que está conectado a ele. Se ela for do tipo cuja demanda por corrente elétrica é alta, a tensão que o painel fornece será menor, por exemplo. Sendo assim, a Figura 3.6 mostra, teoricamente, como se comportam essas variáveis em um PV.

Estão em destaque no gráfico dessa figura, dois pontos em especial. São os pontos de corrente de curto-circuito e de tensão de circuito aberto. A corrente de curto-circuito é aquela que acontece quando se põe em contato os terminais do PV. Esse valor de corrente representa o máximo que esta variável pode assumir e, nesse caso, a tensão elétrica é nula.

A tensão de circuito aberto representa o máximo valor de tensão que o painel pode fornecer, que ocorre quando não há carga alguma conectada a seus terminais, ou seja, quando eles estão abertos. Nesse ponto, não há corrente passando pelos terminais, o que é bem óbvio de se observar já que os terminais estão abertos.

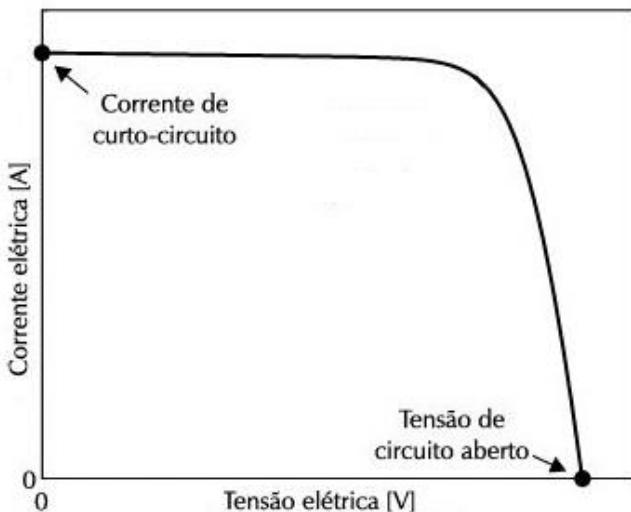


Figura 3.6: Curva característica de corrente e tensão de um painel fotovoltaico.

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações, Gradella et al.

3.5.2 Potência

Após uma discussão sobre corrente e tensão, pode-se verificar o comportamento da potência do módulo em função da tensão. Os valores em volts e ampères combinados e fornecidos pelo painel fotovoltaico caracterizam sua potência. Essa medida é importante porque é ela que vai indicar a quantidade de energia a ser gerada.

A Figura 3.7 mostra o gráfico característica de como se comporta a potência mediante a tensão. Dessa vez, além dos ponto de corrente de curto-circuito e de tensão de circuito aberto, está em destaque o ponto de máxima potência (MPP). Ele se refere ao momento em que os valores de corrente e tensão, quando multiplicados, retornam um valor máximo. Nesse ponto, há uma corrente de máxima potência e uma tensão de máxima potência. O MPP é o ponto em que o painel deve estar operando para que a conversão energética seja a mais eficaz.

3.6 Grandezas de Influência no Rendimento

O rendimento de um painel fotovoltaico é calculado através dos valores de tensão e corrente que ele fornece. O produto de uma combinação dessas duas variáveis fornece valores de potência que, no caso, representam o quanto de energia será convertida. Portanto, baseado no princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica, a radiação é um fator que influencia no rendimento. A temperatura também o faz, porém, de forma diferente.

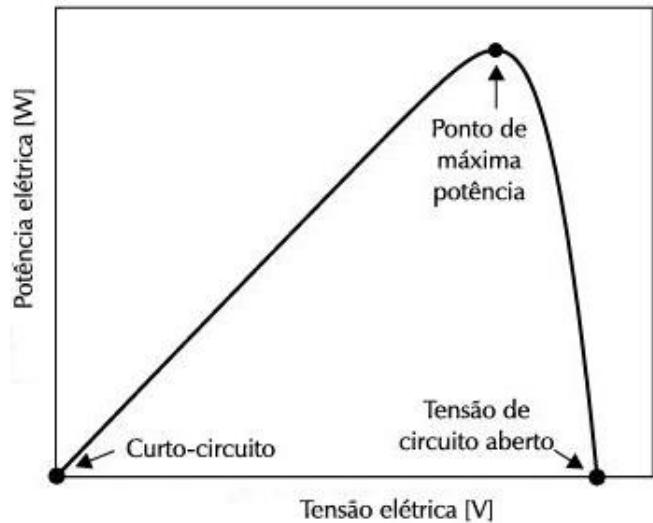


Figura 3.7: Curva característica de potência e tensão de um painel fotovoltaico.

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações, Gradella et al.

3.6.1 Influência da Temperatura

Painéis fotovoltaicos recebem muita energia do Sol em dias de céu limpo e, nesse caso, costumam esquentar muito. Ao ficarem bem quentes, eles tendem a ter seus valores de tensão diminuídos e, consequentemente, sua potência. Já a corrente elétrica não varia com a temperatura. Portanto, o que faz a potência variar quando

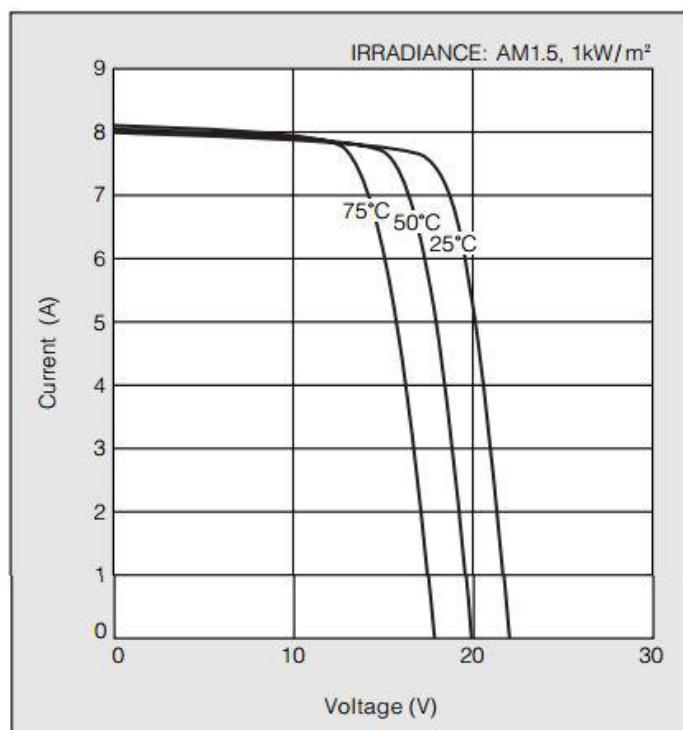


Figura 3.8: Curva corrente *vs* tensão característica de um PV para diferentes valores de temperatura. Fonte: Folha de dados do módulo KC130TM da Kyocera.

uma célula fotovoltaica aquece é a tensão, exclusivamente.

Na folha de dados do painel utilizado neste trabalho verifica-se esse fato. Nela existe um gráfico teórico que ajuda a entender a influência da temperatura no rendimento de painéis fotovoltaicos.

Na Figura 3.8, para uma radiação constante de $1kW/m^2$, observa-se que, a $25^\circ C$ a tensão ultrapassa os 20V. Em $50^\circ C$ a tensão já não ultrapassa esse valor e, a $75^\circ C$, diminui mais ainda. Isso evidencia o fato de que o aumento da temperatura influencia na queda do rendimento do módulo.

3.6.2 Influência da Radiação

A radiação que incide no painel fotovoltaico também tem influência em seu rendimento, isso porque a corrente elétrica que o PV fornece depende da radiação solar incidente nas suas células. No caso do gráfico da Figura 3.9, o estudo teórico foi feito pela empresa montadora do painel, mantendo constante o valor de sua temperatura, $25^\circ C$. Verifica-se que, valores menores de radiação incidindo no painel vão causar valores menores de corrente, o que implicará na redução do rendimento do painel. Essa diminuição na radiação pode ser causada por uma mudança no tempo; um dia chuvoso ou, por exemplo, uma nuvem passageira que faz uma sombra no PV.

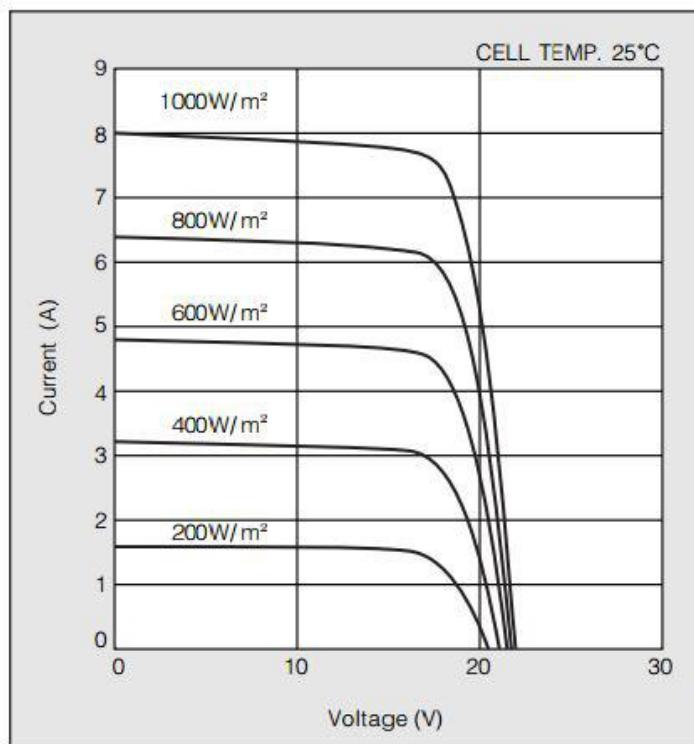


Figura 3.9: Curva corrente *vs* tensão característica para diferentes valores de radiação. Fonte: Folha de dados do módulo KC130TM da Kyocera.

3.7 Orientação dos Módulos Fotovoltaicos

Os raios solares incidem sobre a Terra em linha reta e ao entrarem na atmosfera terrestre, sofrem difusão e são desviados. Isso caracteriza uma perda na energia gerada pelo Sol e que se direciona ao planeta.

A radiação incidente no planeta varia de acordo com a época do ano, com a posição dos astros no espaço e com uma determinada localização na Terra. Portanto, o estudo da incidência dos raios solares é importante para se saber como aproveitá-lo da melhor forma.

3.7.1 Ângulo Azimutal

O ângulo de azimute corresponde àquele que se relaciona com o norte geográfico do planeta, dada a posição do Sol no momento. Sabe-se que o Sol nasce no leste e se põe no oeste e, portanto, a variação no ângulo de azimute se dá de acordo com as horas do dia. Sendo assim, para uma instalação básica de um painel fotovoltaico, deve-se levar em consideração a posição do Sol.

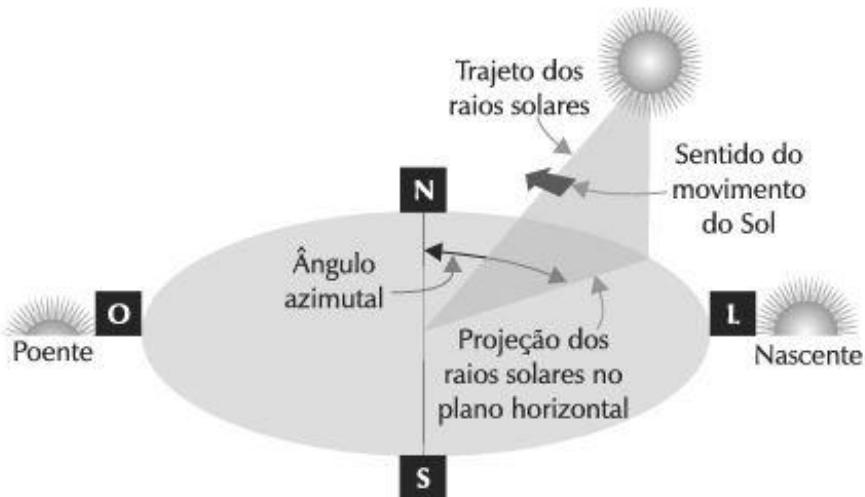


Figura 3.10: Esquema que identifica o ângulo azimutal.

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações, Gradella et al.

Na Figura 3.10, vê-se os pontos cardinais representados e a indicação do movimento do Sol durante o dia, para o hemisfério sul. O ângulo azimutal é o ângulo entre o norte verdadeiro e a projeção dos raios solares no plano horizontal.

Com relação ao ângulo azimutal, a instalação de um painel fotovoltaico deve ser feita de forma que sua face captadora esteja voltada para o norte geográfico. Dessa forma, tanto os raios solares da manhã quanto os da tarde serão direcionados ao painel.

3.7.2 Ângulo de Elevação

O ângulo de elevação solar é aquele que relaciona a altura do Sol com relação ao plano em que se encontra um observador na superfície terrestre. Esse ângulo depende da localização geográfica do observador. Por exemplo, para uma pessoa que se encontra sobre a Linha do Equador, o Sol apresentará alturas maiores. Já para um observador que se localiza próximo a um polo terrestre, o Sol apresentará alturas menores.

A Figura 3.11 mostra o ângulo de elevação do Sol, representado por γ_s , e o ângulo de azimute, representado por θ_a , combinados em um mesmo esquema.

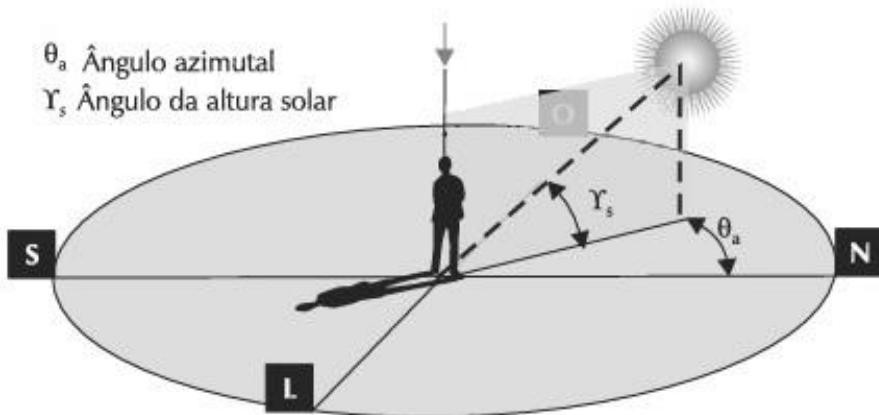


Figura 3.11: Esquema que identifica o ângulo de elevação.

Fonte: Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações, Gradella et al.

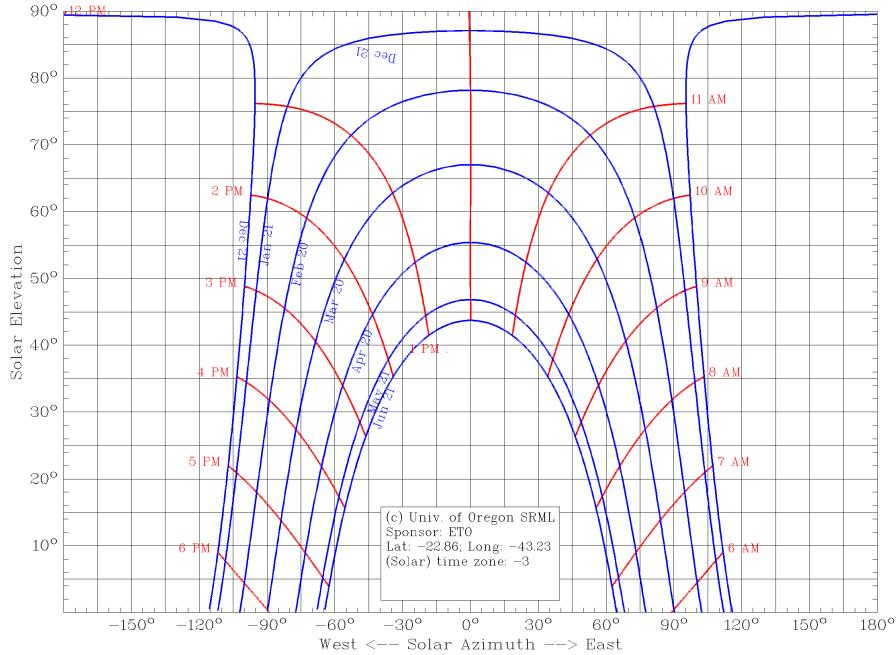
Com relação ao ângulo de elevação, a instalação de um painel fotovoltaico deve ser feita de forma que os raios incidentes o estejam fazendo de forma perpendicular. Sendo assim, o ângulo de elevação de um PV deve ser ajustado de acordo com o ângulo de elevação do Sol, a cada dia e para a localização geográfica em questão.

3.7.3 Gráficos de Posição Solar

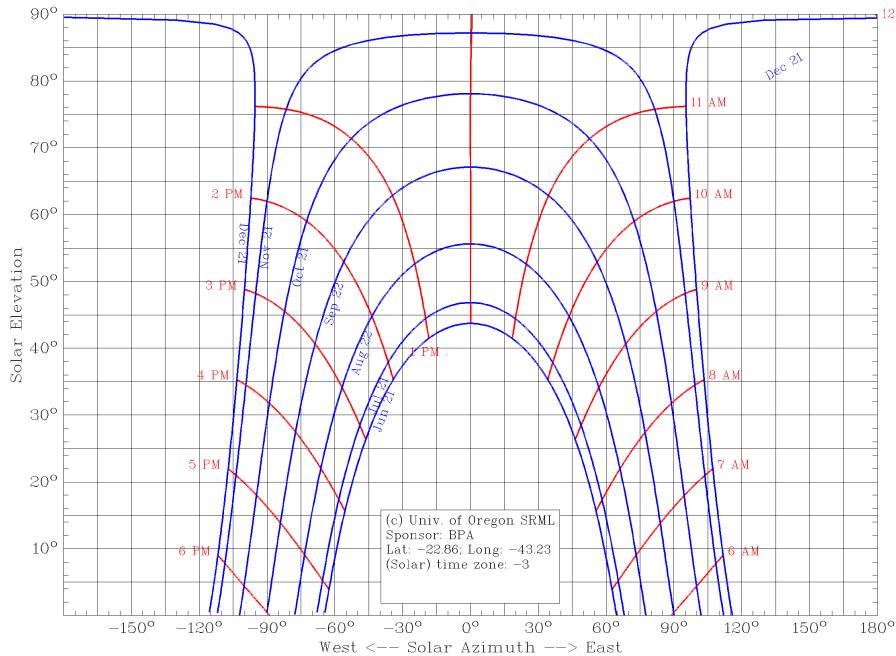
Existem gráficos informativos sobre a posição do Sol em uma determinada localização geográfica, que mostram os ângulos de elevação e azimute combinados.

Na Figura 3.12a, o gráfico utiliza dados referentes aos meses de janeiro a junho. Já na Figura 3.12b eles se referem aos meses de julho a dezembro. Todos em relação à localidade da cidade do Rio de Janeiro. Analisando o primeiro caso, as curvas em azul representam a posição do Sol em função dos ângulos de azimute e elevação. Nota-se que os meses de verão apresentam os dias mais longos e a elevação do Sol chega a quase 90° no solstício de verão. As curvas em vermelho se referem às horas do dia, evidenciando que a maior elevação do Sol ocorre ao meio-dia.

Na figura seguinte pode-se tirar as mesmas conclusões. Dias de inverno são dias mais curtos; os ângulos de azimute não variam tanto quanto no verão. Além disso, pode-se observar que no inverno, mesmo ao meio-dia, a elevação solar não passa dos 50°.



(a) Ângulos de azimute e elevação do Sol para o primeiro semestre do ano.



(b) Ângulos de azimute e elevação do Sol para o segundo semestre do ano.

Figura 3.12: Posição do Sol ao longo de um ano, no Rio de Janeiro.
Fonte: Universidade de Oregon – Solar Radiation Monitoring Laboratory.

Portanto, saber a posição do Sol é importante para instalar um painel fotovoltaico

ou um sistema gerador. Dessa forma, o estudo pode evoluir para um ponto em que sistemas fotovoltaicos empreguem em seus painéis uma funcionalidade para rastrear a posição solar (uma vez que se tenha esta informação) e, assim, melhorar a captação da radiação incidente e gerar mais energia.

Capítulo 4

Descrição do Sistema

Para se conduzir os experimentos relativos a esse trabalho, todo o sistema concentrador, que até então se encontrava no laboratório em fase de preparação, precisou ser levado até o terraço do Centro de Tecnologia (CT) da UFRJ. Nesse local, já se encontrava um painel fotovoltaico previamente instalado, também pertencente ao LIF. Portanto, lá existem dois sistemas fotovoltaicos que, na verdade, ao trabalharem em conjunto, representam um só. Em um deles é implementado o sistema tradicional, no qual o painel fica voltado para o norte e com um ângulo de inclinação. O outro é o sistema concentrador com espelhos. A localização de ambos está evidenciada na Figura 4.1. O ponto em vermelho de número 1 diz respeito à localização do sistema tradicional, enquanto que o de número 2 ao sistema concentrador.



Figura 4.1: Foto de satélite que mostra a localização dos sistemas.

1) Tradicional; 2) Concentrador. Fonte: Google Earth.

Eles foram instalados próximos um ao outro não só por questões de facilidade de trabalho, mas também por necessidade e para uma caracterização confiante dos

dados, uma vez que ambos os sistemas estão submetidos às mesmas condições.

Cada sistema utiliza um painel fotovoltaico colocado sobre suas estruturas, totalizando dois no projeto como um todo. Ambos são da marca KYOCERA, modelo KC130TM. Ele possui as seguintes características apresentadas pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características elétricas dos painéis fotovoltaicos utilizados no terraço.

DESEMPENHO ELÉTRICO SOB CONDIÇÃO PADRÃO DE TESTE

Potência Máxima	130W
Tensão de Máxima Potência	17,6V
Corrente de Máxima Potência	7,39A
Tensão de Circuito Aberto	21,9V
Corrente de Curto-circuito	8,02A

Esse é um painel do tipo policristalino (ou multicristalino). Painéis desse tipo apresentam um espectro que aceita faixas de radiação com comprimentos de onda variando, principalmente, de 500 a 1100 nanometros aceitando, também, uma parte do infra-vermelho. Comparando com o espectro da radiação global do Sol, (que é a razão entre a radiação incidente em uma superfície por unidade de área e por intervalo de comprimento de onda, expressa em watt por metro quadrado por nanometro, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$) verifica-se que o painel em questão consegue absorver

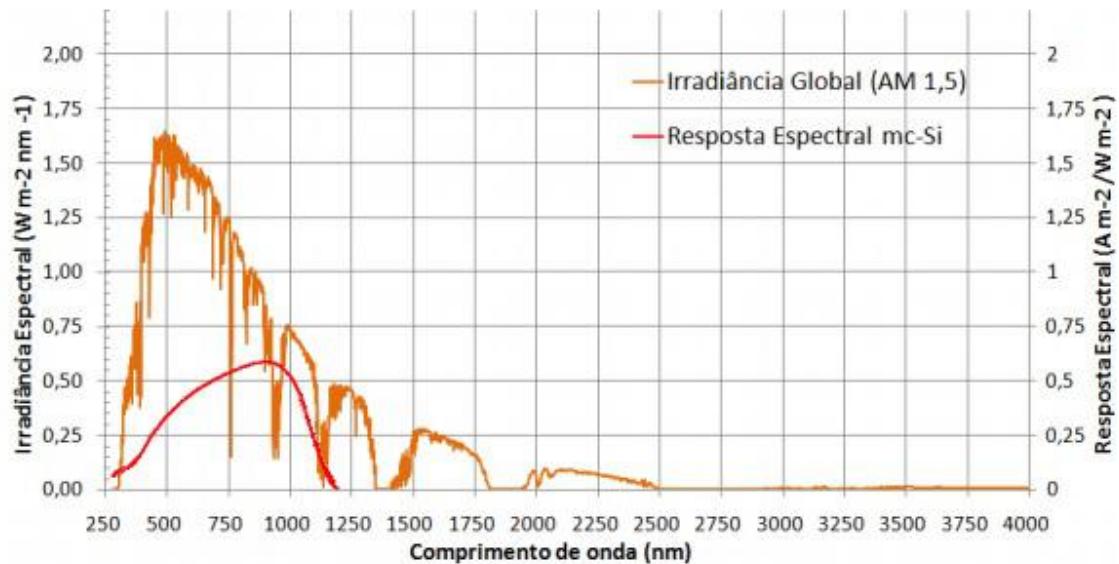


Figura 4.2: Espectros de irradiância do painel utilizado e da luz do Sol.

Fonte: CONIC – SEMESP.

grande parte da faixa da radiação incidente que possui a maior energia. Isso é evidenciado na Figura 4.2. Na cor laranja está representada a curva espectral da radiação do Sol para a massa de ar (AM) 1.5, correspondente a países de zonas temperadas. Em vermelho, a curva espectral característica de um painel de silício policristalino.

4.1 Sistema Tradicional

O sistema tradicional é simples e conta com a utilização de um painel fotovoltaico da marca KYOCERA, modelo KC130TM, que se trata do mesmo PV do caso do sistema concentrador. Ele se encontra sobre uma estrutura metálica resistente que o sustenta a uma certa altura onde ele é posicionado horizontalmente, conforme mostra a Figura 4.3. Sua face captadora, de acordo com o que foi visto na teoria deste trabalho, precisa estar voltada para o norte, onde, nessa posição, o ângulo azimutal é zero.



Figura 4.3: Sistema fotovoltaico tradicional.

Nota-se, ainda, que ele apresenta um ângulo de inclinação correspondente à latitude em que se localiza a cidade do Rio de Janeiro, 22° . Este valor não varia no sistema, já que a estrutura é fixa e não há uma funcionalidade que faça esse ângulo mudar. No entanto, sabe-se que o Sol varia sua altura ao longo de um dia. Portanto, esse valor constante no painel não está acompanhando as variações do Sol. Dessa forma, haverá momentos em que a radiação solar incidente no PV será pouca. Mesmo assim, escolher a latitude como o ângulo de inclinação do painel é uma boa definição. Além disso, o ângulo de azimute desse módulo, assim como o de elevação, não varia e, portanto, o Sol também não é rastreado nesse eixo.

4.2 Sistema Concentrador

O sistema concentrador é o principal objeto de estudo deste trabalho. Ele é composto de um painel fotovoltaico da marca KYOCERA, modelo KC130TM colocado em cima de um suporte. Além disso, há uma estrutura que possui três espelhos simples que, nesse caso, são o primeiro elemento captador de radiação. Somente depois de refletida é que a luz alcança a face captadora do PV. Para isso, os espelhos devem estar em uma posição específica para melhor captar a radiação incidente e, além disso, buscar refletir toda essa radiação no painel. De forma a atender essa necessidade, é realizado um rastreamento do Sol, variando nos espelhos os dois graus de liberdade inerentes a sua posição.

Como pode ser visto na Figura 4.4, os espelhos estão dispostos lado a lado na direção leste-oeste, voltados para o norte. O painel também está no mesmo eixo que os espelhos, porém, com sua face captadora virada para o sul. Nesta figura, observa-se também setas vermelhas numeradas. A de número 1 aponta para o motor que varia o ângulo azimutal do eixo dos espelhos, enquanto que a de número 2 indica um dos três motores de elevação pertencentes a cada espelho.

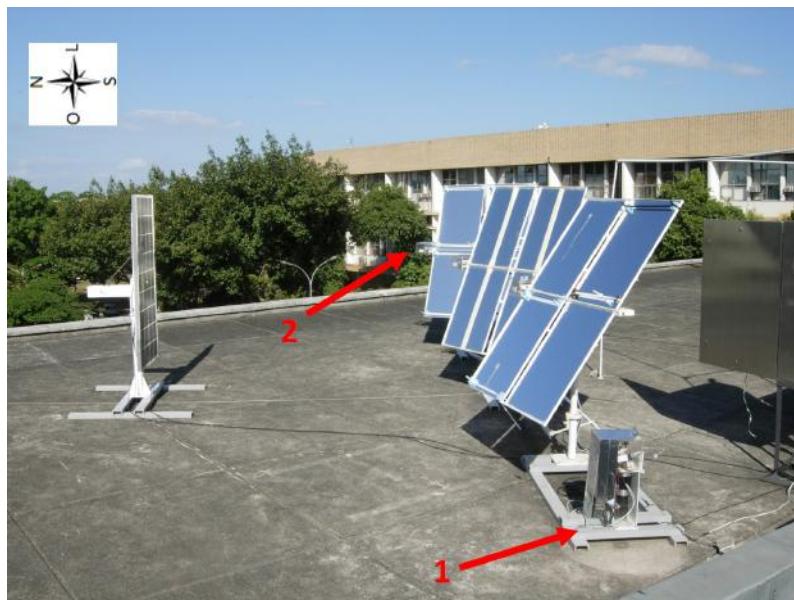


Figura 4.4: Sistema fotovoltaico concentrador. 1) Motor de azimute;
2) Motor de elevação.

Esses dois graus de liberdade da estrutura dos espelhos permitem que o sistema os force a acompanharem a posição do Sol no céu a cada momento.

4.2.1 Rastreamento Solar

O rastreamento solar tem como função aumentar a incidência de radiação no PV. Dessa forma, como o sistema possui três espelhos, é de se esperar que a radiação

incidente no painel seja igual a três vezes a radiação direta do Sol. Ele funciona como mostra a Figura 4.5.

Ao nascer o Sol, o rastreamento começa a ser realizado e todos os espelhos se voltam para o leste. Cada um deles assumirá um ângulo de elevação também. Ele “percorre” a linha pontilhada da figura e, ao meio-dia, estará localizado em seu ponto máximo de elevação no céu. A essa hora, o ângulo azimutal é zero. No fim da tarde e início da noite, todos os espelhos se viram para oeste, onde o Sol se põe. A partir daí o sistema é desligado e ligado novamente no dia seguinte, repetindo todo esse processo.

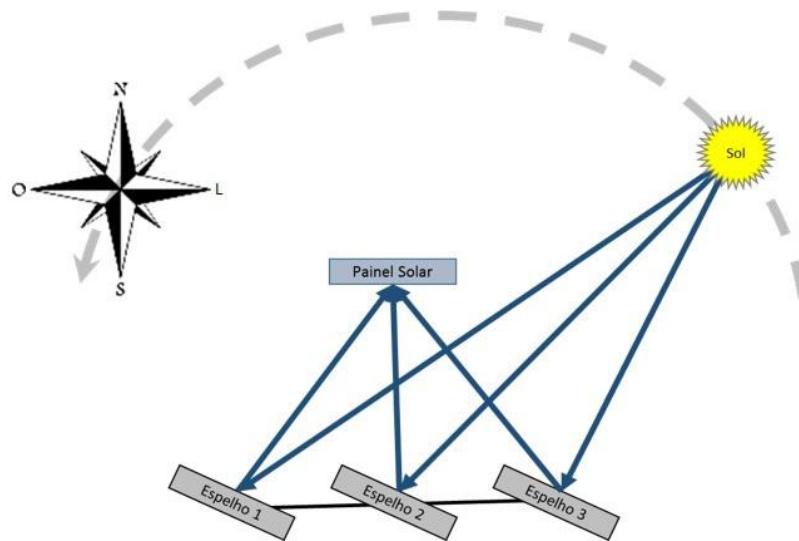


Figura 4.5: Esquema do funcionamento do rastreamento solar.

Para os motores alterarem os ângulos de azimute e elevação, é necessário saber a respeito da posição solar. Dessa forma, eles podem receber um sinal e atuar na estrutura. Existe um algoritmo implementado que informa ao sistema a posição do Sol a cada momento, todos os dias, que se encontra no computador que fica na Unidade de Monitoramento e Controle (UMC). O computador envia esses dados para o Módulo de Controle (MC) onde existe um sistema microprocessado que

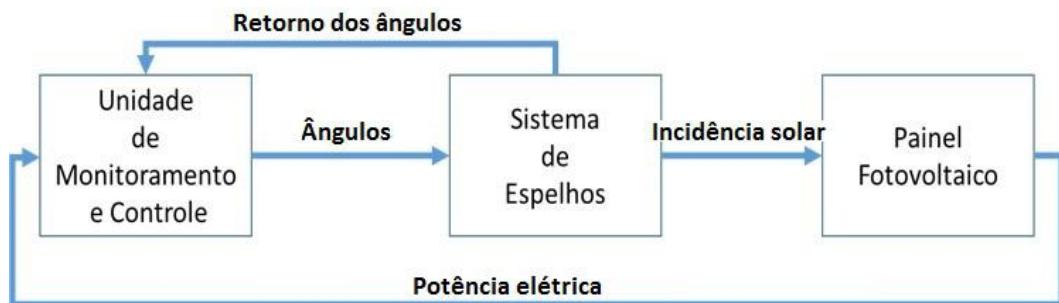


Figura 4.6: Diagrama de blocos do sistema de rastreamento solar.

fornecendo aos motores os sinais necessários para movimentar os ângulos de azimute e elevação da estrutura.

O valor atual da posição angular das duas variáveis da estrutura também são informados ao computador para, se ocorrer uma perturbação em um dos ângulos e também para fins de conferência, que haja uma correção. O diagrama da Figura 4.6 mostra de forma mais clara todo esse princípio de funcionamento do sistema.

Foi produzido um programa com o objetivo de criar uma Interface Homem Máquina (IHM) onde o operador pode visualizar a posição do Sol informada pelo algoritmo e, além disso, verificar se os ângulos de elevação e de azimute dos espelhos estão de acordo com os valores reais. Outras funcionalidades, como a de teste do sistema e a de ajuste de parâmetros para a época do ano em que ocorre o horário de verão, também estão presentes. A Figura 4.7 mostra a janela dessa interface.



Figura 4.7: Janela de interface com o operador do programa de rastreamento.

4.3 Aquisição de Dados

Para o estudo ser realizado, é necessário colher vários dados envolvidos no projeto. É preciso saber sobre a radiação que chega do Sol na superfície terrestre, a tensão elétrica fornecida pelo painel fotovoltaico assim como sua corrente, a temperatura que se encontra o painel e a temperatura ambiente. Todos esses dados são fornecidos por sensores colocados em posições que favoreçam suas medições.

Ao serem adquiridos pelos sensores, os sinais referentes às variáveis medidas por eles passam por um circuito de aquisição e condicionamento, cujo desenho esquemático está representado na Figura 4.8. Eles são adquiridos através de conectores colocados na Placa de Circuito Impresso (PCB). Esses sinais são tratados e direcionados ao microcontrolador ARDUINO UNO, que se encontra na UMC. Ele funciona a partir de um *firmware* produzido que, ao receber os sinais nos canais A/D e convertê-los para digital, processa-os e informa na janela de comunicação serial os

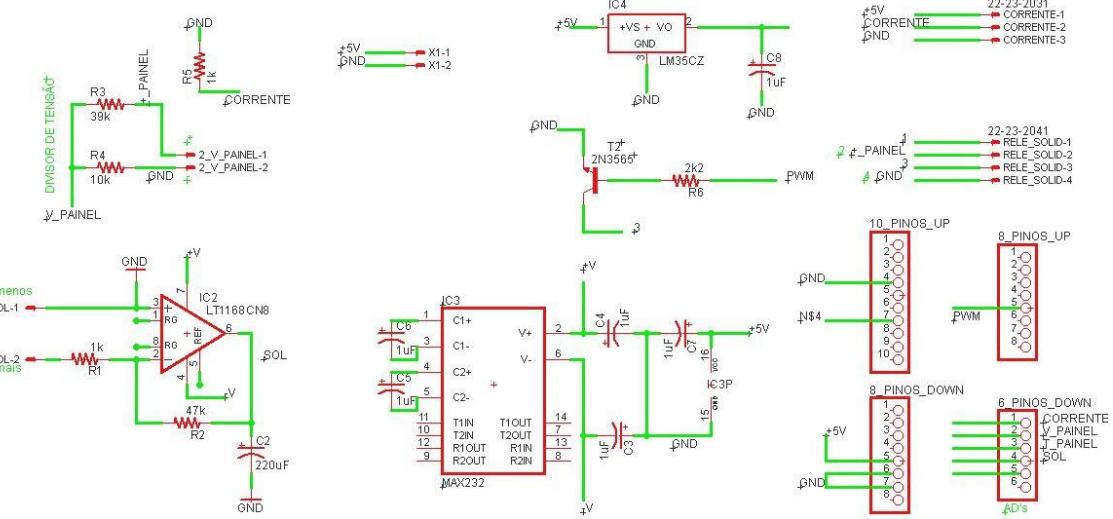


Figura 4.8: Desenho esquemático do circuito de aquisição e condicionamento de sinal.

valores digitais correspondentes. Esses valores poderão ser usados futuramente para fins de calibração dos instrumentos de medição.

Existem ainda alguns dados que são monitorados diretamente de uma estação meteorológica, da marca DAVIS, modelo VANTAGE PRO 2, que fornece valores confiáveis de diversas variáveis (Figura 4.9). Por serem confiáveis, eles são usados na calibração de instrumentos. Ela também fica localizada no terraço do CT da UFRJ.

Ao se fazer as devidas calibrações, os dados são processados por um programa feito em linguagem python, que os coloca em um formato adequado em arquivos de texto para, em seguida, serem devidamente armazenados em um servidor local. Esse processo é feito continuamente e os arquivos de texto vão sendo criados. Somente para o *upload* dos dados para o servidor é que a operação é feita manualmente.

4.3.1 Radiação

Dentre os dados adquiridos está a radiação solar incidente. Ela é medida através da utilização de um piranômetro (sensor de radiação). Ele capta a radiação vinda do Sol e em sua saída informa um valor de tensão em mV correspondente. No entanto, essa é uma grandeza cuja unidade é W/m^2 . Para converter os valores de mV para W/m^2 é necessário realizar uma calibração do instrumento.

O sinal analógico fornecido pelo piranômetro é amplificado e filtrado no circuito de aquisição e condicionamento (Figura 4.8). Em seguida é feita sua conversão para um sinal digital em dez bits pelo ARDUINO UNO. Após isso, esses valores são comparados à grandeza de referência de radiação, informada pela estação meteorológica. Realizando essa comparação de valores, pode ser feita uma curva

de calibração de forma que o valor de radiação informado pelo piranômetro é exato.

4.3.2 Temperaturas

Um outro dado importante a ser monitorado é a temperatura do painel, que é medida com um sensor eletrônico LM-35 acoplado na parte traseira do módulo fotovoltaico, sendo alimentado pelo próprio ARDUINO UNO. Ele também fornece um sinal de saída em unidades de mV proporcional à temperatura do painel sentida por ele. Após ser filtrado por um capacitor, o sinal é direcionado aos conversores A/D do ARDUINO UNO, sendo gerado um sinal digital que, por sua vez, será comparado ao de um termômetro confiável baseado em um termopar. Dessa forma, sendo feita a calibração, o sensor eletrônico utilizado fornecerá valores exatos de temperatura.

Há ainda a necessidade de se monitorar a temperatura ambiente, cujos valores são diretamente fornecidos pela estação meteorológica representada na Figura 4.9. Ele vem com um software que possui uma boa interface com o usuário, na qual ele pode configurar diversos parâmetros, definir frequência de amostragem dos sinais, escolher quais variáveis monitorar, dentre outras funcionalidades.

Por se tratar de um equipamento industrial que foi adquirido pelo laboratório, os dados fornecidos por ele podem ser considerados confiáveis e representar valores exatos das grandezas que são medidas. Esses dados não precisam de calibração.



Figura 4.9: Estação meteorológica. Fonte: Davis Instruments.

4.3.3 Tensão e Corrente

Variáveis importantes para o acompanhamento do desempenho do PV são a tensão e a corrente do painel. A tensão fornecida por ele é direcionada ao circuito de aquisição e monitoramento e, em seguida, atenuada por um divisor de tensão, uma vez que os canais A/D do ARDUINO UNO não suportam valores altos. A partir daí, o sinal é direcionado para um dos canais e, então, convertido para digital, tornando possível realizar sua calibração. Ela foi feita em bancada de laboratório utilizando um instrumento de referência que é um multímetro da marca FLUKE.

A corrente é medida com um sensor de efeito Hall da marca AMPLOC. Ele é alimentado pelo próprio ARDUINO UNO e sua saída também é direcionada a um dos canais A/D do microprocessador. Ele foi calibrado também em bancada utilizando o mesmo instrumento da calibração da tensão, o multímetro digital.

Resumidamente, todos os sinais são recebidos pelo circuito de aquisição e condicionamento, que fica na Unidade de Monitoramento e Controle. Esses dados são tratados e armazenados em um servidor local via Internet. Um diagrama foi feito de modo a representar de forma mais visual todo esse processo de aquisição de sinais. Ele se encontra na Figura 4.10, que mostra também, os sensores utilizados.

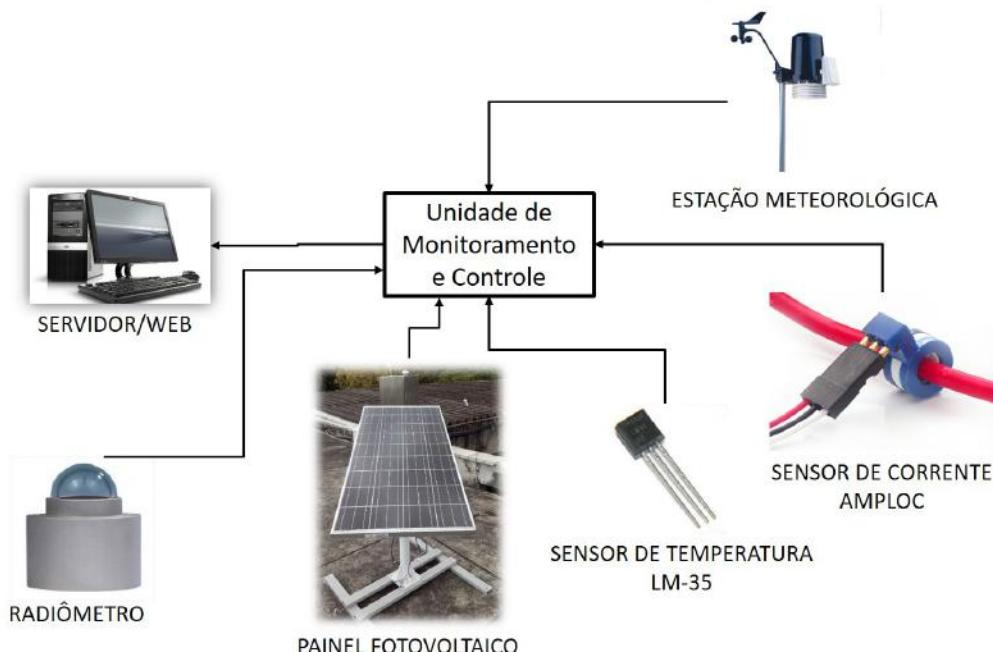


Figura 4.10: Diagrama geral da aquisição dos sinais.

4.4 Máxima Potência

A potência do painel fotovoltaico não é obtida diretamente. Ela é calculada a partir dos valores de corrente e tensão medidos e, depois, multiplicados. A potência

fornecida por ele é que vai indicar o quanto de energia solar foi convertida em energia elétrica, ou seja, seu rendimento; por isso sua importância.

É desejado que o PV gere a maior quantidade de energia elétrica possível. Para que isso ocorra, o painel deve estar operando no seu ponto de potência máxima. Esse ponto diz respeito a quando os valores de corrente e tensão combinados atingem seu valor máximo. Em uma curva potência *vs* tensão, fica claro onde se localiza esse ponto, como visto anteriormente na Figura 3.7. No entanto, para o painel operar nesse ponto, é necessário que haja um Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) do painel.

Isso é feito através de um circuito de chaveamento (Figura 4.11) que visa variar a tensão na carga observada pelo painel, que no caso desse circuito se trata de um resistor de potência fixo de $0,5\Omega$. Nele encontra-se um relé de estado sólido que abre e fecha o circuito de acordo com um sinal de controle *Pulse Width Modulation* (PWM).

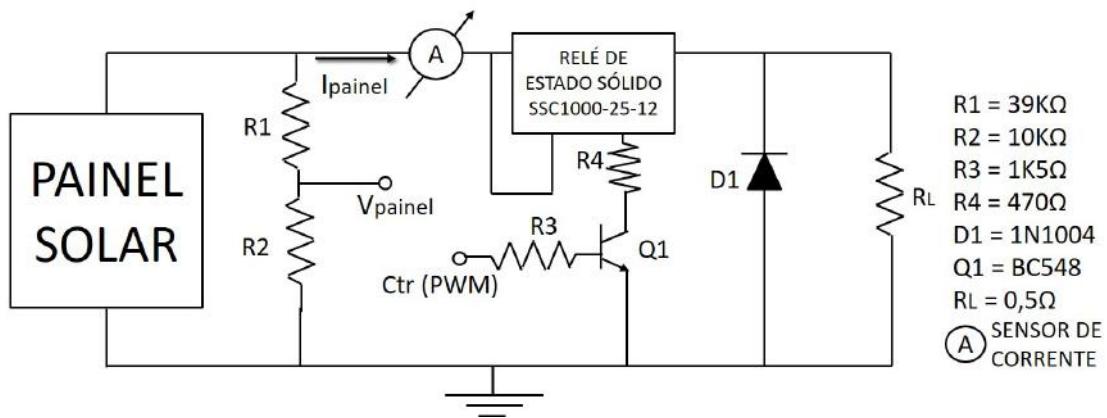


Figura 4.11: Desenho esquemático do circuito de chaveamento.

O sinal PWM é fornecido diretamente pelo ARDUINO UNO e é direcionado para o circuito de aquisição e condicionamento de sinais da Figura 4.8. Esse sinal tem como característica funcionar com ciclos de trabalho que correspondem a sua largura. Por exemplo, para um ciclo de trabalho de 10%, ele estará em nível alto somente em 10% de seu período nos primeiros instantes de tempo. Já para um ciclo de trabalho de 50%, ele estará metade do tempo em nível alto e a outra metade em nível baixo. A Figura 4.12 explica isso de forma mais visual.

Portanto, é esse sinal que vai controlar o chaveamento do circuito, variando seu ciclo de trabalho de 0% até, possivelmente, 100%. Ao ser variado, a carga assumirá valores diferentes para cada ciclo e, sendo assim, haverá um valor de corrente e tensão em cada situação. Com esses valores, pode-se obter a potência fornecida pelo painel a todo momento. A partir de agora faz-se uso de um algoritmo de MPPT que pretende fazer com que o painel fique operando em seu ponto de potência máxima. Ele se chama *Perturbe & Observe* (P&O) .

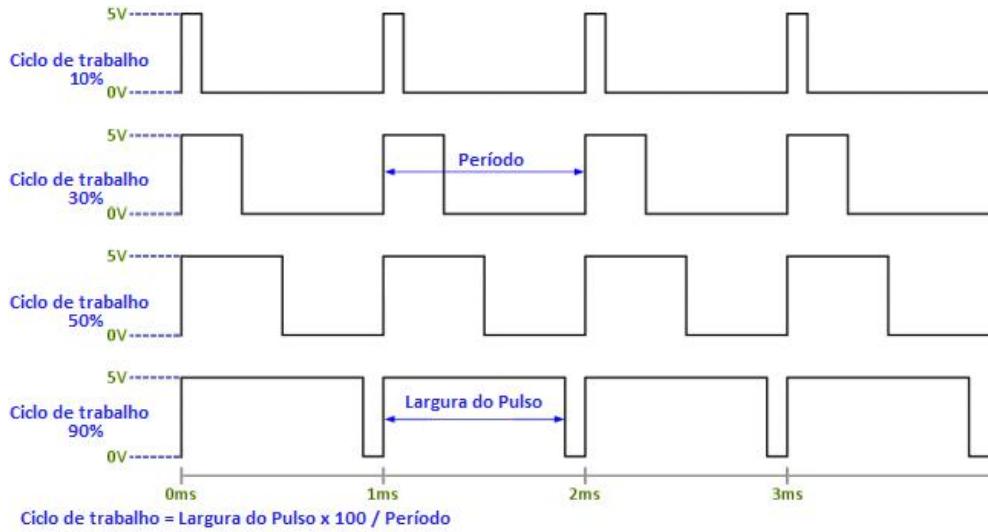


Figura 4.12: Gráfico teórico explicativo do funcionamento de um sinal PWM.

Ele funciona da seguinte maneira: o algoritmo faz com que o ciclo de trabalho do sinal de PWM vá aumentando e ao mesmo tempo calculando os valores de potência. Se o valor de potência para o próximo ciclo de trabalho for maior que o do ciclo anterior, a busca continua e o ciclo aumenta. Caso o valor seguinte de potência seja menor que o anterior, a busca se encerra. Se por algum motivo como, por exemplo, a incidência de radiação diminuir e a potência também cair, uma nova busca é iniciada até que se encontre o novo MPP [9].

O funcionamento do algoritmo pode ser observado na Figura 4.13. Nela, o número 1 aponta para um instante em que a busca está sendo feita. Esse é ainda um

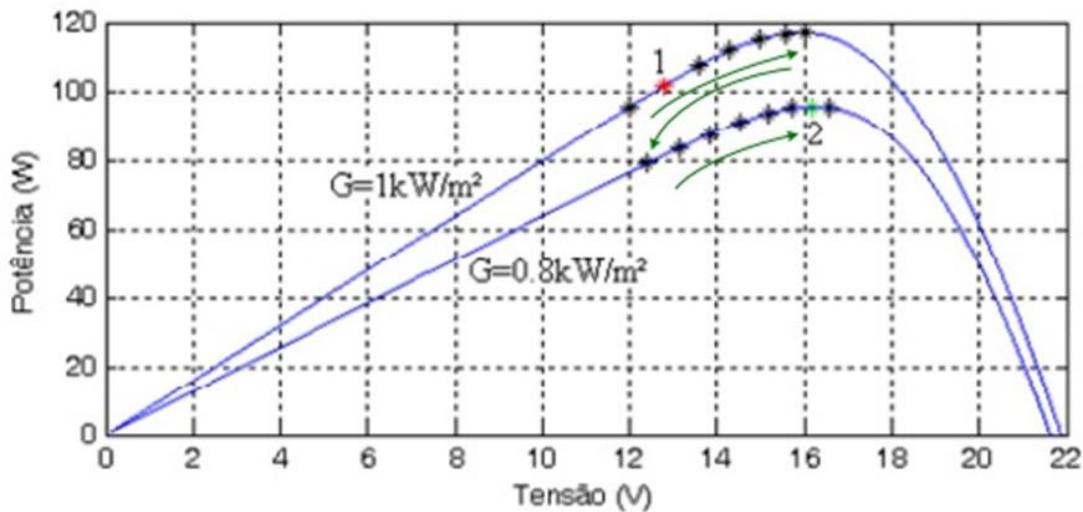


Figura 4.13: Gráfico teórico explicativo do algoritmo *Perturbe & Observe*. Fonte: Dissertação de Mestrado – Sistema Fotovoltaico Baseado Em Conversores CC-CC Boost – Rafael Ribeiro.

ponto que não representa o MPP, que é desejado. O número 2 representa o MPP

encontrado depois de, durante a primeira busca, a queda de radiação incidente ter influenciado na potência fornecida pelo PV, obrigando o sistema a iniciar uma nova busca [10].

O ARDUINO UNO, o circuito de chaveamento e o de aquisição e condicionamento de dados estão todos posicionados dentro de um módulo medidor de máxima potência, mostrado na Figura 4.14 e chamado de Módulo de Monitoramento de Máxima Potência. Nele se encontram também os resistores de potência que representam a carga. Como eles esquentam, foram colados em cada um deles um dissipador para que suas temperaturas diminuam, além do que foi usado também um pequeno *cooler* para o resfriamento.

Uma tomada é conectada ao plugue do módulo no qual seus fios são os terminais dos dois painéis fotovoltaicos, tanto o concentrador quanto o de referência. Existem também duas chaves que selecionam a carga que será conectada ao circuito, variando o paralelismo entre elas.

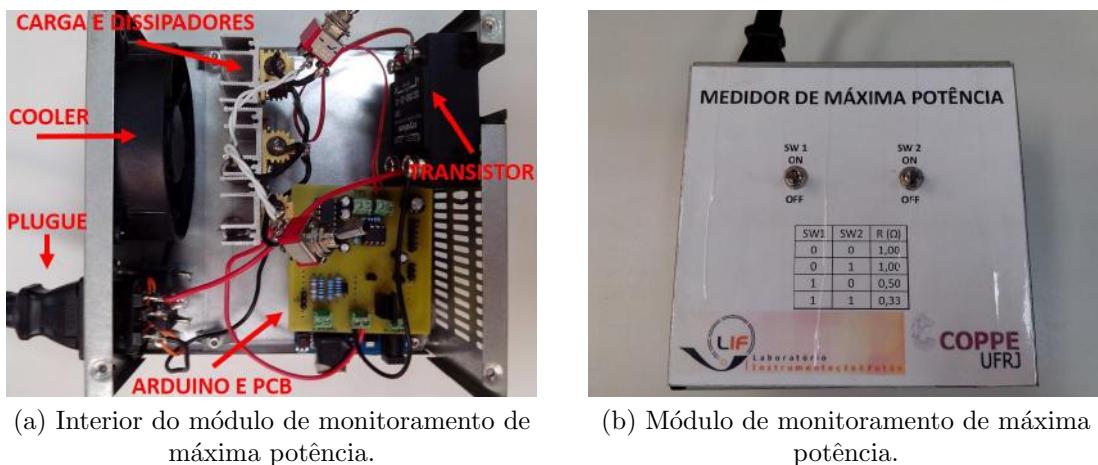


Figura 4.14: Módulo de monitoramento de máxima potência e seu interior detalhado.

A partir dessa etapa, com todo o sistema montado operando e coletando os dados, pode-se prosseguir para a etapa de análise de dados e conclusões sobre o estudo.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

A partir do funcionamento do sistema como um todo e com a coleta de dados sendo feita, todo o estudo pôde ser conduzido, analisando todas as variáveis envolvidas. Os equipamentos projetados e utilizados neste trabalho foram validados depois de terem sido feitos testes comparativos com os resultados confiáveis. Além disso, com os valores de corrente e tensão adquiridos, puderam ser traçados gráficos que levem a uma conclusão sobre este projeto, além dos dados de temperatura, que estão correlacionados aos de outras variáveis e que podem gerar conclusões bastante importantes.

5.1 Verificação do Funcionamento do Circuito de Chaveamento

Primeiramente, é necessário verificar o funcionamento do circuito de chaveamento, pois é ele que vai alterar a carga vista pelo painel, possibilitando obter medidas. Ao alterar a carga, o PV fornecerá diferentes valores de corrente e tensão e, consequentemente, diferentes valores de potência para cada ciclo de trabalho do sinal PWM.

Sendo assim, esses dados foram obtidos e, em seguida, foram traçados dois gráficos experimentais sobrepostos (corrente *vs* tensão em azul e potência *vs* tensão em laranja). Eles estão representados na Figura 5.1 que, ao ser observada, nota-se que esses gráficos se assemelham muito às curvas teóricas das Figuras 3.6 e 3.7.

A curva de corrente apresenta valores que decrescem conforme a tensão aumenta. Dessa forma, há uma combinação desses valores que gera a curva de potência em cor laranja. Ela tem um formato parabólico e, portanto, possui um ponto crítico que, no caso, se trata de um ponto de máximo. Esse ponto é o MPP. A partir daí, pode-se concluir, portanto, que o circuito de chaveamento funciona como o desejado.

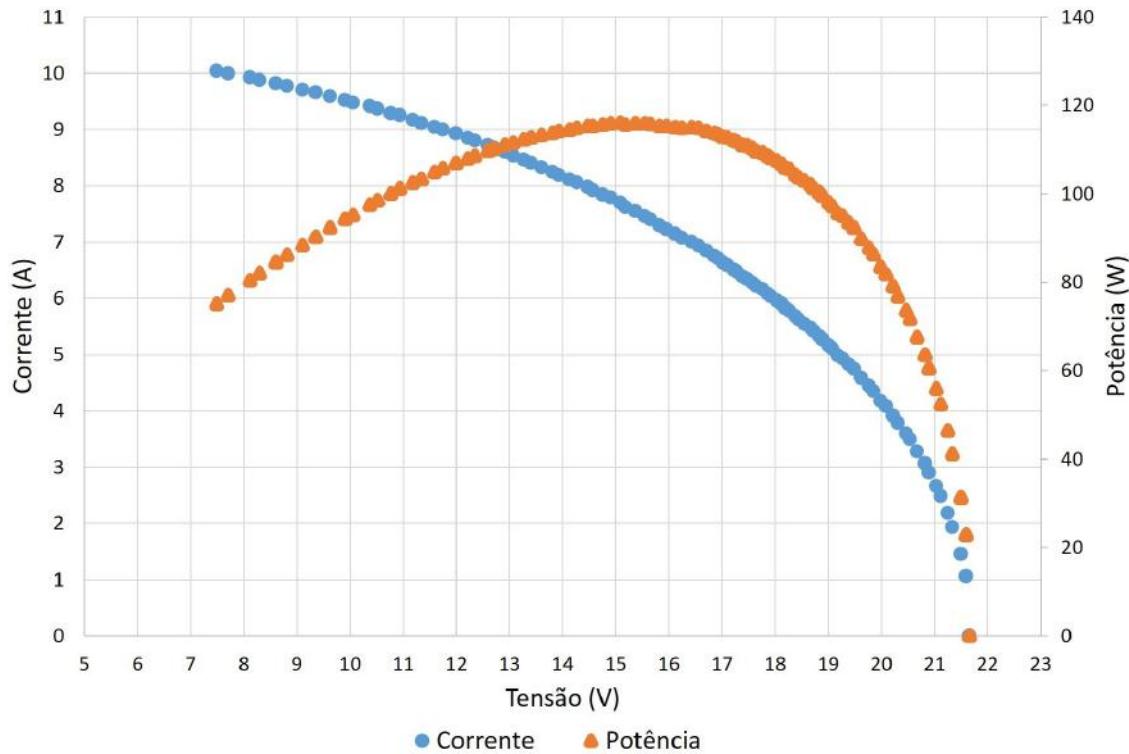


Figura 5.1: Gráfico experimental para o painel concentrador das curvas de corrente e potência em função da tensão.

5.2 Verificação do Funcionamento do Módulo de Monitoramento de Máxima Potência

Agora, o importante é comprovar o funcionamento do módulo de monitoramento de máxima potência. É ele que permitirá obter valores de potência a partir dos de corrente e tensão, dependendo da radiação incidente. Para isso, foi realizado um teste de bancada utilizando, de forma a representar o PV localizado no terraço, um painel menor, também da marca Kyocera, porém do modelo KS-5T, cujas especificações encontram-se na Tabela 5.1 e cuja curva corrente *vs* tensão é representada na Figura 5.2.

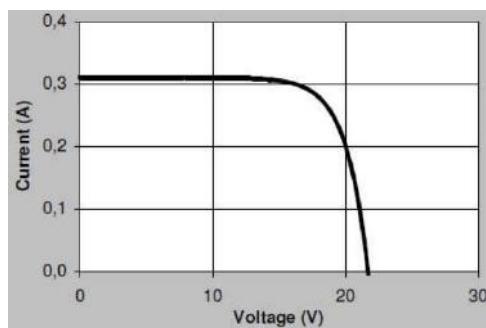


Figura 5.2: Curva corrente *vs* tensão do painel KS-5T. Fonte: Folha de dados do módulo KS-5T da Kyocera.

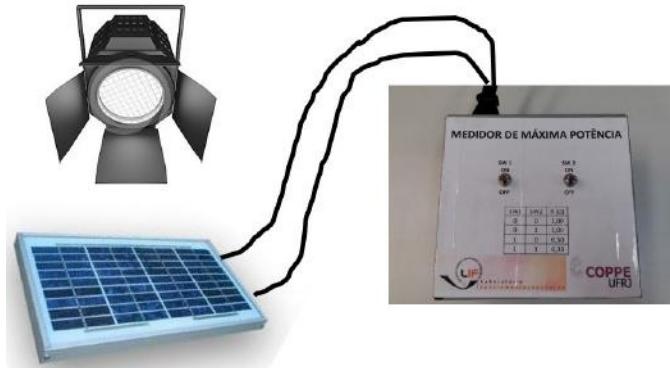
Tabela 5.1: Características elétricas do painel fotovoltaico utilizado para os testes de bancada.

DESEMPENHO ELÉTRICO SOB CONDIÇÃO PADRÃO DE TESTE	
Potência Máxima	5W
Tensão de Máxima Potência	17,4V
Corrente de Máxima Potência	0,29A
Tensão de Circuito Aberto	21,7V
Corrente de Curto-circuito	0,31A

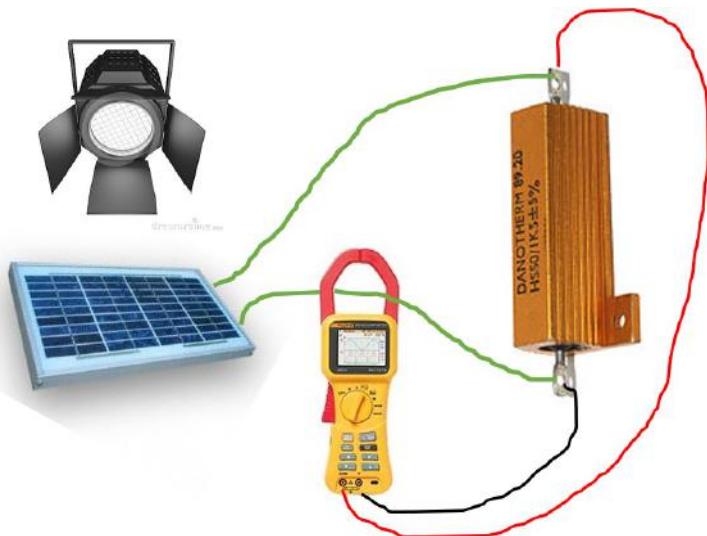
Esse teste foi feito conforme os diagramas da Figura 5.3. Primeiramente (Figura 5.3a), o PV foi conectado ao MMMP e utilizado um holofote como fonte de luz, onde esta foi direcionada para o pequeno painel. Os dados de corrente e tensão foram adquiridos pelo módulo de monitoramento de máxima potência para cada valor de ciclo de trabalho de sinal PWM e, a partir deles, foi traçado um gráfico experimental (corrente *vs* tensão). Em seguida (Figura 5.3b), manteve-se o mesmo holofote ligado, desconectou-se o MMMP e utilizou-se resistores de potência em seu lugar para simular as variações da carga, totalizando seis valores diferentes. Para cada um deles usado foram registrados os dados de corrente e tensão fornecidos pelo painel medidos com o multímetro digital da FLUKE. Com esses dados, traçou-se um outro gráfico experimental que foi plotado de forma sobreposta ao traçado no caso dos dados coletados com o MMMP, para que fosse possível uma melhor comparação entre os dois. Eles se encontram na Figura 5.4.

Verifica-se nela, que a curva traçada a partir dos dados do MMMP se assemelha bastante com a que é fornecida pelo fabricante (Figura 5.2), a não ser pelos valores de corrente. Eles assumem magnitudes um pouco menores quando comparados com as teóricas, o que pode ser explicado pelo fato de que a fonte de luz utilizada nesse teste, um holofote, não se assemelha a que foi usada pelo fabricante em seus ensaios, que foram feitos sob condições padrão. Além disso, pode-se perceber que há uma sobreposição dos dois gráficos e que ela é praticamente perfeita, estando ambos em acordo. Isso evidencia que o módulo de monitoramento de máxima potência funciona de forma altamente satisfatória.

Esses testes são importantes para que, quando tais equipamentos forem utilizados para sua real finalidade, eles possam fazê-lo de uma maneira confiável e segura. Dessa forma, todo o estudo necessário para se avaliar o rendimento dos sistemas concentrador e tradicional foi realizado com a utilização de todos os instrumentos, sensores e equipamentos, de modo a contribuir para um bom e completo estudo.



(a) Procedimento utilizando o MMMP.



(b) Procedimento utilizando resistores de potência.

Figura 5.3: Procedimentos utilizados para a validação do módulo de monitoramento de máxima potência.

5.3 Experimentos que Relacionam Potência e Radiação

Ao longo do dia 25/09/15, todo o sistema (concentrador e tradicional) estava em funcionamento e todos os dados foram coletados e armazenados no servidor local, chamado de LIF REMOTO. De meia em meia hora eles foram adquiridos para que se pudesse observar graficamente o comportamento das variáveis a serem analisadas. Nesse dia, o tempo estava um pouco nublado e houve momentos em que o céu se encontrava mais limpo.

A Figura 5.5 mostra uma curva com os dados de máxima potência (azul) do sistema concentrador e uma outra curva com os dados de radiação incidente (laranja), ambos plotados no mesmo gráfico. Observa-se que antes das dez da manhã, a potência fornecida pelo painel é muito baixa, uma vez que, além de o céu estar nublado, a essa hora a incidência da luz do Sol costuma ser pouca. A

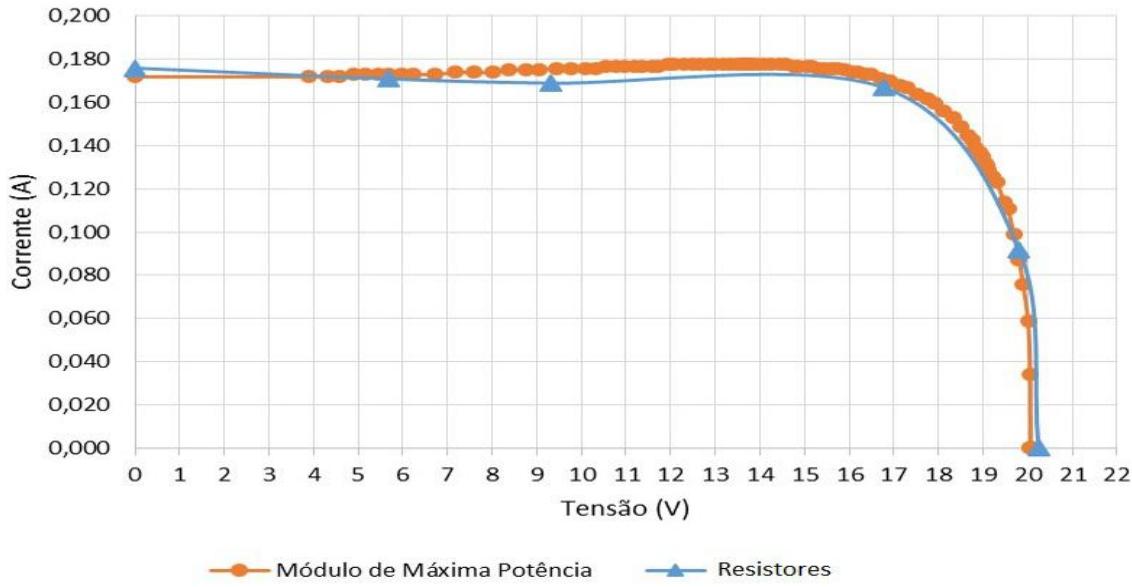


Figura 5.4: Gráficos experimentais de corrente *vs* tensão do PV KS-5T para diferentes procedimentos.

partir do meio-dia, quando as nuvens que cobriam o céu começaram a se dispersar, a incidência de radiação do Sol aumentou, fazendo com que o painel fornecesse mais potência e, consequentemente, mais energia às baterias do banco. Conforme as horas do dia passam, é natural ocorrer a queda de potência vista na figura em questão, já que a oferta de luz do Sol diminui, principalmente depois das quatro horas da tarde.

Além dessas observações, pode-se perceber um outro fato. Como foi visto no capítulo três deste trabalho a respeito do princípio de funcionamento de células fotovoltaicas, a potência fornecida pelo painel fotovoltaico depende da radiação que incide nele. Na Figura 5.5, observa-se que a curva de máxima potência se eleva bruscamente por volta do meio-dia, justamente no momento em que a curva de radiação também o faz. Isso mostra que a potência do PV aumentou porque a radiação que incidia nele se elevou. Dessa forma, haverá mais energia sendo fornecida às baterias do banco.

5.4 Experimentos que Relacionam Potência e Temperatura

Para o mesmo dia 25/09/15, outras conclusões foram feitas. Na Figura 5.6, além da curva de máxima potência (azul), foi traçada a curva com os dados de temperatura do painel (laranja) para o sistema concentrador e a curva com os dados de temperatura ambiente (cinza) para o mesmo dia 25/09/15, todas plotadas na mesma área de gráfico. Nele, verifica-se que a temperatura ambiente manteve-se praticamente constante ao longo do dia, variando de 20 °C a 25 °C. Verifica-se,

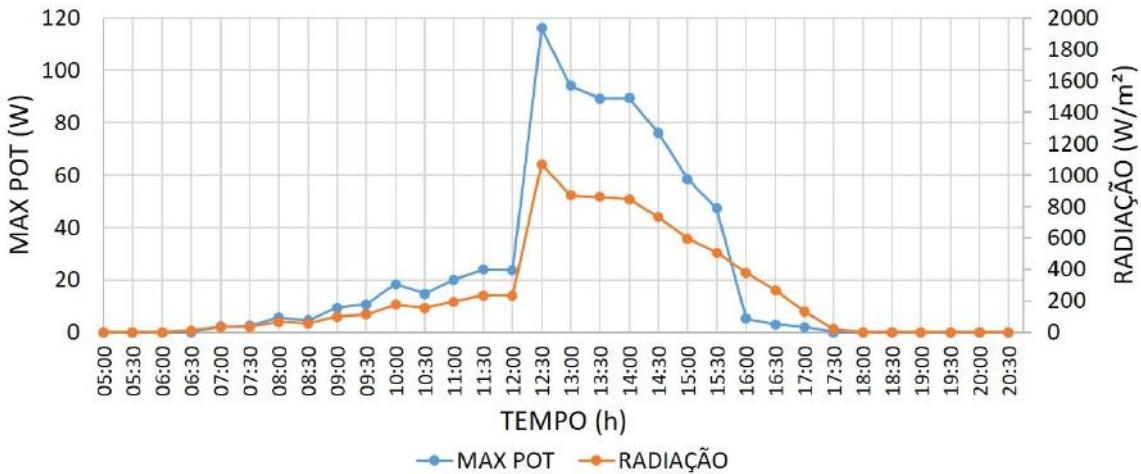


Figura 5.5: Gráficos de radiação incidente e de máxima potência para dados do dia 25/09/15.

também, que o gráfico da temperatura do painel varia consideravelmente ao longo desse dia, apresentando valores mais baixos nos horários extremos e valores mais altos próximos do meio-dia.

Pode-se observar na Figura 5.6 que, ao meio-dia, a temperatura do painel aumentou brusca e proporcionalmente ao aumento da potência máxima fornecida pelo PV que, por sua vez, varia de acordo com a incidência de radiação. A temperatura atingiu seu pico de valor no horário de meio-dia e meia (33°C), diminuindo conforme diminuía a potência. Quando chegou o horário de quatro horas da tarde, a potência fornecida era quase zero e a temperatura do PV decrescia, até que às dezoito horas ela atingiu um de seus valores mínimos.

Se for considerada essa temperatura de 33°C no gráfico da Figura 3.8, teria-se, aproximadamente, $17,0\text{V}_{\text{mp}}$ e $7,3\text{A}_{\text{mp}}$ para os valores de tensão e corrente de máxima potência, respectivamente, fornecendo um valor de $124,1\text{W}_{\text{mp}}$. Como o valor de potência máxima fornecida nessa dia foi de $116,1\text{W}$ segundo a Figura 5.8, percebe-se que o valor encontrado experimentalmente é um pouco menor que o teórico, mas ainda de acordo. Essa diferença pode ser justificada pelo fato de que em um experimento, há diversos fatores externos que podem influenciar nas grandezas medidas.

O fato que diz respeito ao acompanhamento das curvas de potência do painel e de sua temperatura, nos leva a concluir que as variações da temperatura se dão única e exclusivamente por influência da quantidade de radiação que incide nele e que, consequentemente, faz aumentar a potência fornecida pelo PV. A não variação da temperatura ambiente ao longo do dia evidencia o fato de que ela não foi responsável pelo aumento da temperatura do painel. Portanto, o aquecimento do PV é uma preocupação inerente à radiação que nele incide.

Com o intuito de embasar melhor o estudo, um outro gráfico foi criado (Figura

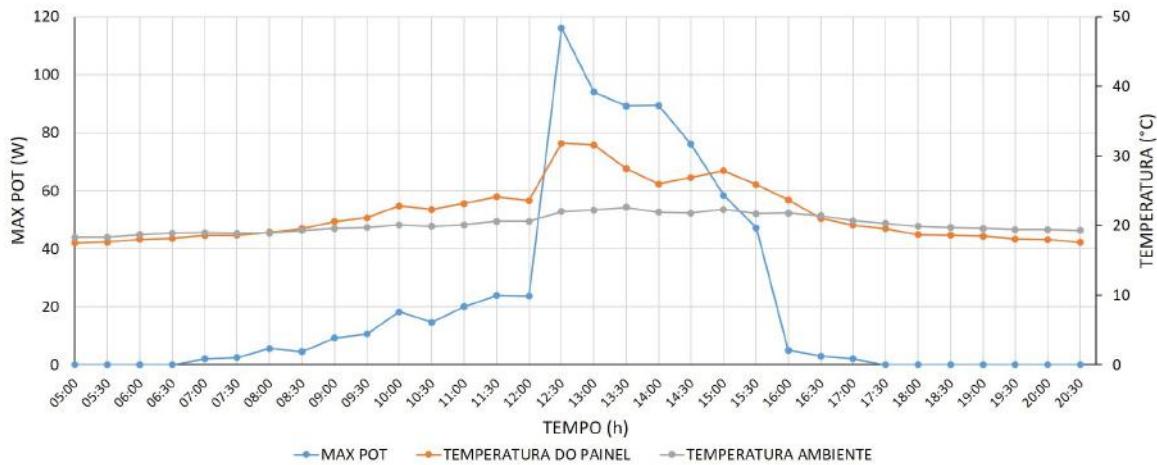


Figura 5.6: Gráficos de temperatura ambiente e do painel sobrepostos ao gráfico da máxima potência para dados do dia 25/09/15.

5.7), dessa vez com os dados de temperaturas do painel e ambiente para um outro dia, 23/06/15. Ele reforça o que foi dito a respeito do que se concluiu da Figura 5.6. Nota-se que a temperatura do painel (azul) varia bastante ao longo do dia em questão, enquanto que os valores de temperatura ambiente (laranja) fornecidos pela estação meteorológica permanecem praticamente constantes. Mais uma vez, conclui-se que a temperatura ambiente não interfere no aquecimento do painel. Observa-se, ainda, que a curva em vermelho apenas representa uma média móvel de dez valores para os dados de temperatura do painel.

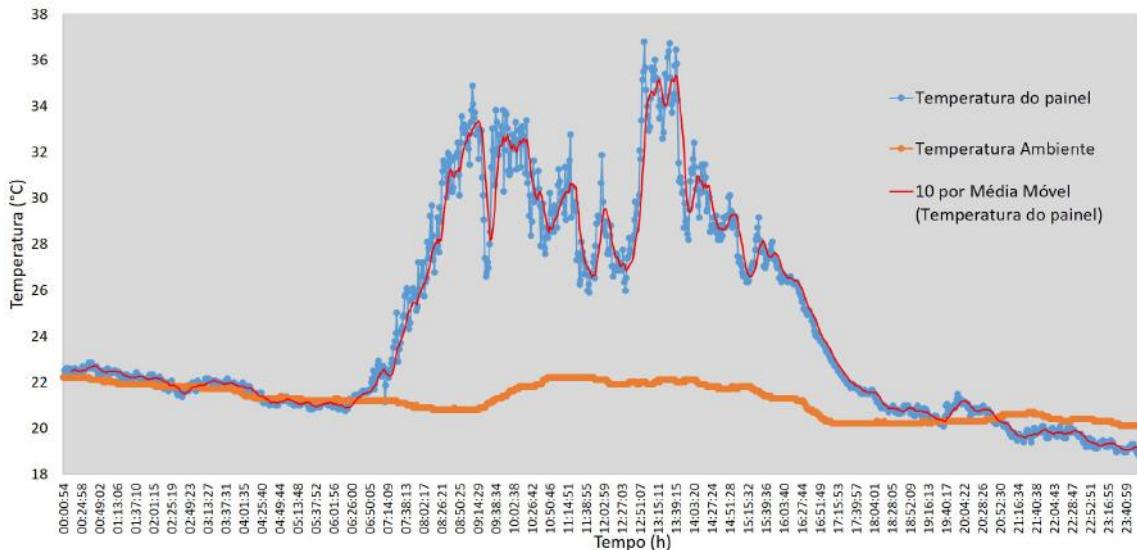


Figura 5.7: Gráficos de temperaturas ambiente e do painel para dados do dia 23/06/15.

5.5 Cálculo do Rendimento do Painel do Sistema Concentrador

O rendimento do painel do sistema concentrador precisa ser calculado para que se saiba o quanto de energia elétrica foi produzida com a utilização da energia do Sol. Além disso, esse cálculo é importante porque vai determinar, com o uso de um valor quantitativo, se o sistema concentrador cumpriu com o seu objetivo. A base dos dados também se referem ao dia 25/09/15.

Esse cálculo depende de alguns valores fornecidos pelo fabricante do painel fotovoltaico, além daqueles que já foram citados. Referem-se às dimensões do módulo, que de acordo com a folha de dados do fabricante, correspondem a 1,425m de altura e 0,625m de largura. Calculando a área da face captadora do PV, obtém-se

$$A = 1,425m \cdot 0,625m = 0,9291m^2. \quad (5.1)$$

Além do valor da área do PV, necessita-se calcular a potência que incide no painel, de acordo com os dados fornecidos pela porta serial. A Figura 5.8 representa uma impressão eletrônica da tela do programa PuTTY que mostra o que está sendo

The screenshot shows a PuTTY terminal window with a blue header bar labeled 'COM8 - PuTTY'. The main area displays the following text:
CÁLCULO DA MÁXIMA POTÊNCIA v1.2
Ciclo(%) Vrms(V) Irms(A) Pot(W) Rad(W/m2)
61 15.09 7.70 116.13 1069.00

Figura 5.8: Representação da janela do programa que exibe a comunicação na porta serial.

comunicado na porta serial. Esses valores correspondem ao momento em que a radiação máxima que incidiu naquele dia chegou a 1069W/m². Como o PV tem uma área de 0,9291m², chega-se a conclusão que a potência que atinge o painel corresponde a

$$P_i = 1069W/m^2 \cdot A = 1069W/m^2 \cdot 0,9291m^2 = 993,2079W. \quad (5.2)$$

Ainda para esse dia, a potência máxima P fornecida pelo painel fotovoltaico concentrador segundo a Figura 5.8, foi de 116,13W. Portanto, o rendimento do painel do sistema concentrador foi de

$$\eta\% = \frac{P}{P_i} = \frac{116,13W}{993,2079W} = 11,69\%. \quad (5.3)$$

De acordo com a Tabela 3.1, a eficiência de um módulo comercial do tipo policristalino, que é o caso dos módulos utilizados nesse projeto, é de 13%. O valor de 11,69% fica um pouco abaixo do informado para o que seria comum para módulos desse tipo.

5.6 Comparação de Rendimento dos Sistemas Concentrador e Tradicional

Existe a necessidade de se obter uma conclusão a respeito da eficácia do emprego do sistema concentrador proposto neste trabalho em relação ao sistema tradicional de implementação. Uma boa maneira de se fazer isso é comparar as curvas de potência máxima fornecida pelos painéis em cada um de seus sistemas ao longo de um dia. Isso foi feito e traçando dois gráficos nos quais, em cada um deles, há duas curvas de potência; uma para cada sistema. Cada gráfico corresponde a um dia de medidas.

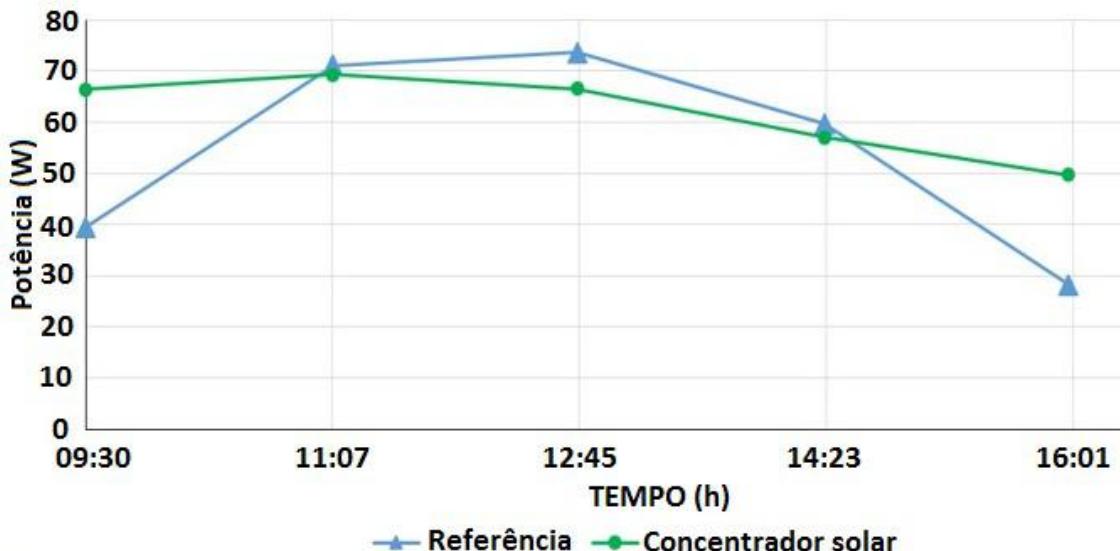
O gráfico da Figura 5.9a corresponde ao dia 30/01/15. As duas curvas de potência foram traçadas sendo que em azul está a curva relacionada ao sistema tradicional de implementação de painéis fotovoltaicos e, em verde, a curva que diz respeito ao sistema concentrador empregado. Observando-as, nota-se que no início da manhã e no fim da tarde, o sistema concentrador foi capaz de produzir mais energia, enquanto que o sistema tradicional não pôde gerar tal quantidade, já que nesses horários, incide pouca luz sobre o painel. Como há concentração no outro sistema, a incidência de radiação é maior e, portanto, acaba por gerar mais energia.

Para obter um valor mais quantitativo sobre qual dos dois sistemas produz mais energia, pode ser feito um cálculo referente à área sob as curvas em questão, de acordo com a equação 5.4.

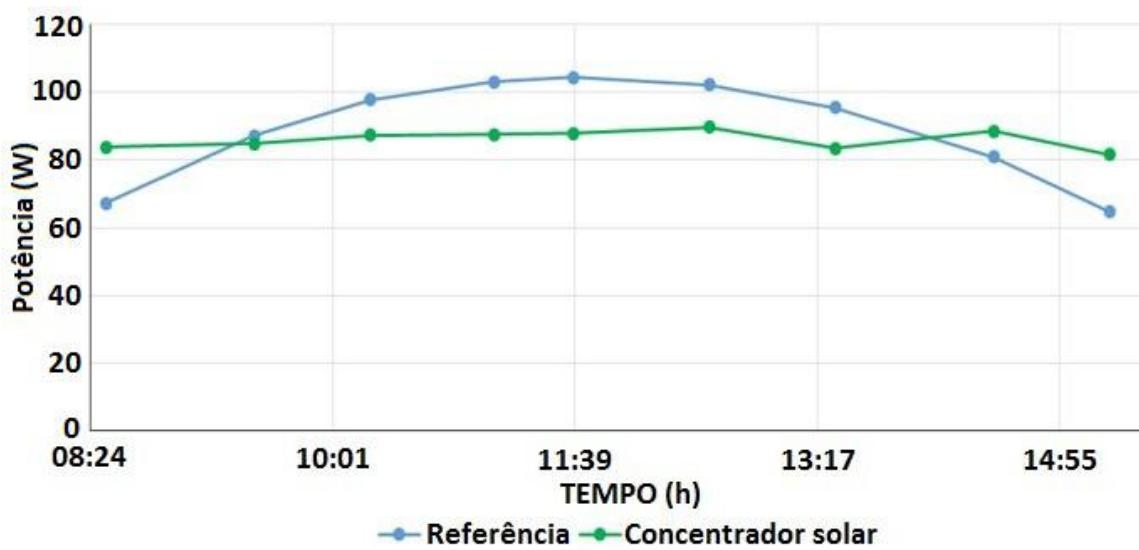
$$E_P = \int P(t)dt. \quad (5.4)$$

No entanto, não é conhecida a função que define essas curvas. Essa definição foi feita com o uso do programa ORIGIN PRO 8.0. Nele, um ajuste de curvas foi feito e a sua integral foi calculada na sequência. Sobre a curva referente ao painel do sistema tradicional, a energia produzida foi de 387,26Wh. Já sobre a curva referente ao painel concentrador, ela foi de 408,16Wh.

Percebe-se que a diferença entre a energia gerada pelos painéis concentrado e o tradicional é pequena, com uma ligeira vantagem para o PV do sistema concentrador. Essa diferença é quase nula quando comparada com o valor que era esperado, a de três vezes a energia gerada pelo sistema tradicional. Nesse caso, a concentração não se mostrou eficiente.



(a) Gráfico comparativo entre valores de potência máxima dos sistemas tradicional e concentrador para o dia 30/01/15.



(b) Gráfico comparativo entre valores de potência máxima dos sistemas tradicional e concentrador para o dia 05/03/15.

Figura 5.9: Gráficos comparativos da potência fornecida pelos sistemas para dois dias diferentes.

Esse mesmo procedimento de cálculos foi feito para as curvas da Figura 5.9b, que correspondem ao dia 05/03/15. Nessa figura, as cores se referem às mesmas variáveis que no caso da Figura 5.9a e o mesmo pode ser concluído com relação aos períodos extremos do dia. Foram, então, feitos os cálculos de área das curvas, obtendo os seguintes resultados: 618,58Wh para o painel do sistema tradicional e 586,71Wh para o painel do sistema concentrador.

Mais uma vez, o sistema concentrador não se mostrou eficaz, apresentando, dessa vez, uma conversão energética menor que a do painel de referência. Existe, então,

a necessidade de buscar uma resposta a essas questões encontradas e apresentadas aqui.

5.7 Outras Discussões Sobre os Resultados

Como foi visto anteriormente, o sistema concentrador não foi eficaz e, portanto, é necessário chegar a uma conclusão sobre o que pode ter feito com que ele não se comportasse como o esperado.

A primeira suspeita se dá com relação ao tamanho e formato dos espelhos. Eles são um pouco maiores que o painel utilizado mas, além disso, pertencem a uma estrutura que possui uma pequena área onde não há material reflexivo. Considerase que deveriam ter sido empregados espelhos de tamanho maior, com uma maior área de superfície.

Além disso, existe a suspeita de que o material reflexivo dos espelhos não é o ideal para esse tipo de aplicação. Os espelhos usados são considerados comuns e há a possibilidade de alguma parte da energia que incide neles, se perder. Um espelho comum apresenta revestimentos de prata para fazer a reflexão da luz. No entanto, segundo a Figura 5.10, espelhos com revestimento de prata sofrem com a diminuição da reflectância nas regiões do ultravioleta e azul do espectro de radiação do Sol.

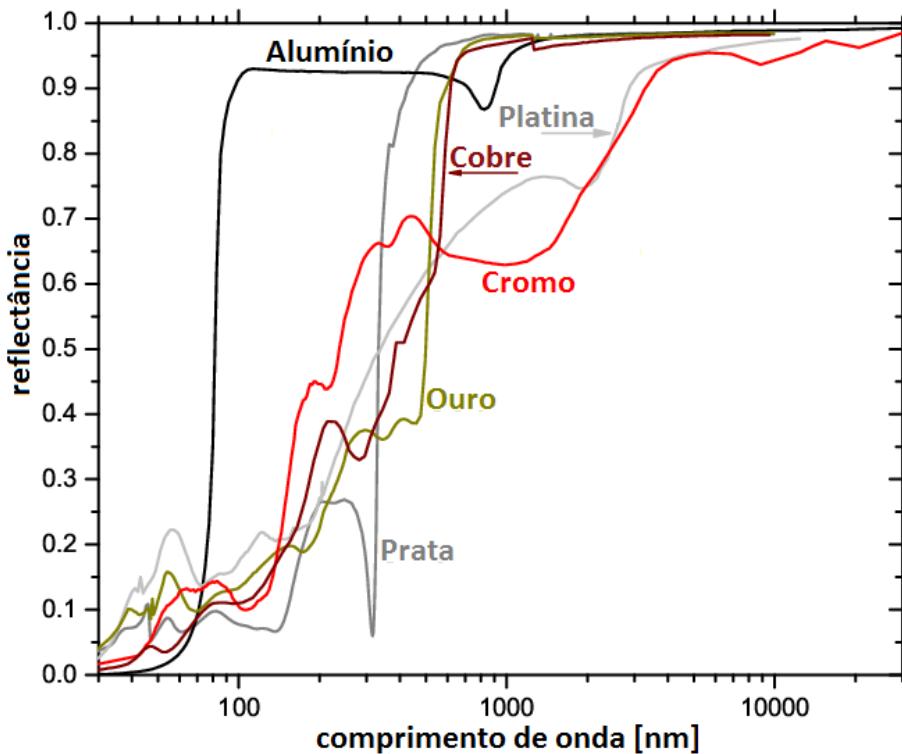


Figura 5.10: Gráfico comparativo de reflectância de alguns materiais empregados em revestimentos de espelhos. Fonte: www.athklab.com/reflectance.html.

De acordo com [11], existem revestimentos próprios para refletir mais luz que

podem atingir 99,9% de reflexão. Eles operam da forma oposta aos revestimentos anti-reflexivos, caracterizando uma manipulação da luz que sofre refração e reflexão baseado nos Índices de Refração (IR) de cada material. Funcionam utilizando duas camadas de revestimento: uma com um material de alto índice de refração, como o dióxido de titânio, e outra com baixo índice, como o fluoreto de magnésio. Essa combinação aumenta a reflectância do espelho.

Foi feito um teste para comprovar que os espelhos do sistema concentrador não refletem muito bem a luz como o desejado para este tipo de aplicação. Ao verificar a quantidade de radiação que incide no painel após a reflexão nos espelhos, era de se esperar que ela equivalesse a três vezes a radiação direta do Sol. No entanto, como a conversão energética para esse sistema é baixa, acredita-se que a radiação incidente no painel não é grande.

A intenção é comparar o quanto de radiação que incide na superfície terrestre com a quantidade de radiação que incide no painel. Se esses valores forem diferentes, ou seja, se a radiação que incide no PV não for nem próxima de três vezes a radiação do Sol, garante-se que os espelhos utilizados não refletem como o desejado. Analogamente a isso, uma outra etapa é necessária ser conduzida porém, dessa vez, utilizando um luxímetro (Figura 5.11) da marca EXTECH, que é um instrumento que mede a intensidade da luz em unidades de lux. Ela permite que sejam adquiridas as mesmas conclusões que a etapa do teste com o radiômetro, um embasando o outro. As duas etapas do teste foram realizadas ao longo de uma hora.



Figura 5.11: Luxímetro. Fonte: www.extech.com.br/instruments.

Para isso, as duas etapas foram realizadas simultaneamente. Em uma delas, o radiômetro foi deslocado para a face captadora do painel, permanecendo este com sua região de captação de radiação voltada para o sul, direcionada para os espelhos. Foram anotados os valores fornecidos pelo radiômetro assim como os que a estação

meteorológica disponibilizou para essa variável.

Paralelamente, foi utilizado um luxímetro, que também foi colocado no painel de igual forma ao radiômetro e foram anotados seus valores medidos. Em seguida, o luxímetro foi deslocado e colocado em uma posição horizontal, de forma a captar a radiação direta incidente do Sol. Mais uma vez, o valor fornecido por esse aparelho foi anotado de forma a gerar conclusões futuras a partir de gráficos.

A partir da obtenção desses dados, foram gerados gráficos comparativos para os valores de intensidade de luz e os de radiação. A Figura 5.12 mostra duas curvas

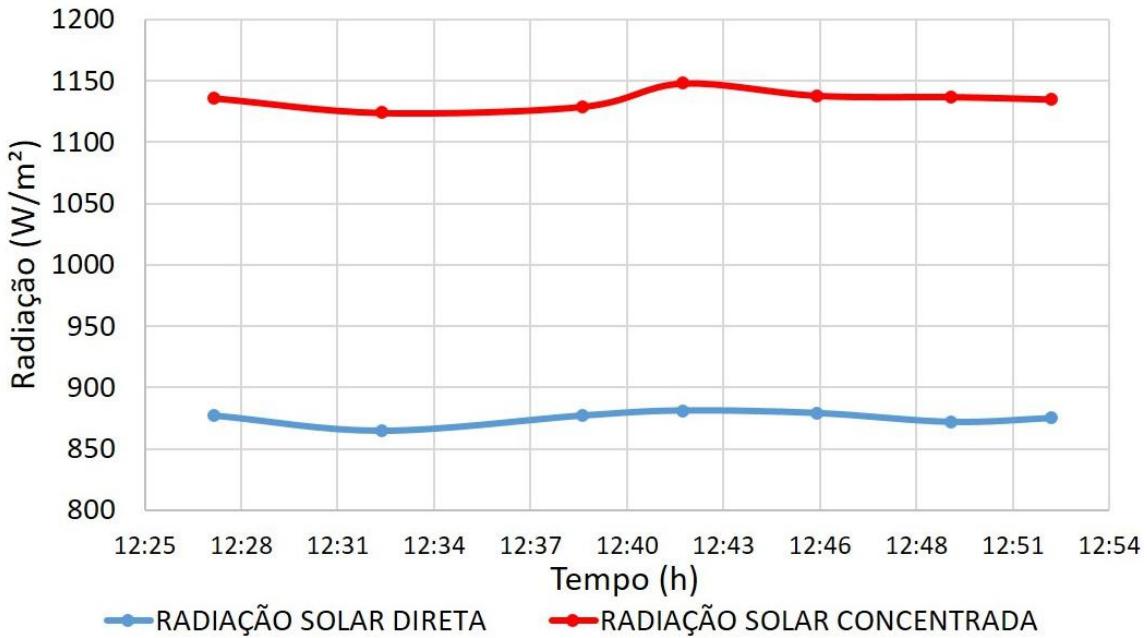


Figura 5.12: Gráfico comparativo entre os valores de radiação solar concentrada e direta.

plotadas numa mesma área de gráfico. A curva em azul corresponde à radiação solar direta incidente na superfície terrestre. A em vermelho diz respeito à radiação solar que foi concentrada na região da face captadora do painel. Observando-as, verifica-se que, se os espelhos fossem ideais, a curva em vermelho deveria estar concentrada em um valor médio de 2550W/m^2 . No entanto, está limitada superiormente por uma faixa de 1150W/m^2 , cerca de 30% maior, apenas.

No caso da Figura 5.13, as duas curvas plotadas referem-se à intensidade da luz observada ao longo desse período de uma hora em que foram tomadas as medidas. A curva em azul representa a intensidade da luz que incide diretamente na superfície terrestre. Já a curva em preto representa a intensidade da luz que está incidindo no painel concentrador. Observa-se que a curva preta apresenta valores cerca de 30% maiores que a curva azul. Contudo, de acordo com a proposta do sistema concentrador empregado, a intensidade da luz deveria ser três vezes maior que aquela que incidia diretamente no local, possuindo valores próximos de 300.000 lux, o que

seria o triplo de 100.000 lux, valor aproximado da intensidade da luz direta.

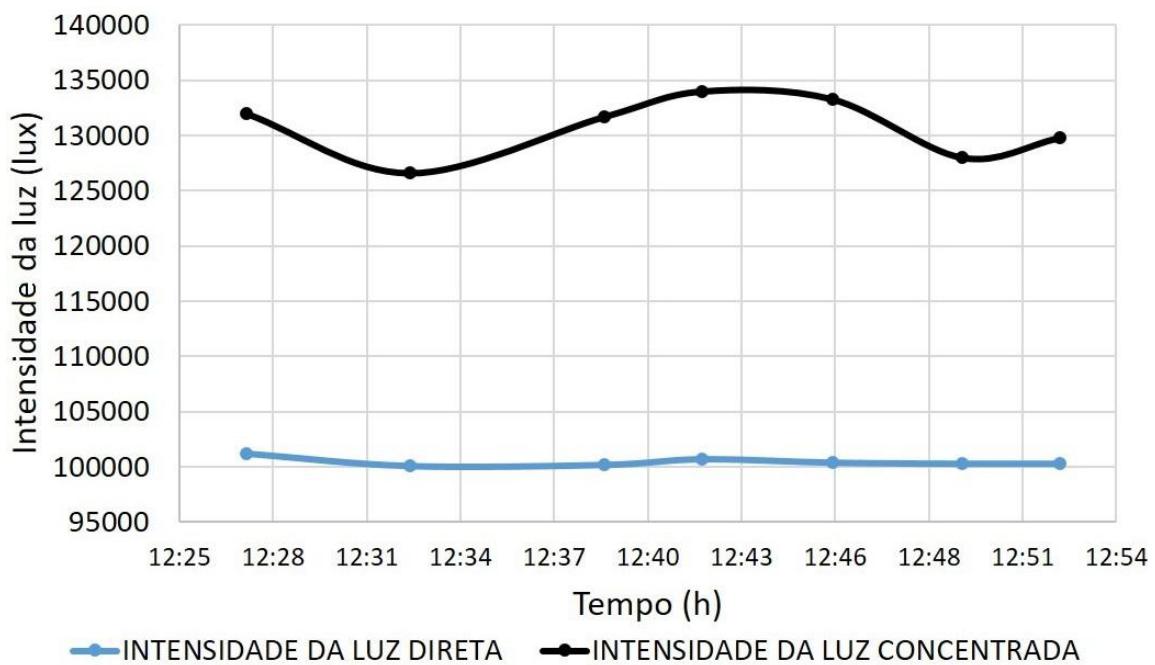


Figura 5.13: Gráfico comparativo entre os valores de intensidade da luz concentrada e direta.

Capítulo 6

Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

O presente trabalho tinha como objetivo empregar, em um sistema de geração de energia elétrica baseado em painéis fotovoltaicos, uma técnica de concentração solar que fosse capaz de aumentar sua conversão energética, armazenando toda a energia produzida, em um banco de baterias. Além disso, para melhorar os resultados, todo o sistema foi projetado para que os espelhos concentradores acompanhassem o movimento do Sol.

Para a conclusão de todo o projeto, foram expostos os aspectos teóricos necessários para o entendimento da conversão fotovoltaica, desde o efeito fotoelétrico até a caracterização das células, passando pelo efeito fotovoltaico e os conceitos de semi-condutores. Além disso, expôs-se a respeito das especificações de um PV, suas curvas características e as grandezas que podem influenciar em seu rendimento. Um outro aspecto que é muito importante para a montagem do sistema foi apresentado: os ângulos de orientação dos módulos de acordo com a região em que se encontram.

Depois, todo o sistema utilizado foi descrito, tanto o tradicional quanto o concentrador. Evidenciou-se a respeito do rastreamento solar que foi empregado no projeto, assim como seu funcionamento e descrição, que é essencial para aumentar a eficiência do painel. Outro aspecto importante se dá sobre como os dados necessários para o estudo foram adquiridos. Isso foi explicado para cada grandeza medida, assim como os sensores utilizados e a localização deles. Falou-se sobre a máxima potência, a forma com que ela é obtida através do módulo de monitoramento e sobre como ele é importante para a aquisição dos dados e para o condicionamento antes de serem levados ao servidor local.

Com relação aos resultados, foram comprovados o funcionamento do circuito de chaveamento, que varia a carga observada pelo painel fotovoltaico, e do módulo de monitoramento de máxima potência. Depois foram feitos os experimentos com os dois sistemas, gerando dados e plotando gráficos importantes para o estudo realizado.

A conclusão obtida foi que o sistema concentrador não aumentou a eficiência energética do PV como era esperado e desejado, fato este comprovado quando comparado ao tradicional. Ambos os sistemas produziram praticamente a mesma quantidade de energia, evidenciando que o sistema tradicional, para esse caso em especial, apresenta um menor custo de implementação, já que não conta com um sistema de rastreamento do Sol (espelhos e estrutura). Sugere-se que esse fato seja causado pela má escolha do material reflexivo presente nos espelhos onde, nesse projeto, foram utilizados os comuns. Paralelamente a isso, um outro motivo para a não-eficiência do sistema concentrador pode estar concentrado no tamanho dos espelhos, que deveriam ser maiores e além disso, sua estrutura não deveria apresentar regiões em que não há material reflexivo.

Com relação aos trabalhos futuros, seria interessante que a pesquisa nesse tema utilizasse espelhos com outro tipo de material reflexivo, de melhor qualidade, o que levaria a uma melhor reflexão da luz e concentração solar na face captadora do módulo fotovoltaico. Além disso, sugere-se que sejam utilizados espelhos maiores e que se encontrem em uma estrutura mais adequada, aproveitando ainda mais a sua área de captação da radiação eletromagnética. Para o caso disso ocorrer, seria necessário um resfriamento do PV, uma vez que de fato a radiação incidente nele for de três vezes a do Sol, sua temperatura aumentaria consideravelmente e, portanto, influenciaria de forma negativa em seu rendimento.

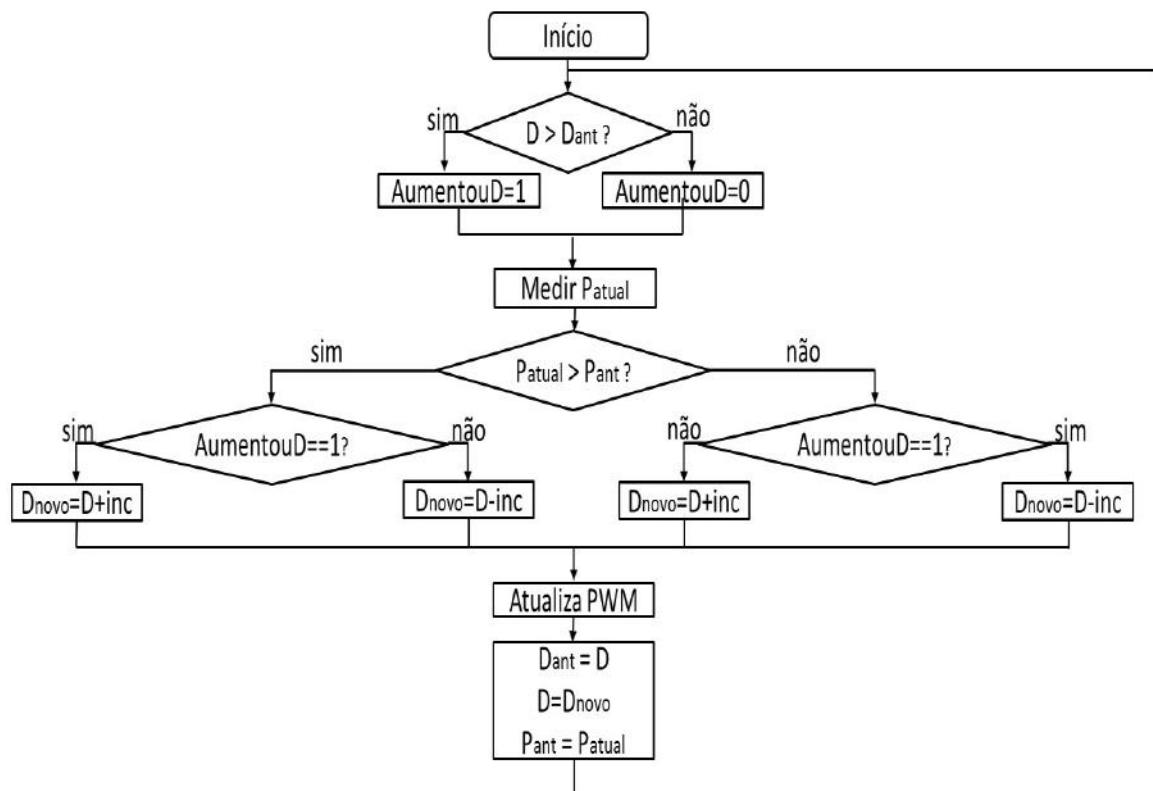
Referências Bibliográficas

- [1] KALOGIROU, S. A., “Environmental benefits of domestic solar energy systems”, *Energy conversion and management*, v. 45, pp. 3075–3092, 2004.
- [2] ANTÓNIO M. V., M. C. B., “Meio Século de História Fotovoltaica”, *Gazeta de Física*, pp. 10–15, 2006.
- [3] GODDARD, R. H., “A New Invention to Harness the Sun”, *Popular Science*, v. 115, n. 5, pp. 22–23, 1929.
- [4] FERNANDEZ-GARCIA, A., ZARZA, E., VALENZUELA, L., et al., “Parabolic-trough solar collectors and their applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 7, pp. 1695–1721, 2010.
- [5] “Fraunhofer ISE, Levelized Cost of Electricity - Renewable Energy Technologies”, www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichtungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehung-skostenerneuerbare-energien.pdf, 2013, acessado em 29/02/2016.
- [6] VILLALVA, M., GAZOLI, J., *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. ERICA, 2012.
- [7] “Semicondutor”, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Semicondutor>, acessado em 27/02/2016.
- [8] “Energia Solar - Princípios e Aplicações”, http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf, acessado em 27/02/2016.
- [9] SINGH, P., PALWALIA, D., GUPTA, A., et al., “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 22, pp. 439–449, 2007.
- [10] RIBEIRO, R., “Sistema Fotovoltaico Baseado Em Conversores CC-CC Boost”, 2012.

- [11] S. HORNE, M. MCDONALD, N. H., DESY, K., “Reflective Optics CPV Panels Enabling Large Scale, Reliable Generation of Solar Energy Cost Competitive with Fossil Fuels”, *National Renewable Energy Laboratory*.
- [12] PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. D., et al., *Atlas brasileiro de energia solar*. v. 1. INPE, 2006.

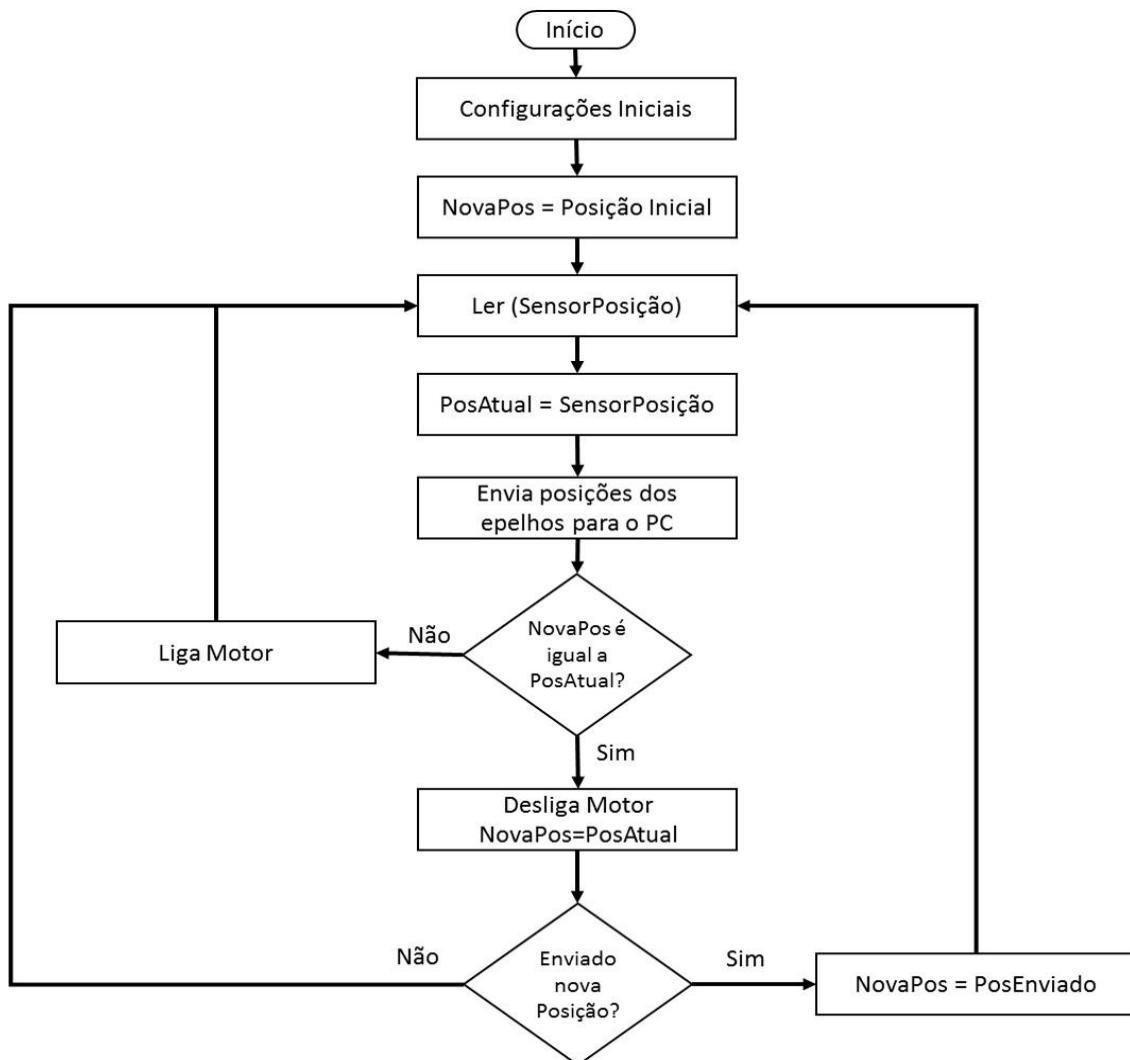
Apêndice A

Fluxograma do Algoritmo *Perturbe & Observe*



Apêndice B

Fluxograma do *Firmware* do Sistema de Controle dos Motores de Azimute e Elevação



Apêndice C

Firmware do Sistema de Aquisição e Condicionamento de Dados

```
//LABORATORIO DE INSTRUMENTACAO E FOTONICA
//ALUNO DE GRADUACAO: GUSTAVO MARQUES MATTOS
//PROJETO MAXIMA POTENCIA

//Declaracoes e definicoes

unsigned long Sv = 0.0;          //Soma dos quadrados dos valores de tensao
unsigned long Si = 0.0;          //Soma dos quadrados dos valores de corrente
unsigned long P;                //Variavel auxiliar
float MaxPot = 0;               //Maxima Potencia
float Vrms = 0.0;               //Tensao RMS
float Irms = 0.0;               //Corrente RMS
float Prms = 0.0;               //Potencia RMS
float t_painel;                //Temperatura do painel
float t_interna;                //Temperatura interna da caixa do sistema de monitoramento
char comando = 'a';             //Variavel que recebe o comando digitado pelo usuario
int sol;                        //Radiacao solar
int pontos = 400;              //Numero de pontos a serem tomados
int V[400];                     //Vetor de valores de tensao
```

```

int I[400];                                //Vetor de valores de corrente
int k;                                      //Iterador
int ciclo = 0;                               //Ciclo de trabalho
int contador = 1;                            //Contador para definir qual painel
                                              utilizar
int porta_11 = 11;                           //Painel Concentrador
int porta_13 = 13;                           //Painel Tradicional
int c_teste;
int MaxPot;

void setup()
{
    Serial.begin(115200);                      //setup serial
    TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0x07;        //setup PWM para
                                              30Hz
    pinMode(porta_11, OUTPUT);
    pinMode(porta_13, OUTPUT);
    digitalWrite(porta_11, HIGH);
    digitalWrite(porta_13, HIGH);
    delay(1000);
    Serial.println("Ciclo\tVrms\tIrms\tPrms\tRad.\tT.Pai\tT.Int.");
}

void loop()
{
    while (!(comando=='M' || comando=='m'))
    {
        if (Serial.available() > 0)
        {
            comando = Serial.read();
            //Serial.println(comando);
        }
    }

    if(ciclo==0)
    {
        if(contador%2 != 0)
        {
            digitalWrite(porta_11, LOW);      //PAINEL TRADICIONAL

```

```

        digitalWrite(porta_13, HIGH);
        Serial.println("REF");
    }

    if(contador%2 == 0)
    {
        delay(1000);
        digitalWrite(porta_13, LOW);      //PAINEL CONCENTRADOR
        digitalWrite(porta_11, HIGH);
        Serial.println("FAZ");
    }
    delay(1000);
}

ciclo++;

analogWrite(3, int(255*ciclo/100));
delay(100);

for (k=0; k<pontos; k++)
{
    V[k] = analogRead(1);
    I[k] = analogRead(0) - 517;
}

analogWrite(3, 0);

// CALCULO DA MAXIMA POTENCIA

Sv = 0.0;
Si = 0.0;

for (k=0; k<pontos; k++)
{
    P = V[k];
    Sv = Sv+P*P;
    P = I[k];
    Si = Si+P*P;
}

```

```

Vrms = sqrt(Sv/pontos)*24.88/1023.0;
Irms = (sqrt(Si/pontos)*5.24+13.12)/100.0;
Prms = Vrms*Irms;

// FIM DO CALCULO DA MAXIMA POTENCIA

Serial.print(ciclo);
Serial.print("\t");
Serial.print(Vrms);
Serial.print("\t");
Serial.print(Irms);
Serial.print("\t");
Serial.print(Prms);
Serial.print("\t");
//Serial.print(sol = analogRead(3));
Serial.print(sol = analogRead(3)*5.0948 - 20.131);
Serial.print("\t");
Serial.print(t_painel = analogRead(4)*5.0/10.23);
Serial.print("\t");
Serial.println(t_interna = analogRead(2)*5.0/10.23 - 20.0);

if (MaxPot <= Prms)
{
    MaxPot=Prms;
    c_teste = 0;
}
else
{
    c_teste++;
    if (c_teste>5)
    {
        Serial.println("FIM");
        Serial.print("Max Pot = ");
        Serial.print(MaxPot);
        Serial.print("W no ciclo ");
        Serial.print(ciclo - 6);
        Serial.println("% PWM");
        ciclo = 0;
    }
}

```

```
    MaxPot = 0;
    delay(60000);
}

if (ciclo == 100)
{
    ciclo = 0;
}

if (contador%2 == 0 && ciclo == 0)
{
    digitalWrite(porta_11, HIGH);
    digitalWrite(porta_13, HIGH);
    comando='a';
}

if (ciclo == 0) contador++;
}
```

Apêndice D

Firmware do Sistema de Tratamento dos Dados

```
#LABORATORIO DE INSTRUMENTACAO E FOTONICA
#ALUNO DE GRADUACAO: GUSTAVO MARQUES MATTOS
#PROGRAMA TRATADOR DE DADOS

import time

delay = 0

print("\nDATA DE TERMINO\n")
dia_parada = input("Dia: ")
if int(dia_parada) < 10: dia_parada = "0" + str(dia_parada)
mes_parada = input("Mes: ")
if int(mes_parada) < 10: mes_parada = "0" + str(mes_parada)
ano_parada = input("Ano: ")
if int(ano_parada) < 10: ano_parada = "0" + str(ano_parada)
hora_parada = input("Hora: ")
if int(hora_parada) < 10: hora_parada = "0" + str(hora_parada)
min_parada = input("Minuto: ")
if int(min_parada) < 10: min_parada = "0" + str(min_parada)

arquivo = open("recuperados_2013_2014.txt", "r")
it1 = arquivo.readline()
it2 = arquivo.readline()
it3 = arquivo.readline()
```

```

Id_Equip = "22"

rosa_ventos = ["E", "ENE", "NE", "NNE", "N", "NNW", "NW", "WNW", \
"W", "WSW", "SW", "SSW", "S", "SSE", "SE", "ESE"]

while True:

    DADOS = arquivo.readline()
    DADOS_LISTA = DADOS.split()

    #print(DADOS_LISTA)

    hora = DADOS_LISTA[1][0:2]
    if ":" in hora:
        hora = "0" + DADOS_LISTA[1][0:1]
        minuto = DADOS_LISTA[1][2:4]
    else:
        minuto = DADOS_LISTA[1][3:5]
        segundo = "00"

    dia = DADOS_LISTA[0][0:2]
    if "/" in dia:
        dia = "0" + DADOS_LISTA[0][0:1]
        mes = DADOS_LISTA[0][2:4]
        ano = DADOS_LISTA[0][5:7]
    else:
        mes = DADOS_LISTA[0][3:5]
        ano = DADOS_LISTA[0][6:8]

    if DADOS_LISTA == []:
        break

#try verifica se algum dado nao foi obtido, o que e representado
#no arquivo de dados pela string "---"
try:
    tipo_temp, Id_temp_ext, temp_ext = "3", "104",
    float(DADOS_LISTA[2])
    tipo_temp, Id_temp_max, temp_max = "3", "105",
    float(DADOS_LISTA[3])

```

```

    tipo_temp, Id_temp_min, temp_min = "3", "106",
float(DADOS_LISTA[4])

    tipo_umid, Id_umid_ext, umid_ext = "15", "107",
float(DADOS_LISTA[5])

    tipo_temp, Id_pto_orv, pto_orv = "3", "110",
float(DADOS_LISTA[6])

    tipo_vel, Id_vel_ven, vel_ven = "29", "122",
float(DADOS_LISTA[7])

    tipo_angulo, Id_dir_vento, dir_vento = "30", "121",
DADOS_LISTA[8]

    tipo_vel, Id_mai_vel_ven, mai_vel_ven = "29", "111",
float(DADOS_LISTA[10])

    tipo_angulo, Id_max_abert_dir_ven, max_abert_dir_ven = "30",
"112", DADOS_LISTA[11]

    tipo_temp, Id_sens_term, sens_term = "3", "113",
float(DADOS_LISTA[12])

    tipo_temp, Id_ind_cal, ind_cal = "3", "114",
float(DADOS_LISTA[13])

    tipo_temp, Id_thw_index, thw_index = "3", "119",
float(DADOS_LISTA[14])

    tipo_press_atm, Id_press_atm, press_atm = "20", "64",
float(DADOS_LISTA[16])

    tipo_prec_pluv, Id_prec_pluv, prec_pluv = "31", "115",
float(DADOS_LISTA[17])

    tipo_irrad, Id_irrad_sol, irrad_sol = "19", "63",
float(DADOS_LISTA[19])

    tipo_energia, Id_energ_sol, energ_sol = "28", "120",
float(DADOS_LISTA[20])

    tipo_irrad, Id_max_irrad_sol, max_irrad_sol = "19", "116",
float(DADOS_LISTA[21])

    tipo_temp, Id_temp_int, temp_int = "3", "108",
float(DADOS_LISTA[24])

    tipo_umid, Id_umid_int, umid_int = "15", "109",
float(DADOS_LISTA[25])

    tipo_temp, Id_temp_orv_int, temp_orv_int = "3", "117",
float(DADOS_LISTA[26])

    tipo_temp, Id_temp_cal_int, temp_cal_int = "3", "118",
float(DADOS_LISTA[27])

#se um dado nao foi obtido, sera levantado o ValueError

```

```

#ao tentar converter "___" para float
except ValueError:
    print ("\nDADO NAO OBTIDO AS", DADOS_LISTA[1], "DO DIA",
DADOS_LISTA[0], "!\n")
#no mais, executa o programa
else:
    #assume valores para angulos no caso de dados da direcao
    #do vento
    if DADOS_LISTA[8] in rosa_ventos:
        dir_vento = rosa_ventos.index(DADOS_LISTA[8])
        * 22.5
    else:
        dir_vento = -5.0

    if DADOS_LISTA[11] in rosa_ventos:
        max_abert_dir_ven = rosa_ventos.index(DADOS_LISTA[11])
        * 22.5
    else:
        max_abert_dir_ven = -5.0

#dados de hora, minuto e segundo formatados

#-----
#str(time.localtime()[5])
#if time.localtime()[5] < 10:
#    segundo = "0" + str(time.localtime()[5])

#-----
#pegar dados a cada 15 min
if int(minuto) % 15 == 0:

    #hora sem separacao por :
    hora_dado = hora + minuto + segundo
    #hora separada por :
    HORA_DADO = hora + ":" + minuto + ":" + segundo
    nomedoarq = "LIF-" + dia + mes + ano + "-" + hora_dado
    + ".DAT"

```

```

#nome do arquivo
NOMEDOARQ = "LIF-" + hora_dado
#data
DT = dia + "-" + mes + "-" + ano + " " + HORA_DADO
#cabeçalho
cabecalho = nomedoarq + ";" + DT + ";" + Id_Equip

try:

    tentativa = open(nomedoarq, "r")

except IOError:

    print("-----\n\
+ cabecalho + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_ext + ";" + DT + ";" + 
str(temp_ext) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_max + ";" + DT + ";" + 
str(temp_max) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_min + ";" + DT + ";" + 
str(temp_min) + "\n\
+ tipo_umid + ";" + Id_umid_ext + ";" + DT + ";" + 
str(umid_ext) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_pto_orv + ";" + DT + ";" + 
str(pto_orv) + "\n\
+ tipo_vel + ";" + Id_vel_ven + ";" + DT + ";" + 
str(vel_ven) + "\n\
+ tipo_angulo + ";" + Id_dir_vento + ";" + DT + ";" + 
str(dir_vento) + "\n\
+ tipo_vel + ";" + Id_mai_vel_ven + ";" + DT + ";" + 
str(mai_vel_ven) + "\n\
+ tipo_angulo + ";" + Id_max_abert_dir_ven + ";" + 
DT + ";" + str(max_abert_dir_ven) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_sens_term + ";" + DT + ";" + 
str(sens_term) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_ind_cal + ";" + DT + ";" + 
str(ind_cal) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_thw_index + ";" + DT + 
";" + str(thw_index) + "\n"

```

```

+ tipo_press_atm + ";" + Id_press_atm + ";" + DT +
%;" + str(press_atm) + "\n\
+ tipo_prec_pluv + ";" + Id_prec_pluv + ";" +
DT + ";" + str(prec_pluv) + "\n\
+ tipo_irrad + ";" + Id_irrad_sol + ";" + DT + ";" +
+ str(irrad_sol) + "\n\
+ tipo_energia + ";" + Id_energ_sol + ";" + DT + ";" +
str(energ_sol) + "\n\
+ tipo_irrad + ";" + Id_max_irrad_sol + ";" + DT +
%;" + str(max_irrad_sol) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_int + ";" + DT + ";" +
str(temp_int) + "\n\
+ tipo_umid + ";" + Id_umid_int + ";" + DT + ";" +
str(umid_int) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_orv_int + ";" + DT + ";" +
+ str(temp_orv_int) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_cal_int + ";" + DT + ";" +
+ str(temp_cal_int) + "\n\
+ -----")
dados = cabecalho + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_ext + ";" + DT + ";" +
str(temp_ext) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_max + ";" + DT + ";" +
str(temp_max) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_temp_min + ";" + DT + ";" +
str(temp_min) + "\n\
+ tipo_umid + ";" + Id_umid_ext + ";" + DT + ";" +
str(umid_ext) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_pto_orv + ";" + DT + ";" +
str(pto_orv) + "\n\
+ tipo_vel + ";" + Id_vel_ven + ";" + DT + ";" +
str(vel_ven) + "\n\
+ tipo_angulo + ";" + Id_dir_vento + ";" + DT + ";" +
str(dir_vento) + "\n\
+ tipo_vel + ";" + Id_mai_vel_ven + ";" + DT + ";" +
str(mai_vel_ven) + "\n\
+ tipo_angulo + ";" + Id_max_abert_dir_ven + ";" +
DT + ";" + str(max_abert_dir_ven) + "\n\
+ tipo_temp + ";" + Id_sens_term + ";" + DT + ";" +

```

```

        str(sens_term) + "\n" \
        + tipo_temp + ";" + Id_ind_cal + ";" + DT + ";" + 
str(ind_cal) + "\n" \
        + tipo_temp + ";" + Id_thw_index + ";" + DT + ";" + 
str(thw_index) + "\n" \
        + tipo_press_atm + ";" + Id_press_atm + ";" + DT
+ ";" + str(press_atm) + "\n" \
        + tipo_prec_pluv + ";" + Id_prec_pluv + ";" + DT +
";" + str(prec_pluv) + "\n" \
        + tipo_irrad + ";" + Id_irrad_sol + ";" + DT + ";" + 
str(irrad_sol) + "\n" \
        + tipo_energia + ";" + Id_energ_sol + ";" + DT + ";" + 
str(energ_sol) + "\n" \
        + tipo_irrad + ";" + Id_max_irrad_sol + ";" + DT +
";" + str(max_irrad_sol) + "\n" \
        + tipo_temp + ";" + Id_temp_int + ";" + DT + ";" + 
str(temp_int) + "\n" \
        + tipo_umid + ";" + Id_umid_int + ";" + DT + ";" + 
str(umid_int) + "\n" \
        + tipo_temp + ";" + Id_temp_orv_int + ";" + DT + ";" +
+ str(temp_orv_int) + "\n" \
        + tipo_temp + ";" + Id_temp_cal_int + ";" + DT + ";" +
+ str(temp_cal_int)

        arquivo_dados = open(nomedoarq, "w")
        arquivo_dados.write(dados)
        arquivo_dados.close()

    else:

        tentativa.close()

        time.sleep(delay) #tempo de delay entre a leitura de uma
                           #linha de dados e a proxima

    if dia == dia_parada and mes == mes_parada and ano == ano_parada
and hora == hora_parada and minuto == min_parada:
        break
arquivo.close()

```