



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

Sistema automatizado de limpeza e arrefecimento de placas fotovoltaicas para melhoria de eficiência

Felipe Ribeiro Moura

**Campo Grande - MS
Dezembro, 2020**



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

Sistema automatizado de limpeza e arrefecimento de placas fotovoltaicas para melhoria de eficiência

Felipe Ribeiro Moura

Orientador: Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Mato Grosso do Sul na Faculdade de
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e
Geografia, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Campo Grande - MS
Dezembro, 2020

Sistema automatizado de limpeza e arrefecimento de placas fotovoltaicas para melhoria de eficiência

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em
Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Marcio Luiz Magri Kimpara

Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara

Orientador

J. P. S.

Prof. Dr. João Onofre Pinto

Cristiano Quevedo Andrea

Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea

Campo Grande - MS
Dezembro, 2020

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Felipe Ribeiro Moura, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 1869787-9 e CPF nº 033.928.741.16, declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, com o título: Sistema automatizado de limpeza e arrefecimento de placas fotovoltaicas para melhoria de eficiência, é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este trabalho não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 28 de dezembro de 2020


Felipe Ribeiro Moura

*A Deus, aos meus pais, à Natália, meus amigos
e família.*

*“O âmago do espírito do homem pede novas
experiências.”*

Into the Wild.

AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais, por todos esses anos me dando suporte psicológico e financeiro para manter estudando, e por depositarem confiança em mim.

À minha namorada, pelo amor me dado, base de incentivo para me tornar uma pessoa melhor.

Ao Professor Dr. Márcio Luiz Magri Kimpara por acreditar em minhas ideias “malucas” e me ajudar a realizá-la com bônus de vitamina D no desenvolvimento do protótipo. Agradeço muito pela orientação, apoio, confiança, paciência e comprometimento para comigo.

Ao Professor Me. Francisco Bayardo por todos os anos de amizade, com certeza seus incentivos e conversar fiadas me ajudaram e ainda ajudam muito.

A todos meus amigos que conheci no período acadêmico pelas risadas, frustrações e sucessos adquiridos por todo esse período. Muito claro que a companhia de pessoas vencedores me fizeram eu acreditar também ser um vencedor.

.

RESUMO

Alinhado à preocupação com a melhoria do desempenho de painéis fotovoltaicos, dado o crescimento do uso dessa tecnologia, este trabalho buscou uma possível solução a dois dos principais fatores que prejudicam a eficiência da geração de energia elétrica solar: a sujeira e o aquecimento. Para isto, um protótipo foi elaborado utilizando o microcontrolador Arduino, transdutores e atuadores com o objetivo de: i) testar um sistema de limpeza automático por jateamento de água e; ii) instalar um compartimento com água abaixo da superfície do painel a fim de diminuir a temperatura nas células solares. Neste último caso, ainda existe a possibilidade de aproveitamento da água do sistema de arrefecimento dos painéis em chuveiros e torneiras. O protótipo foi testado em um painel fotovoltaico instalado na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para coleta de dados e análise de desempenho. Os resultados obtidos mostraram que os sistemas de limpeza e arrefecimento estudados podem melhorar a eficiência de geração de maneira vantajosa para aplicabilidade em sistemas fotovoltaicos residenciais. Levando em conta o baixo tempo de *payback*, os sistemas de melhoria de eficiência maximizam a geração, trazem certa comodidade pela automatização proposta, além de proporcionar um aproveitamento da energia térmica no aquecimento de água.

Palavras-Chave: Energia Solar Fotovoltaica, Limpeza automatizada, Arrefecimento de painéis solares, Protótipo, Arduino, Eficiência.

ABSTRACT

In line with the concern with improving the performance of photovoltaic panels, given the growing use of this technology, this work sought a possible solution to two of the main factors that hinder the efficiency of the generation of solar electricity: dirt and heating. For this, a prototype was developed using the Arduino microcontroller, transducers and actuators in order to: i) test an automatic cleaning system by water blasting and; ii) install a compartment with water below the surface of the panel in order to decrease the temperature in the solar cells. In the latter case, there is still the possibility of using water from the cooling system of the panels in showers and taps. The prototype was tested on a photovoltaic panel installed at the Federal University of Mato Grosso do Sul for data collection and performance analysis. The results obtained showed that the studied cleaning and cooling systems can improve the generation efficiency in an advantageous way for applicability in residential photovoltaic systems. Taking into account the low payback time, the efficiency improvement systems maximize the generation, bring some convenience through the proposed automation, besides providing a use of the thermal energy in the water heating.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy, Automated Cleaning, Cooling of solar panels, Prototype, Arduino, Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Figura 2.1 Mapa solar do Brasil	24
Figura 2.2 Linha do zênite e ângulo zenital.	25
Figura 2.3 Estações do ano nos hemisférios sul e norte.	26
Figura 2.4 Desprendimento dos elétrons dos átomos de silício pela ação dos fótons formando a corrente elétrica	28
Figura 2.5 Composição de um painel fotovoltaico	28
Figura 2.6 Principais elementos que compõe um sistema fotovoltaico	29
Figura 2.7 Gráfico de geração $I - V$ e $P \times V$	31
Figura 2.8 Gráfico $I - V$ ilustrando a perturbação do inversor na tensão de saída dos módulos na busca do MPPT	32
Figura 2.9 Gráfico $P \times V$ ilustrando a perturbação do inversor na tensão de saída dos módulos na busca do MPPT	33
Figura 2.10 Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico	34
Figura 2.11 Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico	35
Figura 2.12 Sujeira sob diferentes condições de limpeza	36
Figura 3.1 Foto aérea de Araguainha, onde se vê, em 1, o sistema de com oito painéis e em 2, a MT 100	38
Figura 3.2 Detalhe do sistema de oito painéis instalado em Araguainha	38
Figura 3.3 Potência de geração dos módulos instantânea às 11:30	39
Figura 3.4 Potência de geração dos módulos instantânea às 14:00 (após a limpeza)	39
Figura 3.5 Tensão de saída dos módulos às 11:30	40
Figura 3.6 Tensão de saída dos módulos às 14:00 (após limpeza)	40
Figura 3.7 Corrente de saída dos módulos às 11:30	40

Figura 3.8	Corrente de saída dos módulos segundos antes da limpeza	41
Figura 3.9	Corrente de saída dos módulos às 14:00 (após limpeza)	41
Figura 4.1	Esquemático de funcionamento dos sistemas de limpeza e arrefecimento para o painel utilizado no protótipo de escala reduzida	44
Figura 4.2	Legenda das Figuras 4.1 e 4.26	45
Figura 4.3	Arduino Mega	46
Figura 4.4	Bomba 12 V, 150 psi	47
Figura 4.5	Motor com caixa de redução, 12 V, 60 rpm	47
Figura 4.6	Ponte H IBT-2 de 43A	48
Figura 4.7	Imagem Transdutor Ultrassônico	48
Figura 4.8	Encapsulamento Transdutor Ultrassônico	49
Figura 4.9	Imagem do RTC	50
Figura 4.10	Imagem do PT100	51
Figura 4.11	Gráfico que descreve o comportamento do PT100 na relação de temperatura por resolução no Arduino	51
Figura 4.12	Módulo Relé de 4 Canais	52
Figura 4.13	Válvula Solenoide	53
Figura 4.14	Mangueira de jardim verde	53
Figura 4.15	Brucutu de Celta	54
Figura 4.16	Bandeja com o interior visível	55
Figura 4.17	Bandeja com tampa de zinco acoplada	55
Figura 4.18	Imagem do transdutor de temperatura e umidade	56
Figura 4.19	Imagem de sensor de nível de água vertical	56
Figura 4.20	Transdutor de Radiação Ultravioleta - UV ML8511	57
Figura 4.21	Imagem do perfil de alumínio V-Slot	58

Figura 4.22	Imagem de guia com roldanas <i>V-Slot</i>	58
Figura 4.23	Imagem de cremalheira e engrenagem que a desloca	58
Figura 4.24	Imagem do display LCD 16x2 azul	59
Figura 4.25	Estrutura de sustentação desenvolvida em madeira	60
Figura 4.26	Esqueleto de um sistema real capaz de receber os painéis fotovoltaicos. Em 1, tem-se os suportes de telhado e, em 2, tem-se o perfil de alumínio, comumente chamado de trilha	60
Figura 4.27	Esquemático do Sistema de Arrefecimento e Limpeza com 8 Painéis Fotovoltaicos	62
Figura 4.28	Imagem do setup de teste e elementos do protótipo	66
Figura 5.1	Imagens do painel para experiencia de limpeza	69
Figura 5.2	Fotos térmicas da placa fotovoltaica em condições limpas pelo profissional e limpa pelo sistema	70
Figura 5.3	Imagens térmicas do painel com bandeja instalado sob o mesmo, analisando temperatura na região onde foi instalada a bandeja e na região lateral	75
Figura 5.4	Imagens térmicas do painel após colocar água na bandeja, analisando a temperatura originada na região onde estava a bandeja e na região lateral	75
Figura 5.5	Tensão de Máxima Potência por Corrente de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Limpeza e Sujidade	81
Figura 5.6	Tensão de Máxima Potência por Potência de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Limpeza e Sujidade	82
Figura 5.7	Tensão de Máxima Potência por Corrente de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Arrefecimento.	83

Figura 5.8 Tensão de Máxima Potência por Potência de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Arrefecimento.

84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Dados para situação do painel nas condições de limpeza do momento em que se fez a leitura	70
Tabela 2 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 1	71
Tabela 3 Dados para situação do painel nas condições de sujidade do momento em que se fez a leitura	71
Tabela 4 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 3	72
Tabela 5 Dados para situação do painel nas condições de sujidade do momento em que se fez a leitura	72
Tabela 6 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 5	73
Tabela 7 Dados de corrente segundo o experimento da Tabela 6. Porém, manipulando os dados de tensão para os valores da Tabela 4.....	74
Tabela 8 Dados climáticos e de situação do painel para situação em que foi colocada uma bandeja de alumínio em contato com sua parte debaixo do momento em que se fez a leitura (irradiação: 737 W/m ²).....	76
Tabela 9 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 8	76
Tabela 10 Dados climáticos e de situação do painel para situação em que foi colocada a bandeja em contato com sua parte debaixo do momento em que se fez a leitura (irradiação: 202 W/m ²).....	77
Tabela 11 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 10	77
Tabela 12 Dados climáticos e de situação do painel para situação em que foi colocada a bandeja com água no seu interior em contato com sua parte debaixo do momento em que se fez a leitura (irradiação: 281 W/m ²).....	78
Tabela 13 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 12, irradiação: 281 W/m ²	78

Tabela 14 Dados de tensão como segue a Tabela 13 e de corrente da Tabela 11, irradiação:

202 W/m²79

SUMÁRIO

RESUMO	vii
abstract	viii
Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas.....	13
Sumário	15
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. Objetivos	21
1.1.1. Objetivo Geral.....	21
1.1.2. Objetivos Específicos	21
1.2. Organização do Trabalho.....	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1. Recurso Solar	23
2.2. Radiação e Geometria Solar	23
2.3. Efeito Fotovoltaico	27
2.4. Legislação e Padrão de Instalação Fotovoltaica	29
2.5. Curva I – V do Pannel Solar	30
2.6. Agentes Naturais Impactantes na Geração de Energia Solar	33
3. SISTEMA MOTIVADOR	37
3.1. Sistema Piloto para Implantação do Sistema	37
3.2. Desempenho do Sistema de 3,2 kWp Após a Limpeza Realizada por Profissional.....	39
4. SOLUÇÃO	43
4.1. Principais Elementos que Compõem o Projeto de Melhoria de Eficiência	43
4.1.2. Microcontrolador - Arduino.....	45
4.1.3. Bomba.....	46
4.1.4. Motor	47
4.1.5. Módulo de Acionamento do Motor – Ponte H	47
4.1.6. Sensor Ultrassônico.....	48
4.1.7. Relógio de Tempo Real.....	49

4.1.8.	Sensor de Temperatura - PT100	50
4.1.9.	Relé	51
4.1.10.	Válvulas Solenoide	52
4.1.11.	Comunicação entre os elementos: Mangueiras, reduções e conexões	53
4.1.12.	Brucutu Automotivos.....	53
4.1.13.	Bandeja de Alumínio.....	54
4.1.14.	Transdutor de Temperatura e Umidade - AM2302 DHT22.....	56
4.1.15.	Sensor Nível de Água	56
4.1.16.	Transdutor de Radiação Ultravioleta - UV ML8511.....	57
4.1.17.	Perfil Estrutural em Alumínio V-Slot	57
4.1.18.	Cremalheira.....	57
4.1.19.	Display LCD.....	59
4.2.	Estrutura de Sustentação do Pannel do Protótipo	59
4.3.	Esquemático Planta 3,2 kWp	60
4.3.2.	Sistema de Limpeza para o Conjunto de 3,2 kWp.....	63
4.3.3.	Sistema de Arrefecimento para o Conjunto de 3,2 kWp.....	64
4.4.	Metodologia de Desenvolvimento do Protótipo com Pannel Fotovoltaico de 160 W	65
5.	RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESEMPENHO.....	68
5.1.	Desempenho do Pannel Referente a Condições de Sujidade	69
5.1.2.	Desempenho do Módulo Limpo Manualmente.....	70
5.1.3.	Desempenho do Módulo Sujo	71
5.1.4.	Desempenho do Módulo Limpo pelo Sistema Proposto	72
5.2.	Desempenho do Módulo Através das Condições de Temperatura (Arrefecimento)	74
5.2.2.	Desempenho do Módulo sem Água na Bandeja.....	76
5.2.3.	Desempenho do Módulo com Água na Bandeja.....	77
5.3.	Análises Gráficas	79
5.4.	Gráficos e Análises de Desempenho do Módulo para Condições de Sujidade e Limpeza ao qual foi Submetido na Seção 5.1	80
5.5.	Gráficos e Análises de Desempenho do Módulo para Condição de Arrefecimento ao qual foi Submetido na Seção 5.2	83
5.6.	Análise Simplificada da Viabilidade Econômica dos Sistemas de Limpeza e Arrefecimento	85
5.6.1.	Viabilidade Econômica do Sistema de Limpeza	86
5.6.2.	Viabilidade Econômica do Sistema de Arrefecimento	89

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	92
7. REFERÊNCIAS	94
APÊNDICE -FIGURAS AUXILIARES	97

1. INTRODUÇÃO

A geração solar fotovoltaica vem alterando o cenário mundial de energia como uma geração de energia limpa e mais acessível física e financeiramente aos usuários em relação às demais gerações distribuídas (GDs). Tomando como base os dados recentes do site Portal Solar, de outubro de 2020, nota-se que a energia solar compreende um total de 7 GW de potência instalada, o equivalente a 1,6% de toda a matriz energética brasileira e a 99,9% de toda a micro e minigerações distribuídas em residências, comércios, indústrias, propriedades rurais e prédios públicos [3].

A diversificação da matriz energética é essencial para reduzir os custos governamentais no setor elétrico e para adequação às leis ambientais, reduzindo emissão de CO_2 e evitando o desmatamento. A geração de energia elétrica brasileira depende majoritariamente de hidroelétricas, que apesar de ser uma fonte limpa, é dependente do regime de chuvas e, geralmente, fica distante dos grandes centros consumidores. Por outro lado, a geração distribuída permite postergar o investimento em novas linhas de transmissão e em novas unidades de geração centralizada distantes dos grandes centros. Entretanto, o investimento ainda deve ser realizado nas redes e linhas de distribuição para manter a confiabilidade do sistema.

Assim, a energia fotovoltaica, além de desafogar o setor elétrico brasileiro, traz benefícios aos usuários com a redução da fatura de energia, visto que a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) de abril de 2012 regulamentou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Segundo esta resolução, a unidade consumidora tem a capacidade de, ao gerar eletricidade, injetar a energia excedente na rede da concessionária local, ficando esta energia disponível ao usuário como crédito, inclusive com a possibilidade de cadastro de unidade(s) que se beneficiarão para reduzir também a fatura de energia. O crédito fica disponível para utilização do usuário por um período de 60 meses, porém é importante mencionar ainda que mesmo havendo crédito ao final de cada ciclo de faturamento, para unidades consumidoras de baixa tensão (grupo B), existe a tarifa mínima cobrada pelas concessionárias, que é referente ao custo de disponibilidade [13].

O sol é uma fonte de energia “inesgotável” e vital, disponível em todo o mundo, sendo que no Brasil, a geração fotovoltaica é favorecida pela alta incidência solar. Entretanto,

dois fatores implicam diretamente na eficiência das placas fotovoltaicas: o grau de sujeidade e o aquecimento. A depender da localidade, estes fatores exigem maior atenção. A sujeira em placas fotovoltaicas é resultante principalmente de poeira e poluição e, em alguns casos, de dejetos de pássaros. A solução para este problema consiste na limpeza com água potável, exigindo do cliente a contratação de um serviço pós-instalação. Na maioria dos casos, o cliente abdica da limpeza, deixando-a a cargo apenas de chuvas, o que desfavorece a máxima geração do conjunto solar. Por outro lado, um dos problemas recorrentes da instalação das placas fotovoltaicas é a inacessibilidade para fazer manutenções e, quando feitas, o telhado fica sujeito a rompimento de telhas por conta da locomoção do profissional, resultando em risco de acidente para os mesmos e em prejuízo financeiro (para trocas das telhas). Outro limitante é a escassez de profissionais que desempenhem tal função.

É importante notar que, para atingirem seu rendimento máximo, os painéis fotovoltaicos devem ser instalados com ângulo de inclinação igual à latitude do local em questão, ficando, portanto, menos inclinados quanto maior a proximidade entre o local de instalação e a Linha do Equador. Uma inclinação maior contribui para a limpeza dos módulos, pois permite escorrer a água da chuva. Do contrário, nos casos em que o ângulo da inclinação precisa ser baixo – como ocorre em boa parte do Brasil – a limpeza natural (chuva) dos módulos é insatisfatória. Além disso, em algumas localidades a água da chuva é bastante escassa, assim o acúmulo de poeira e poluição formam uma camada de impedimento de penetração dos raios ultravioletas nas células de silício.

Quanto ao aquecimento das placas fotovoltaicas, apesar de desejável que haja uma elevada incidência solar para a produção de eletricidade, a irradiação solar faz com que o módulo fotovoltaico acabe por absorver calor por meio das ondas eletromagnéticas, atingindo elevadas temperaturas que afetam negativamente a eficiência de conversão de luz em eletricidade. O cenário onde o problema se resolve espontaneamente é aquele em que há uma incidência intensa do sol sobre o conjunto solar aliada a uma temperatura ambiente capaz de manter a superfície dos painéis a 25 °C. Na ausência destas condições, outra solução possível é a instalação de conjuntos solares sobre superfícies molhadas, como lagos e mares. Desta forma, o contato com a água resfria o conjunto, dada sua capacidade calorífica. Tais cenários são muito específicos e não correspondem à situação da maioria dos usuários que desejam usufruir da tecnologia da energia solar em centros urbanos.

A impossibilidade do controle dos agentes naturais que prejudicam a captação de energia do sol pelos painéis encorajou o tema do presente trabalho. A sujeira depositada sobre os painéis fotovoltaicos tende a diminuir a eficiência dos mesmos, e ainda, o acúmulo de resíduos sem a devida limpeza, ao longo do tempo, pode ocasionar manchas e favorecer o surgimento de fungos, além de causar corrosão nos painéis, reduzindo sua vida útil [18].

Portanto, na busca por manter os painéis sempre limpos e maximizar sua eficiência (a depender de fatores climáticos), o projeto propõe a solução desenvolvendo um sistema automático que faça a limpeza dos painéis instalados utilizando uma bomba de alta pressão (150 psi) para fazer o jateamento de água na superfície coletora dos mesmos, de modo a utilizar o mínimo de volume d'água possível.

O sistema de limpeza como um todo gera o benefício adicional de fazer o arrefecimento dos painéis (caso se opte pela limpeza no horário mais quente). Contudo, para diminuir a temperatura dos painéis solares e ainda possibilitar um aproveitamento da energia térmica, também foi projetado um segundo sistema que consiste em uma bandeja de alumínio fixada na parte detrás da placa solar, a qual será preenchida com água. Com o contato direto da água com a placa fotovoltaica, parte do calor nas placas tende a ser passada para a água, reduzindo assim, a temperatura. Adicionalmente, é possível canalizar a água quente que estava na bandeja para um reservatório para posterior utilização em chuveiros e/ou torneiras.

Para avaliar o sistema proposto, um protótipo foi desenvolvido em escala reduzida, entretanto a motivação para o trabalho é atender um sistema real, instalado na cidade de Araguainha (MT), composto por um conjunto de oito placas fotovoltaicas ligadas em série (*String*). Portanto, o dimensionamento mecânico do protótipo foi pensado nas dimensões do sistema mencionado. Após a validação do sistema, realizou-se um estudo de viabilidade econômica simplificada para avaliar a relação custo benefício entre o investimento realizado e o retorno obtido em termos de melhoria de eficiência.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo de limpeza automática e arrefecimento de módulos fotovoltaicos, incluindo o estudo de desempenho em termos de melhoria de eficiência na geração em uma placa de 160 Wp, e observando a o impacto econômico para um sistema de oito módulos (3,2 kWp).

1.1.2. *Objetivos Específicos*

Dentre os objetivos específicos, têm-se:

- Estudo da melhor prototipagem para testar o sistema com uma placa, de modo a reaproveitar o material utilizado para o sistema de 3,2 kWp;
- Listagem e orçamento de materiais necessários para o desenvolvimento do sistema;
- Desenvolvimento do algoritmo de operação e programação do *firmware* no microcontrolador Arduino;
- Análise comparativa de eficiência do módulo para um cenário com camada de poeira sobre as células e em seguida com o sistema de limpeza proposto funcionando;
- Análise comparativa de eficiência antes e após a instalação do sistema de arrefecimento;
- Análise de viabilidade simplificada para o sistema de 3,2 kWp (energia gerada, reutilização da água do arrefecimento para chuveiros, *payback*).

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho conta com 6 capítulos. O primeiro contextualiza o tema, e ainda expõe os problemas rotineiros que as condições ambientais e de sujeira provocam em um sistema fotovoltaico. O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos e a fundamentação teórica acerca do tema relacionado ao trabalho, tais como recurso solar, radiação e ângulos de geometria solar, efeito fotovoltaico nas células de silício, legislação, curva I – V do painel e agentes naturais impactantes na geração solar.

O Capítulo 3 detalha a situação do sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCCR) motivador para o desenvolvimento da proposta de trabalho. Além disso, apresenta as características do local onde tal sistema está instalado. O Capítulo 4 expõe os principais elementos que compõem o projeto desenvolvido em escala menor para avaliar o desempenho e o custo benefício da solução proposta, ou seja, um sistema de limpeza automatizado e um dispositivo que ajuda a diminuir a temperatura dos painéis solares, além do layout da planta do sistema completo de 3,2 kWp para o sistema piloto e detalhes do esquemático funcional dos sistemas de limpeza e arrefecimento.

O Capítulo 5 descreve os testes realizados para a análise de desempenho dos módulos; os resultados obtidos dos ganhos de potências em relação aos dois sistemas propostos; as diferenças quantitativas dos cenários: painel limpo manualmente, painel limpo pelo sistema de forma automatizada, painel sujo, painel sem água no reservatório de resfriamento das células e painel com água fazendo o arrefecimento; além de gráficos de ganhos de potência gerada do painel sem os sistemas de melhoria de eficiência em relação aos sistemas com melhoria de eficiência, bem como o cálculo de *payback*. As análises foram feitas considerando apenas uma placa solar, porém as conclusões podem ser estendidas proporcionalmente para a escala maior de oito painéis de 3,2 kWp.

Por fim, o Capítulo 6 elucida as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. RECURSO SOLAR

Sendo a principal fonte de energia para a Terra, o Sol tem um papel fundamental à vida no planeta, fornecendo aproximadamente $1,5 \times 10^{18}$ kWh por ano para atmosfera terrestre, o que equivale a 10 mil vezes o consumo mundial de energia no mesmo período [19].

O Brasil é um país com grande potencial de geração fotovoltaica. No local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade a partir da energia solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, por exemplo. Apesar de a utilização ainda ser baixa, o uso da energia solar é o que apresenta tendência de aumento mais relevante quando comparado ao de outras matrizes [9, 20].

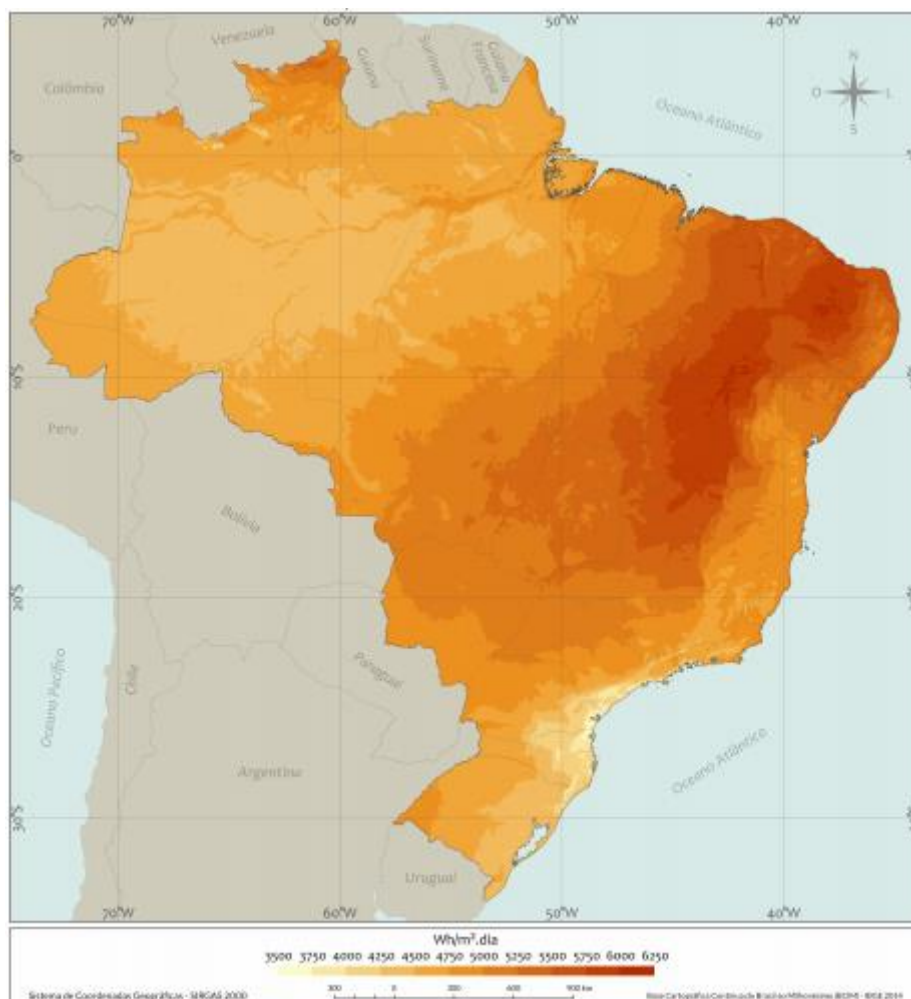
2.2. RADIAÇÃO E GEOMETRIA SOLAR

Existem quatro importantes conceitos correlacionados a energia solar. São eles: radiação eletromagnética, irradiância, irradiação e massa de ar. A radiação eletromagnética, ou simplesmente radiação, é constituída de ondas eletromagnéticas que possuem frequências e comprimentos de ondas diferentes. Além disso, a radiação é o efeito capaz de propagar energia, sem que haja a necessidade de um meio material para que isso ocorra. Irradiância, por sua vez, é a grandeza empregada para quantificar a radiação solar, expressa na unidade W/m^2 (watt por metro quadrado). A medida de irradiância necessita de uma área particular de modo que a radiação incida sobre essa área [15, 21].

O conceito de irradiação ou insolação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar incidente sobre uma determinada área em um intervalo de tempo. A irradiância do Sol é uma medida variável em função da distância entre a Terra e o Sol. Porém, na busca por uma constante que represente a média dessa distância, determinou-se a constante solar ϵ_0 , a qual considera uma superfície perpendicular à direção do feixe incidente no topo da atmosfera, sendo seu valor médio de 1.367 W/m^2 [15, 21].

Na Figura 2.1 se vê a radiação solar horizontal global anual do Brasil.

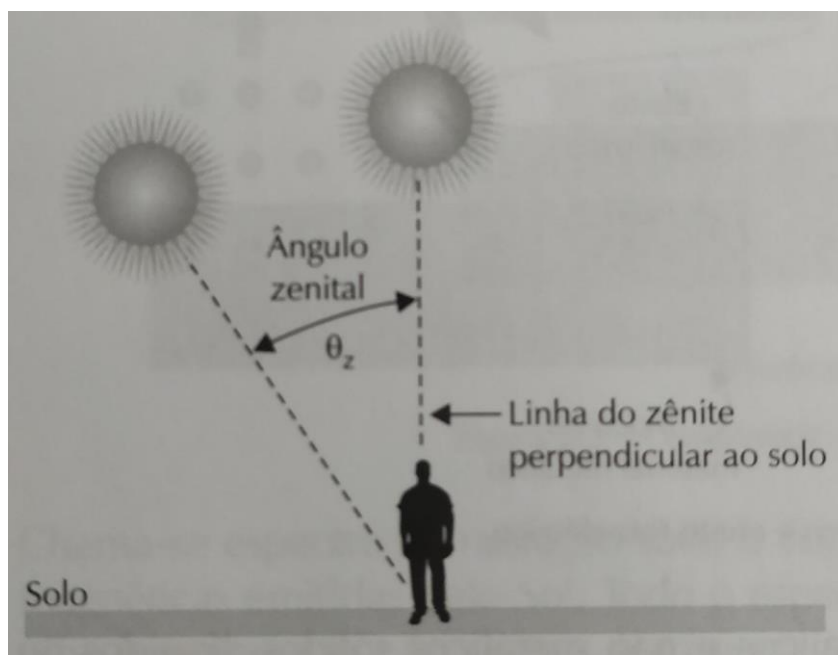
Figura 2.1 Mapa solar do Brasil



Fonte: [9]

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação é influenciada pela espessura da camada de ar e pela composição da atmosfera, incluindo o ar e os elementos suspensos, como o vapor de água e a poeira. A espessura da camada de ar atravessada pelos raios solares consiste no comprimento do trajeto do início da atmosfera até o solo. Esse trajeto depende do ângulo de inclinação do Sol com relação à linha do zênite, ou ângulo zenital do Sol, ilustrado na Figura 2.2 [15].

Figura 2.2 Linha do zênite e ângulo zenital.



Fonte: [15]

O zênite é uma linha imaginária perpendicular ao solo. O ângulo zenital do Sol é zero quando ele se encontra exatamente acima do observador [15].

A massa de ar, internacionalmente definida pela sigla AM (do inglês, *Air Mass*) é calculada por:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

Onde θ_z é o ângulo zenital do Sol, conforme Figura 2.2 [15].

A massa de ar atravessada pelos raios solares na atmosfera depende do ângulo zenital do Sol: quando o ângulo é mais próximo da vertical, a radiação solar enfrenta uma massa de ar menor, e assim sendo, quando é verão no Brasil e o ângulo da zenital do Sol se torna baixo, a camada de ar mais fica mais fina [15].

Na Figura 2.3 pode-se ver as estações do ano em ambos os hemisférios.

Figura 2.3 Estações do ano nos hemisférios sul e norte.



Fonte: [17]

As estações do ano determinam a disposição do sol em cada hemisfério e apontam uma “previsão do tempo” generalizada, ou seja, as condições climáticas características. Como o Brasil apresenta uma extensão territorial muito grande, abarcando cerca de 39° em sua latitude (de 5° Norte a 34° Sul), os climas brasileiros compreendem: equatorial, tropical, tropical de altitude, semiárido, subtropical e temperado-subtropical [8].

O ângulo azimutal é o ângulo que representa a trajetória dos raios solares do nascer ao pôr do sol com relação ao norte geográfico. Diz-se que o azimute é zero, ou que ocorre o azimute solar, quando a posição do sol coincide com o norte polar da Terra. Com isso, painéis solares cujas faces estão voltadas para o Leste terão aproveitamento da energia solar somente no período da manhã, e no período da tarde, os raios solares deixarão de incidir diretamente sobre as células, diminuindo a geração de energia. Por outro lado, placas solares com suas faces voltadas para o Oeste, aproveitarão o período da tarde. Desta forma, a melhor maneira de se aproveitar a energia do sol sem que haja necessidade de sistemas de rastreamento do sol, é posicionar as faces dos painéis fotovoltaicos para o norte geográfico, para o caso de regiões abaixo da Linha do Equador [15].

Outro importante fator que influencia diretamente na geração de energia por meio do sol, é o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos. Não há um consenso sobre o melhor método para escolher o ângulo de inclinação dos painéis, uma vez que painéis inclinados horizontalmente privilegiam a geração no verão, e inclinados verticalmente, no inverno. Com isso, determinou-se que o melhor ângulo de captação da energia do sol é dado por aquele correspondente à latitude do local a ser instalado. No Anexo C, obtido do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), verifica-se a diferença que uma pequena variação no ângulo de inclinação dos módulos em relação ao plano horizontal provoca sobre a irradiação. Além disso, não é recomendada a instalação de painéis cuja inclinação é menor que 10° pelo acúmulo de poeira que se forma sobre eles [15].

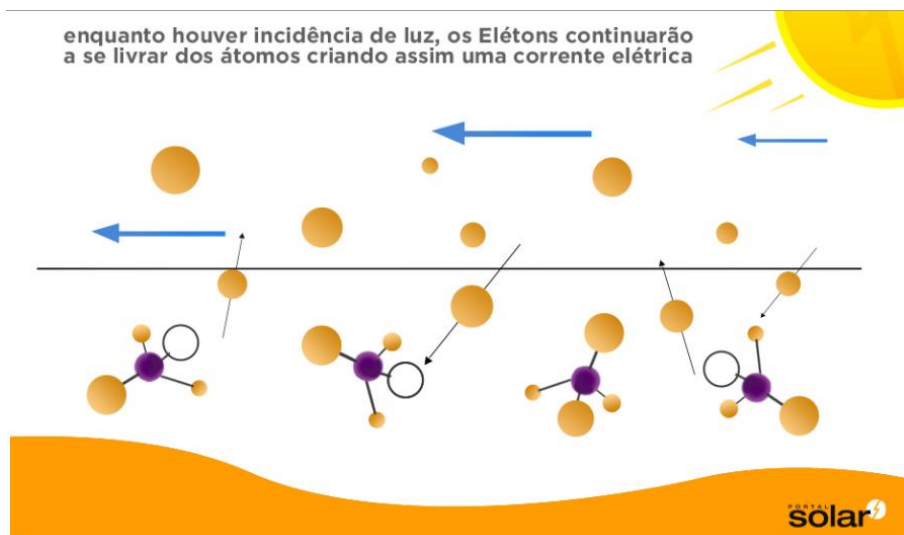
2.3. EFEITO FOTOVOLTAICO

Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra do tipo N. Existem células de múltiplas junções, que possuem um número maior de camadas, entretanto seu funcionamento é idêntico ao das células de duas camadas. Um material semicondutor é aquele que não pode ser classificado nem como condutor elétrico, nem como um isolante, porém, as propriedades de um semicondutor permitem modificações por meio de adição de materiais dopantes ou impurezas. De modo geral, o silício é o principal elemento por trás da conversão da energia solar em energia elétrica no mundo (cerca de 95% de todas as células fotovoltaicas utilizam desse elemento). Afortunadamente, é um material em abundância no planeta [15].

Sendo o silício um material semicondutor tetravalente, ele é combinado com o boro criando uma carga negativa e com fósforo criando uma carga positiva. A combinação silício-fósforo é intercalada pela combinação silício-boro, permitindo que o silício interaja com os fótons provindos do sol. A interação dos fótons com o silício resulta no desprendimento de elétrons que migram através da corrente elétrica para a parte da célula de silício que está com ausência de elétrons (vide Figura 2.4), até que essa corrente de elétrons seja conduzida por cabos ao inversor de frequência, que por sua vez faz a conversão da corrente contínua (CC), que sai dos módulos, em corrente alternada (CA), necessária para conexão à maioria dos equipamentos comerciais (e para um sistema *on-grid*, onde é feita a conexão com a rede da

concessionária) [2]. Na Figura 2.5 observam-se as partes que compõem um painel fotovoltaico.

Figura 2.4 Desprendimento dos elétrons dos átomos de silício pela ação dos fótons formando a corrente elétrica



Fonte: [2].

Figura 2.5 Composição de um painel fotovoltaico

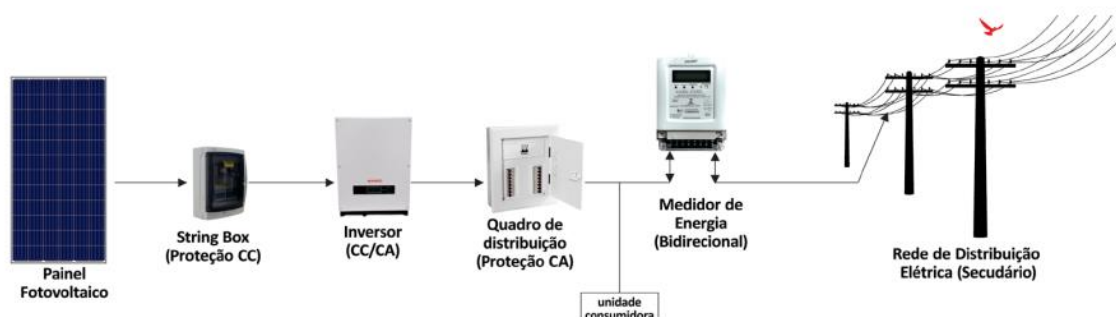


Fonte: [2].

2.4. LEGISLAÇÃO E PADRÃO DE INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA

Na Figura 2.6 pode se visualizar o esquemático genérico com os componentes essenciais de um sistema de geração de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas. Evidentemente, a depender das condições do local de instalação, potência do sistema, entre outros fatores, o engenheiro responsável se incumba de inserir outros elementos que serão necessários ao projeto, como baterias e controlador de carga. No caso da Figura 2.6, os elementos apresentados se referem a um sistema *on-grid*.

Figura 2.6 Principais elementos que compõe um sistema fotovoltaico



Fonte: [7].

Como se observa, as placas fotovoltaicas fazem a captação da radiação solar, convertendo a energia do sol em energia elétrica (CC). Através de cabos específicos para corrente contínua, as saídas do painel fotovoltaico são ligadas à *String Box*, cuja função é fazer a proteção do sistema com fusíveis, dispositivos de proteção contra surto (DPS), também específico para corrente contínua, e uma chave de seccionamento. O inversor tem uma das funções mais importantes no sistema: como dito no parágrafo anterior, ele é responsável por fazer a conversão da corrente contínua em corrente alternada, fazer o paralelismo com a rede para o caso de uma conexão *on-grid*, bem como a proteção com o sistema anti-ilhamento para a segurança dos profissionais que operam na concessionária. Deste modo, o inversor está sujeito a várias normas, as quais o fabricante deve seguir e certificá-los via Inmetro. Na saída do inversor, coloca-se um quadro de proteção CA, deste deriva-se para a carga da unidade consumidora e para o medidor, que por fim é conectado à rede da concessionária.

Classificam-se os tipos de geração fotovoltaica como Microgeração Distribuída, quando a central geradora de energia tem potência instalada menor ou igual a 75 kW, e

Minigeração Distribuída, quando a central geradora tem potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW [1].

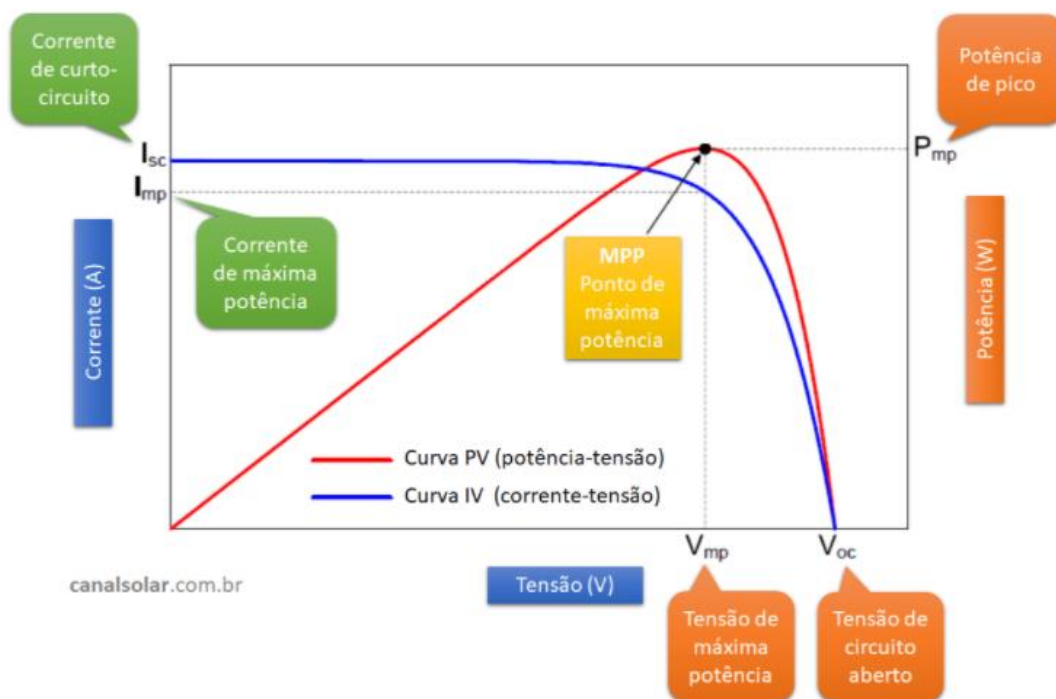
Apesar da Resolução Normativa ANEEL nº 482 que define o sistema de compensação de energia elétrica para unidades consumidoras que são também geradoras, os custos de disponibilidade para o grupo B são dependentes dos padrões de entradas de cada unidade consumidora que é beneficiada pela geração – tanto a central geradora como a(s) unidade(s) consumidora(s) que participa(m) do rateio da energia gerada, caso exista(m), sendo 30 kWh/mês para padrões monofásicos, 50 kWh/mês para padrões de entradas bifásicos e 100kWh/mês para padrões trifásicos [22].

2.5. CURVA I – V DO PAINEL SOLAR

A eficiência de um módulo fotovoltaico é baseada em parâmetros que indicam sua potência de saída, sendo estes a corrente e a tensão, nível de irradiação e temperatura. Um detalhe importante a salientar é sobre a metodologia para medição desses parâmetros, visto que a norma técnica IEC 60904-3, da *International Electrotechnical Commission* (IEC), determina que os testes sejam padronizados e que cada fabricante entregue a eficiência dentro das mesmas condições, já que agentes naturais influenciam a captação dos raios ultravioletas, consequentemente a geração de energia elétrica. As condições ideais para as placas fotovoltaicas são dadas a partir da *Standard Test Conditions* (STC), que são testes que os fabricantes de módulos fotovoltaicos realizam em condições padronizadas, sendo a temperatura ambiente de 25 °C, a irradiação de 1.000 W/m² e massa de ar de 1,5 AM. Dessa forma, nestas condições, as placas fotovoltaicas devem demonstrar suas medidas de desempenho para comparação entre módulos fotovoltaicos [16].

A relação entre a corrente e a tensão no painel solar é demonstrada em um gráfico (representado na Figura 2.7), denominado curva I – V (corrente por tensão). Além da relação I – V, outra curva característica que representa o comportamento dos módulos é a curva P x V (potência por tensão).

Figura 2.7 Gráfico de geração I – V e P x V



Fonte: [14].

Os módulos fotovoltaicos fornecem a potência com parâmetros isolados, ou seja, corrente e tensão. As corrente e tensão máximas que um painel solar fornece são chamadas de corrente de curto circuito (I_{sc}) e tensão de circuito aberto (V_{oc}), respectivamente. Entretanto, um painel solar nunca fornecerá corrente e tensão máximas simultaneamente, pois uma tem relação inversamente proporcional sobre a outra. A potência de saída de um módulo fotovoltaico depende da carga que está conectada em seus terminais. Se por um lado tem-se uma carga que demanda muita corrente, a tensão de saída tende a decrescer. Por outro lado, para uma carga que exige menos corrente, a tensão se elevará, tendendo à tensão de circuito aberto, ou seja, a máxima tensão do painel fotovoltaico. Com isso, o inversor busca rastrear o ponto de potência máxima *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), de modo que o módulo forneça a corrente de máxima potência (I_{mp}) e a tensão de máxima potência (V_{mp}) para a carga conectada (o ponto onde encontra-se a potência de pico (P_{mp}) é chamado de joelho da curva) [14].

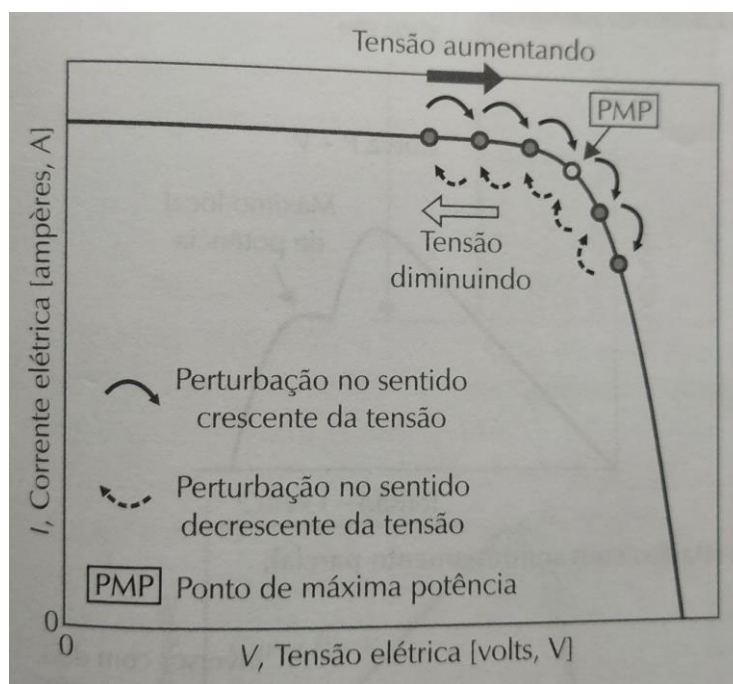
Existem diferentes algoritmos para o MPPT, entretanto, como explicado em [15], a rastreabilidade do MPPT consiste em “derrubar” a operação dos módulos, alterando

intencionalmente a tensão nos seus terminais de modo a observar o que acontece com a potência fornecida.

A estratégia MPPT é demonstrada nas Figuras 2.7 e 2.8. Inicialmente, o inversor opera com uma certa frequência provocando uma mudança de tensão no sentido crescente, observando o aumento da potência. O inversor continua aumentando a tensão nesse sentido enquanto observa que a potência aumenta, após cada perturbação (método conhecido como Perturba e Observa). Em um dado instante, quando o ponto de máxima potência do módulo é ultrapassado, a perturbação provoca o efeito contrário, ou seja, redução da potência. Ao observar este efeito, o algoritmo do inversor interrompe a perturbação no sentido crescente e inicia a perturbação no sentido contrário, sempre observando a potência como consequência.

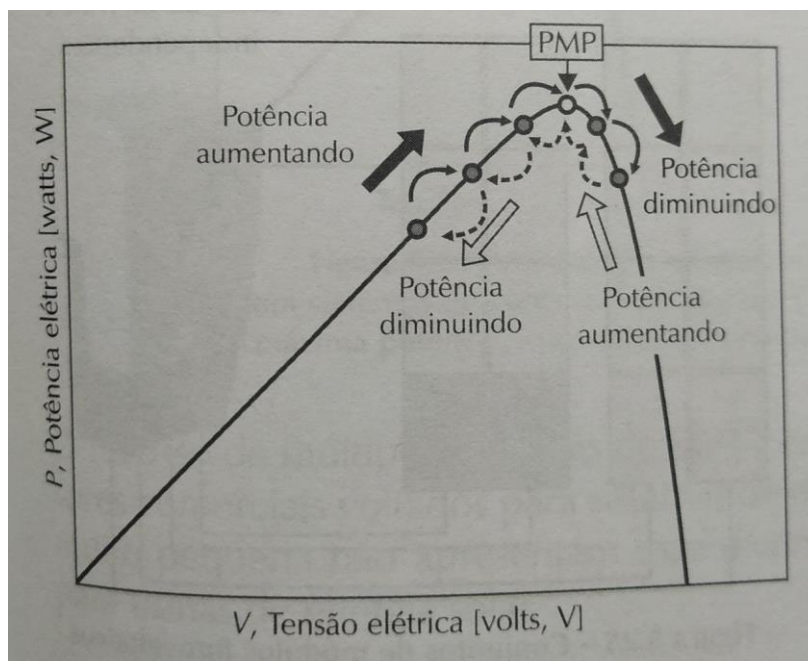
Em suma, nas proximidades do ponto de máxima potência, o algoritmo faz o inversor perturbar a tensão dos módulos fotovoltaicos, fazendo o ponto de operação mover-se para cima e para baixo na busca pelo joelho da curva $I - V$ e o pico da curva $P \times V$, como ilustrado na Figura 2.8 e 2.9.

Figura 2.8 Gráfico $I - V$ ilustrando a perturbação do inversor na tensão de saída dos módulos na busca do MPPT



Fonte: [15]

Figura 2.9 Gráfico $P \times V$ ilustrando a perturbação do inversor na tensão de saída dos módulos na busca do MPPT



Fonte: [15]

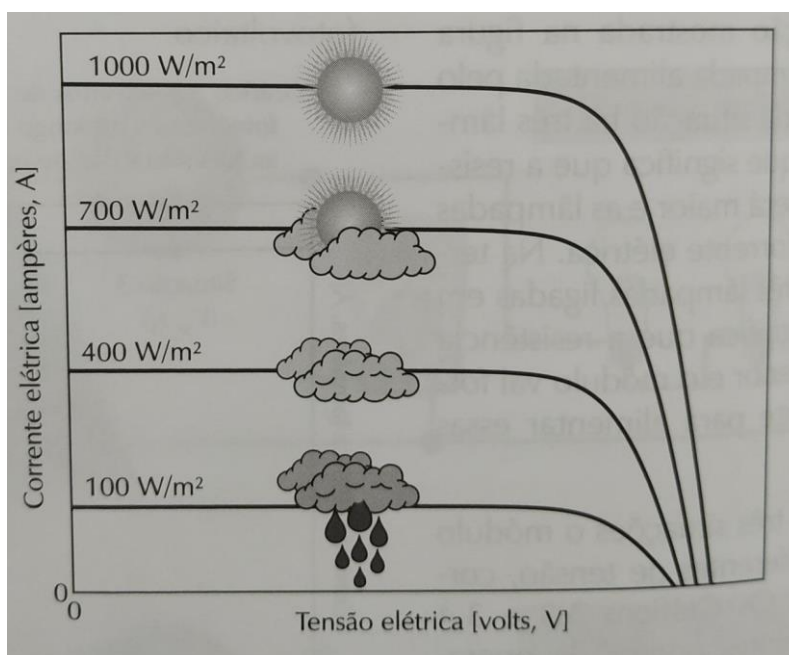
2.6. AGENTES NATURAIS IMPACTANTES NA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

Dentro das condições de testes e variabilidade de geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos, destacam-se como os principais agentes que afetam a saída de potência dos mesmos, a temperatura, a irradiação e a massa de ar. Este último, por ser um fator dependente do ângulo entre o painel e o sol (isto é, está relacionado às estações do ano), e sendo uma ação natural incontrollável, não é o foco de estudo deste trabalho. A temperatura tem influência direta na tensão do painel solar, e a intensidade de radiação, na corrente fornecida pelo mesmo. Portanto, em dias em que a temperatura ambiente estiver acima daquela definida na STC, a tensão entregue nos terminais do painel tende a diminuir numa ordem quase linear (mantendo-se a irradiação constante). Por outro lado, uma diminuição na irradiação terá como efeito a diminuição na corrente de curto circuito e de máxima potência [6].

Sendo a irradiação a capacidade de energia fornecida pelo sol que um painel pode absorver em sua superfície durante um intervalo de tempo, a diminuição da irradiação pode ser dada de forma natural pela movimentação de nuvens, temporais, posição do sol, entre outros. Outro fator que diminui a irradiação captada pelas células fotovoltaicas, é a formação

de camada de poeiras e poluição; estes impedimentos tendem a reduzir de modo significativo a corrente de saída do conjunto fotovoltaico, provocando uma baixa geração de energia elétrica. Contudo, diferentemente das condições climáticas, o grau de sujidade dos painéis solares é passível de intervenção. Na Figura 2.10 é observado um gráfico apresentando a influência da irradiância na tensão e corrente do painel solar, e na Figura 2.11, pode se ver um gráfico da interferência da temperatura sobre os mesmos parâmetros.

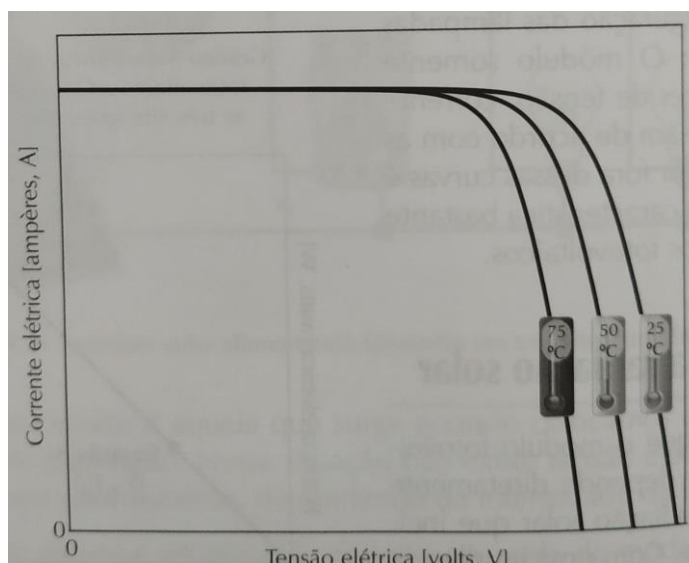
Figura 2.10 Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico



Fonte: [15].

Fazendo uma comparação da ilustração mostrada da Figura 2.10 com o cenário de Araguainha, supondo um dia que a irradiação seja constante de 1.000 W/m², a irradiação absorvida pela placa fotovoltaica seria menor que o valor entregue na atmosfera local, pelo fato da poeira impregnada na face do painel solar dificultar a incidência dos raios solares sobre as células.

Figura 2.11 Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico



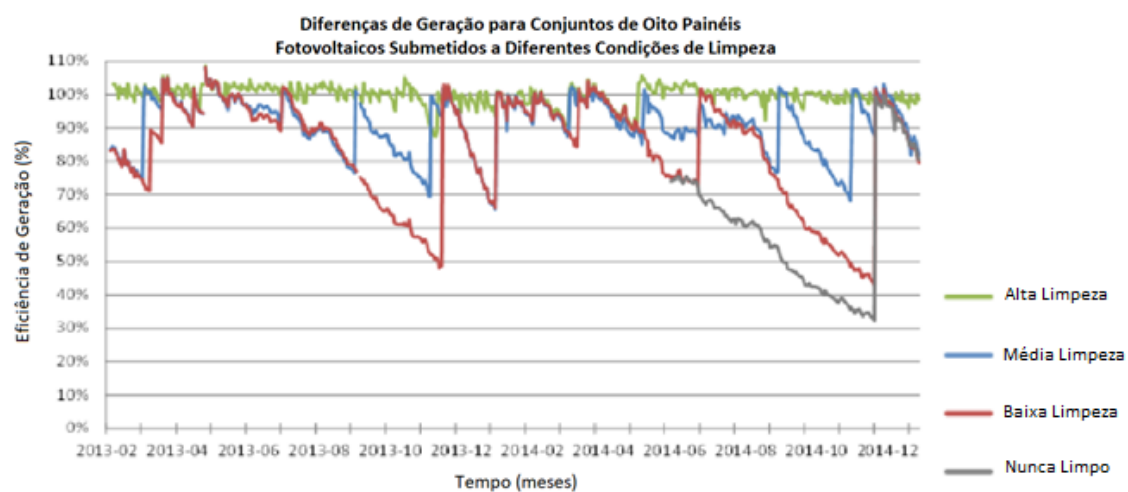
Fonte: [15].

O trabalho apresentado por [5] traz estudos sobre os efeitos da poeira na usina de Doha, Qatar. Para mostrar como a sujeira sobre os painéis acarreta em uma perda de energia considerável, os módulos fotovoltaicos foram submetidos a experimentos quanto ao seu desempenho perante diferentes “níveis de sujeira”, ou seja, quatro matrizes fotovoltaicas de oito módulos cada estiveram sob teste em função do tempo em que se faziam limpezas, sendo:

- (i) um conjunto testado com limpezas semanais (nível de limpeza alto);
- (ii) um conjunto testado com limpezas a cada dois meses (nível de limpeza médio);
- (iii) um conjunto testado com limpezas a cada seis meses (nível de limpeza baixo);
- (iv) e o último conjunto testado sem nenhuma limpeza.

Os resultados observados são mostrados na Figura 2.12, onde os módulos condicionados a limpezas semanais são tratados como a referência 100% (traços em verde do gráfico). Nos meses correspondentes ao inverno é que mais se percebe perda de eficiência dos módulos por conta da poeira. E a maior perda de eficiência se deu na matriz que nunca foi lavada, a qual, após 234 dias, gerou apenas 32,4% da energia elétrica em corrente contínua que a matriz com a condição (i) gerou.

Figura 2.12 Sujeira sob diferentes condições de limpeza



Fonte: [5].

3. SISTEMA MOTIVADOR

3.1. SISTEMA PILOTO PARA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

Conforme descrito no Capítulo 2, o acúmulo de sujeira sobre a superfície dos painéis solares impede a penetração dos raios solares fazendo com que o sistema solar opere abaixo de sua real capacidade. Em propriedades rurais ou locais desprovidos de pavimentação, onde a concentração de material particulado é bastante elevada, este fato se torna ainda mais agravante. Este é o caso de um sistema fotovoltaico instalado em Araguainha, uma pequena cidade do estado de Mato Grosso, localizada a aproximadamente 530 km de Cuiabá. Devido à falta de pavimentação urbana e pela proximidade à MT 100, autoestrada estadual não pavimentada (até o presente momento) no trecho que circunda o município, a concentração de material particulado sobre os painéis fotovoltaicos se dá de forma acentuada no período seco.

Na Figura 3.1 tem-se a vista aérea do município de Araguainha, onde os pontos 1 e 2 correspondem à residência onde estão instalados os módulos fotovoltaicos e à estrada MT 100, respectivamente. Na Figura 3.2 nota-se o detalhe do sistema fotovoltaico de 3,2 kWp, composto por oito painéis.

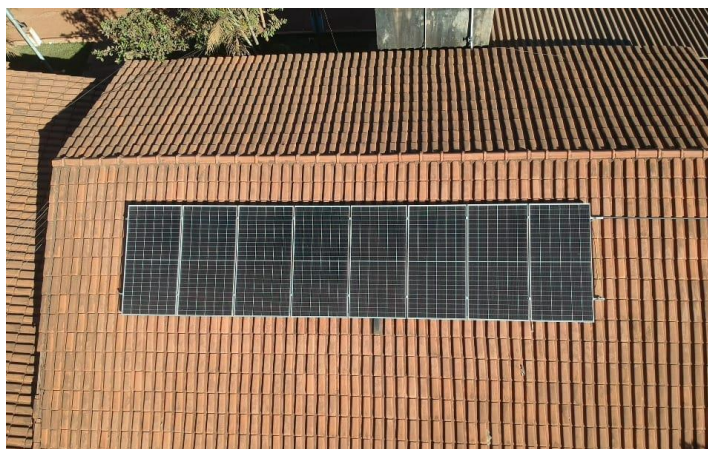
Considerando dados solares do site do CRESESB para Araguainha (Anexo C) e tomando o ângulo de 18° como referência, pelo fato de ser a angulação mais próxima à do telhado da residência em que está instalado o sistema, tem-se que o período com maior incidência de radiação solar se dá entre fevereiro e outubro. Contudo, segundo dados de [12], Mato Grosso tem o período mais seco no inverno, de maio a outubro (sendo julho o mês mais seco). Portanto, os meses mais secos e de maior quantidade de poeira na atmosfera local coincidem com os meses onde os painéis recebem maior incidência de irradiação. O clima da região é classificado como tropical.

Figura 3.1 Foto aérea de Araguainha, onde se vê, em 1, o sistema de com oito painéis e em 2, a MT 100



Fonte: Autor.

Figura 3.2 Detalhe do sistema de oito painéis instalado em Araguainha



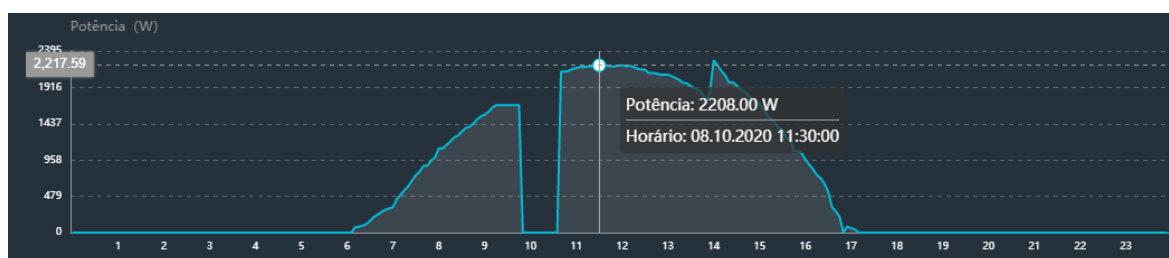
Fonte: Autor.

Aproximadamente uma semana após a instalação dos painéis mostrados na Figura 3.2, já era perceptível a presença de uma fina camada de poeira depositada sobre as placas, de forma que, com duas semanas de uso houve a necessidade de contratação de um serviço de limpeza.

3.2. DESEMPENHO DO SISTEMA DE 3,2 kWp APÓS A LIMPEZA REALIZADA POR PROFISSIONAL

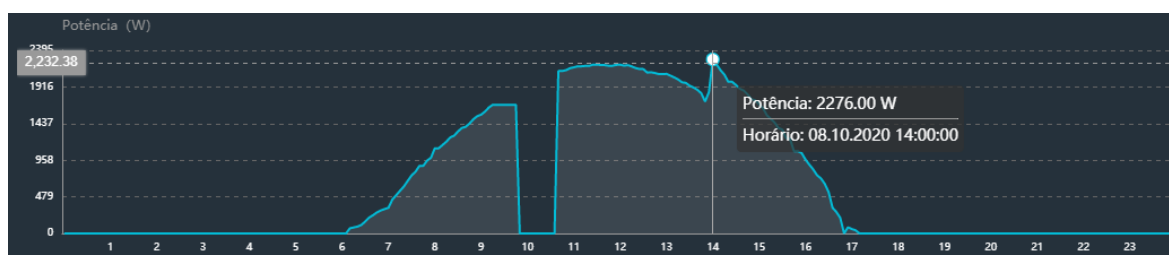
Nas Figuras 3.3 e 3.4 está apresentado o desempenho do sistema de geração fotovoltaica em questão, no dia 08/10/2020. Os gráficos foram extraídos do aplicativo que exibe todo o monitoramento de informações do inversor da instalação.

Figura 3.3 Potência de geração dos módulos instantânea às 11:30



Fonte: Autor.

Figura 3.4 Potência de geração dos módulos instantânea às 14:00 (após a limpeza)

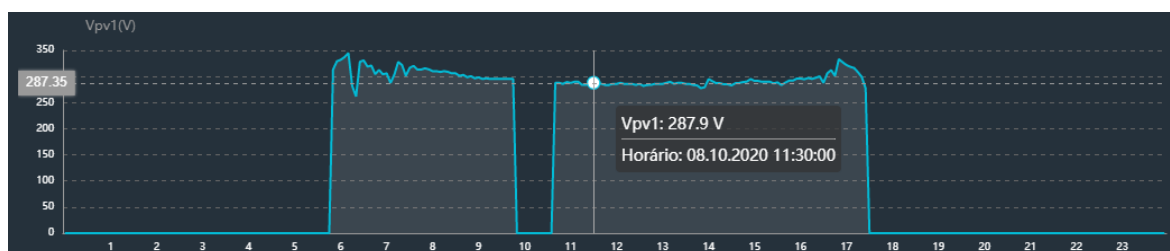


Fonte: Autor.

Ao longo do dia, o comportamento da geração se vê representado por uma parábola, com uma interrupção por volta das 10 horas, perdurando por cerca de 30 minutos. Supõe-se que essa interrupção se deveu a uma provável falta na subestação que alimenta a cidade, assim o inversor atuou com o sistema anti-ilhamento. Logo em seguida, o sistema retornou com a geração de energia elétrica normalmente e, aproximadamente às 11:30, o conjunto gerou a potência instantânea de 2.208 W, como observado na Figura 3.3. Entretanto, é interessante notar que, às 13:50, horário no qual foi realizada a limpeza, a curva que estava com 1.725 W de geração instantânea, saltou para 2.276 W, como é ilustrado na Figura 3.4. Esta análise deixa claro o impacto que a sujeira causa na eficiência da geração solar e o ganho de potência instantânea após a limpeza.

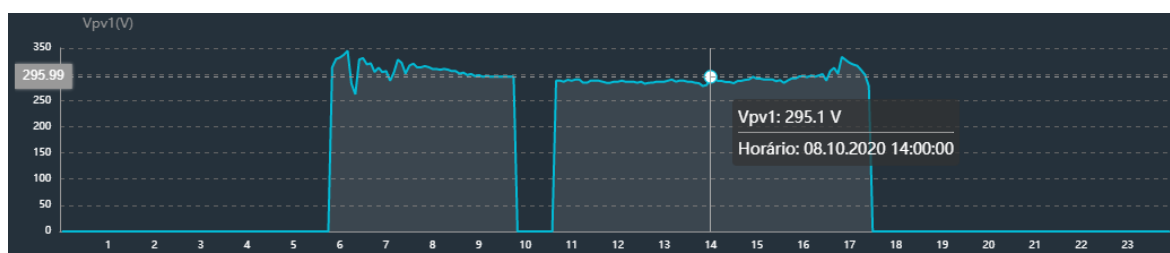
Assim, resta analisar se o aumento da potência do sistema no momento da limpeza foi dado pelo aumento de irradiação capturada pelas células fotovoltaicas (limpeza) ou pelo resfriamento dos painéis pelo contato da água da limpeza. Tomando-se dados de corrente e tensão de saída dos módulos nos mesmos horários, tem-se os gráficos do sistema de monitoramento da instalação, mostrados da Figura 3.5 à Figura 3.9.

Figura 3.5 Tensão de saída dos módulos às 11:30



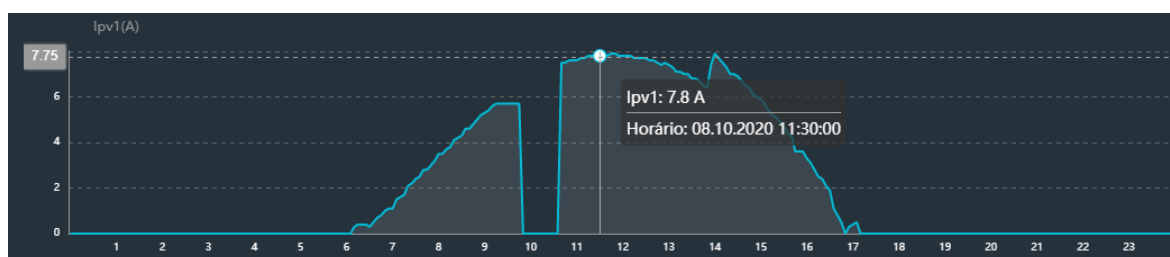
Fonte: Autor.

Figura 3.6 Tensão de saída dos módulos às 14:00 (após limpeza)



Fonte: Autor.

Figura 3.7 Corrente de saída dos módulos às 11:30



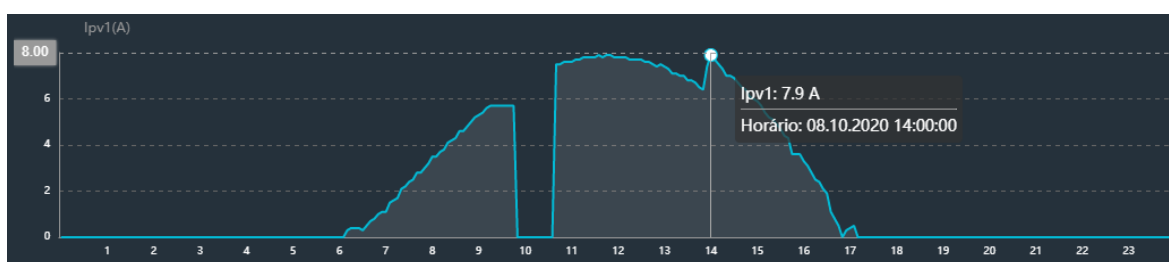
Fonte: Autor.

Figura 3.8 Corrente de saída dos módulos segundos antes da limpeza



Fonte: Autor.

Figura 3.9 Corrente de saída dos módulos às 14:00 (após limpeza)



Fonte: Autor.

Através da Figura 3.5, nota-se que às 11:30 a tensão e corrente de saída dos módulos eram de 287,9 V e 7,9 A, respectivamente, e às 14:00 a tensão e a corrente eram 295,1 V e 7,9 A. Nota-se uma diferença de tensão e corrente dos módulos após a limpeza de aproximadamente 7,2 V e 0,1 A. À primeira vista, a tensão não teve tanta influência da geração de energia elétrica antes e após a limpeza, mantendo-se quase que constante. Por outro lado, a corrente, que estava em decréscimo segundos antes da limpeza, obteve um aumento expressivo, variando de 6,5 A para os 7,9 A.

Como visto anteriormente, a corrente é influenciada pela quantidade de irradiação que penetra as células; como a poeira forma uma barreira que dificulta essa penetração, a limpeza proporciona melhores desempenhos. Além disso, pode-se presumir que a tensão, que é influenciada pela temperatura dos módulos, não teve um ganho significativo, vide a pouca quantidade de água utilizada para limpeza, portanto insuficiente para causar um resfriamento.

Diante das análises apresentadas, das condições do local de instalação do sistema apresentado e, visando maximizar a geração de eletricidade, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema simples de limpeza automática e também um sistema de

arrefecimento dos módulos solares a ser implantado como piloto no sistema fotovoltaico descrito nesta seção.

4. SOLUÇÃO

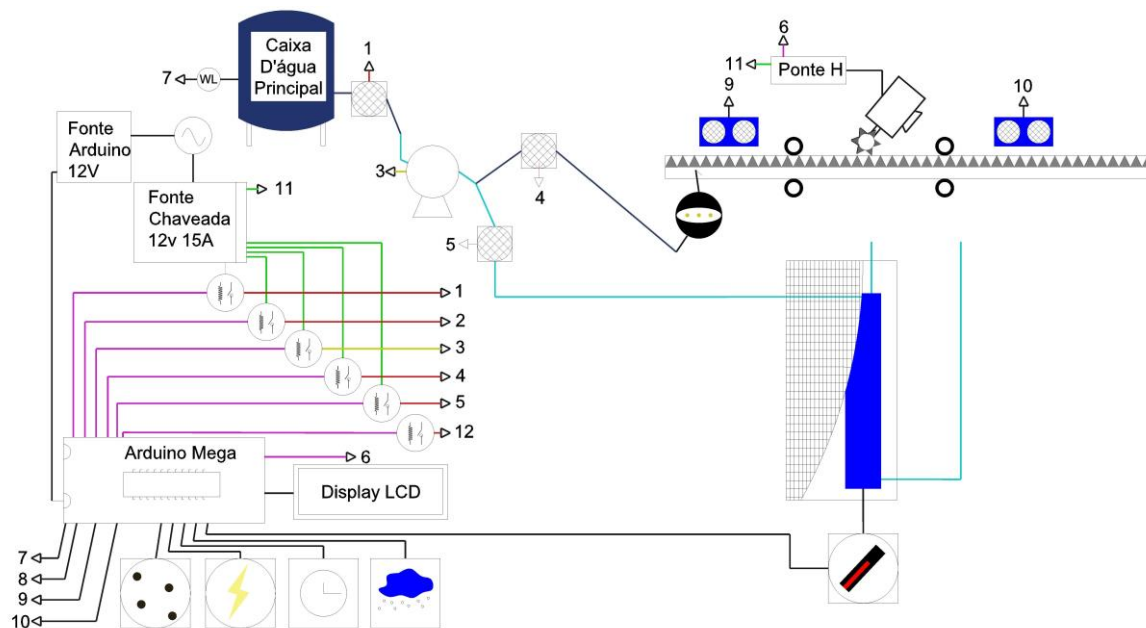
Tendo em vista que o sistema do Capítulo 3 já se encontra em operação e possui oito placas solares, optou-se por realizar uma análise prévia de melhoria de desempenho e custo benefício utilizando um *setup* de teste composto por apenas uma placa solar.

4.1. PRINCIPAIS ELEMENTOS QUE COMPÕEM O PROJETO DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA

Antes de dar início às especificações dos elementos que fazem parte do sistema de limpeza e arrefecimento desenvolvido neste trabalho, é importante mencionar a diferença de um sensor para um transdutor, visto que frequentemente se usa de forma errônea o termo sensor para falar de um transdutor, mesmo em estabelecimentos especializados, como lojas de componentes eletrônicos. Sensor é um elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida. Pode-se citar como exemplo de sensores o elemento platina de um termômetro de termoresistência (RTD) e a boia de um instrumento de medição de nível. Transdutor é um dispositivo utilizado em medições que fornece uma grandeza de saída que tem uma correlação específica com a grandeza de entrada. Por exemplo: termopar, extensômetros [10, 23].

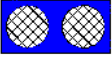
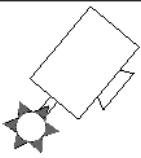
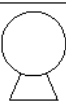
Na Figura 4.1 é ilustrado o diagrama de blocos que representam a solução proposta para um único painel. O sistema de limpeza consiste em um motor de corrente contínua (CC) que movimenta um trilho ao longo da extensão do painel de modo a deslocar um brucutu automotivo que faz o jateamento de água sobre a superfície do painel. Para que se tenha uma pressão mais adequada, a água do reservatório é bombeada até o brucutu. O motor é acionado por um conversor ponte-H para deslocamento em ambos os sentidos. Dois sensores ultrassônicos são utilizados para fornecer a informação de fim de curso. Já o sistema de arrefecimento é composto por uma bandeja fixada na face inferior do painel e permite transferência de calor por condução. Comum aos dois sistemas existe uma canalização e válvulas solenóides para direcionar o fluxo de água.

Figura 4.1 Esquemático de funcionamento dos sistemas de limpeza e arrefecimento para o painel utilizado no protótipo de escala reduzida



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 4.2 Legenda das Figuras 4.1 e 4.26

LEGENDA	
Simbologia	Equipamento
	Válvula Solenóide
	Transdutor Ultrassônico
	Brucutu
	Roldana em guia para perfil de alumínio
	Módulo Relé 5v
	Motor com redução 12v, 60rpm, 6 Nm
	Fonte AC 127v
	Transdutor de Nível de Água
	Bomba de Diafragma, 12v, 150 PSI, 100W
	Transdutor de poeira e fumaça
	Transdutor Ultravioleta
	RTC
	Transdutor de Umidade e Temperatura
	Transdutor de Temperatura PT100
	Cremalheira embutida ao Perfil de Alumínio
	Bandeja

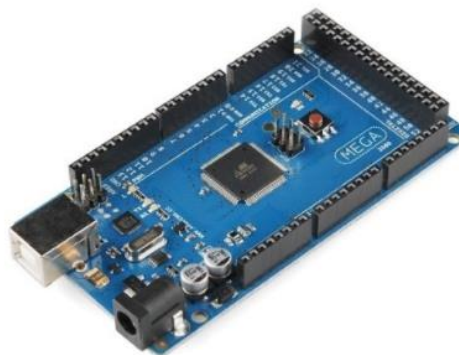
Fonte: Elaboração do autor.

4.1.2. Microcontrolador - Arduino

Um dos elementos principais de um projeto de automação é o microcontrolador, responsável, neste projeto, por fazer a leitura de transdutores empregados na aplicação, acionar os relés para que comandam o funcionamento da bomba, as válvulas solenoides, além de enviar os sinais de controle para o motor (via *Pulse Width Modulation* – PWM), entre outras

funcionalidades. Foi escolhido o Arduino Mega pela acessibilidade, preço e facilidade de programação, além de ser o maior dispositivo da família Arduino em capacidade de portas analógicas e digitais disponíveis e saídas PWM. Ademais, o conceito de hardware livre traz a facilidade de utilização de bibliotecas desenvolvidas por outros usuários, facilitando e agilizando a implementação do protótipo. Na Figura 4.3 é apresentado o microcontrolador em questão, e além disso, outras informações mais específicas e características do Arduino Mega estão melhor explanadas no Anexo E e em [4] deste trabalho.

Figura 4.3 Arduino Mega



Fonte: FilipeFlop.

4.1.3. Bomba

Com a função de aumentar a pressão da água durante o jateamento responsável pela limpeza e também realizar a troca de água na bandeja de arrefecimento, utilizou-se de uma bomba diafragma de 12 V, 150 psi, vazão de 7-9 L/min, conforme a Figura 4.4.

Figura 4.4 Bomba 12 V, 150 psi



Fonte: Mercado Livre.

4.1.4. Motor

O atuador responsável por mover o jato de água ao longo de toda a extensão do painel é um motor de corrente contínua de ímã permanente, como é visto na Figura 4.5. A escolha deste tipo de motor foi devido à facilidade de controle e pela disponibilidade no mercado, já que este é bastante utilizado em aplicações automobilísticas. O motor utilizado possui uma caixa de redução, resultando em torque nominal de 6 N·m, já que a operação se dá em baixa velocidade, a tensão de alimentação é de 12 V e a velocidade nominal é de 60 rpm.

Figura 4.5 Motor com caixa de redução, 12 V, 60 rpm



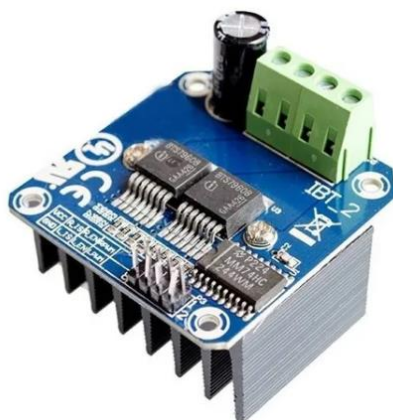
Fonte: Mercado Livre.

4.1.5. Módulo de Acionamento do Motor – Ponte H

Dentre os dispositivos de acionamento de motores de corrente contínua, um dos *drivers* mais completos é a Ponte H. Este tipo de circuito é utilizado para controle de sentido

de rotação e velocidade. Para o sistema de limpeza deste trabalho, é necessária a utilização de um *driver*, que possibilita controle de velocidade e reversão, conforme a operação descrita mais adiante. O módulo adotado neste trabalho foi a Ponte H ITB-2, como é mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 Ponte H IBT-2 de 43A



Fonte: Mercado Livre.

4.1.6. Sensor Ultrassônico

Uma das necessidades do projeto é a identificação do fim de curso para o motor indicando o final da largura da placa que o jato de água que realiza a limpeza deve percorrer. Uma solução simples e econômica encontrada foi utilizar um transdutor ultrassônico.

O Transdutor de Distância Ultrassônico HC-SR04 possui função de medição de presença sem contato direto com o trilho que movimenta o jato de água. Este transdutor pode medir de 2 cm a 400 cm, com precisão de aproximadamente 3 mm. O módulo é composto por um transmissor, um receptor e circuito de controle, conforme mostrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 Imagem Transdutor Ultrassônico



Fonte: Baú da Eletrônica.

Como o transdutor utilizado não possui encapsulamento, o mesmo foi instalado em uma caixa patola para proteção contra intempéries, conforme se vê na Figura 4.8. Desta forma, dois transdutores ultrassônicos foram instalados no *setup* para indicar as extremidades da placa solar testada.

Figura 4.8 Encapsulamento Transdutor Ultrassônico



Fonte: Autor.

4.1.7. Relógio de Tempo Real

Como a solução proposta envolve o acionamento automático do sistema de limpeza, foi utilizado um *real time clock* (RTC) para que o usuário possa definir o horário e a frequência em que a limpeza é realizada. Desta forma, o sistema pode ser customizado para diferentes regiões, ou seja, pode ser adequado para situações que exigem maior ou menor manutenção, através de uma simples programação.

O RTC (Figura 4.9) é um relógio de tempo real de alta precisão e baixo consumo de energia capaz de ser programado com o horário e data locais e, sempre que alimentado com 5 V ou com uma bateria embutida, enviará as referidas informações a um microcontrolador. Para a família Arduino, uma alternativa seria a utilização do comando “*millis*”, porém a programação se tornaria mais complexa e diante de uma falha, a programação seria reiniciada

e perderia o horário correto. Além disso, a cada 50 dias o contador é zerado, dificultando ainda mais a programação.

Figura 4.9 Imagem do RTC



Fonte: FilipeFlop.

4.1.8. Sensor de Temperatura - PT100

O projeto prevê o monitoramento da temperatura da água na bandeja instalada sob a placa tanto para fins de realizar a troca da água quando a temperatura estiver muito alta (para melhorar a eficiência), quanto para avaliar a utilização desta água em chuveiros e torneiras, de modo semelhante a um sistema de aquecimento solar. Neste caso, escolheu-se o PT-100 como transdutor de temperatura, conforme mostrado na Figura 4.10.

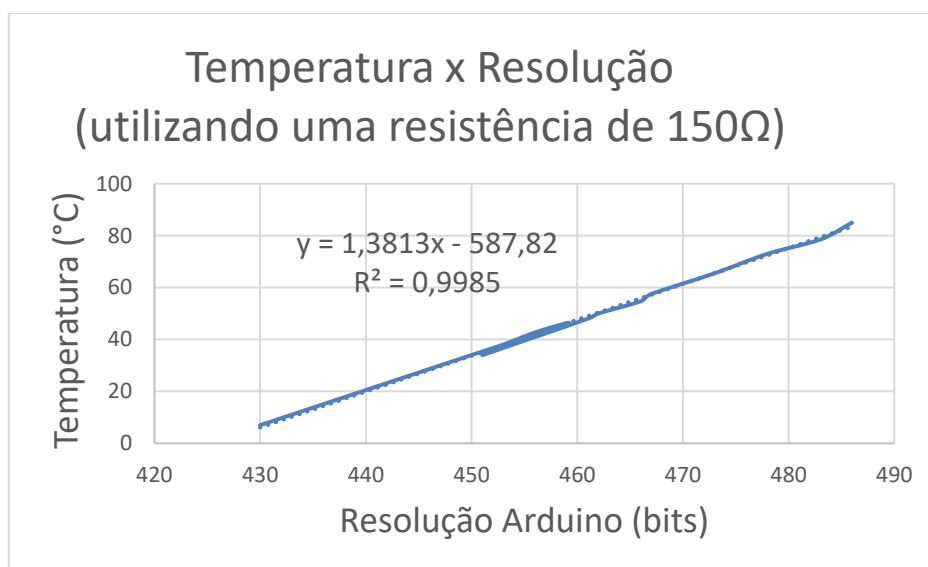
Um termistor é um transdutor que tem a capacidade de variar a resistência inerente ao sensor em função da temperatura a que é submetido. Para o caso do PT 100, à medida que se aumenta a temperatura, a resistência também é aumentada, e com isso a tensão, que é proporcional a esta variação, também sofre alteração, sendo finalmente lida pelo microcontrolador. Assim sendo, o termistor utilizado tem uma característica linear de alteração da resistência em função da temperatura, e encontrando a equação que descreve esta relação linear, é possível monitorar a temperatura a qual é submetido. O PT100 tem a característica de que em 0 °C a resistência é dada por 100 Ω . Foi necessário fazer o levantamento da curva experimental que o descreve a variação de resistência de acordo com a temperatura, e para isto, utilizou-se um termômetro de mercúrio laboratorial para aferição e um Becker com água quente, ao qual foi adicionada água fria para variação da temperatura. Desta maneira, comparou-se a temperatura lida no termômetro com a resolução obtida pelo PT100 no Arduino e encontrou-se uma equação linear, como é mostrado na Figura 4.11. A tensão lida pelo Arduino provém de um divisor resistivo, composto por um resistor fixo e o PT 100.

Figura 4.10 Imagem do PT100



Fonte: FilipeFlop.

Figura 4.11 Gráfico que descreve o comportamento do PT100 na relação de temperatura por resolução no Arduino



Fonte: Elaboração do autor.

4.1.9. Relé

Existem equipamentos no projeto, tais como o motor e a bomba, que não podem ser alimentados diretamente pelo Arduino. Isso ocorre porque estes equipamentos exigem uma quantidade de corrente elétrica que não pode ser fornecida pelo microcontrolador, que oferece baixa potência em suas saídas (na faixa de 20 mA para o caso do Arduino Mega). Com a intenção de economizar a energia elétrica do sistema, alguns transdutores podem ser alimentados também pelos relés, promovendo dessa forma o acionamento destes transdutores em particular apenas quando informações fossem requeridas pelo sistema.

Os relés possuem uma bobina interna de baixa potência que quando alimentada pelo microcontrolador comuta os contatos principais que funcionam como uma chave aberta ou fechada, possibilitando a passagem de corrente por um circuito de maior potência. Na Figura 4.12 é mostrado o módulo de 4 relés utilizados no protótipo. Os relés acionam a alimentação da Ponte H, as válvulas solenoides e a bomba.

Figura 4.12 Módulo Relé de 4 Canais



Fonte: FilipeFlop.

4.1.10. Válvulas Solenoide

A válvula solenoide (Figura 4.13) é um dispositivo eletromecânico que possui uma bobina em formato cilíndrico, que quando alimentada de acordo com suas especificações de corrente e tensão elétrica, é capaz de permitir ou interromper a passagem de algum fluido. As válvulas solenoides para este tipo de aplicação diferenciam-se pela angulação que é formada entre a entrada e saída do fluido, neste caso a água, ou pela condição de abertura da válvula, sendo, normalmente aberta ou normalmente fechada. Uma válvula normalmente aberta significa que, em seu estado natural (sem nenhum tipo de atuação sobre a mesma) a válvula permite a passagem de fluido. Já a válvula normalmente fechada necessita de uma corrente elétrica para que possa dar passagem ao fluido. Vale salientar que é uma corrente relativamente baixa, de cerca de 500 mA para uma tensão de 12 V.

Figura 4.13 Válvula Solenoide



Fonte: Baú da eletrônica.

4.1.11. Comunicação entre os elementos: Mangueiras, reduções e conexões

Foram utilizadas mangueiras de jardim para conexões entre o armazenamento de água principal constituído de um reservatório, bomba e os sistemas de limpeza e arrefecimento. Além das mangueiras para conexões entre os elementos, também se utilizaram outras conexões como: reduções e conector T de mangueira. O exemplo de mangueira utilizado para deixar ao tempo é indicado na Figura 4.14.

Figura 4.14 Mangueira de jardim verde



Fonte: Mercado Livre.

4.1.12. Brucutu Automotivos

Brucutus são artificios utilizados por sistemas automotivos para que seja esguichada a água sobre o para-brisa do veículo. Existem vários modelos de brucutus que são específicos

aos modelos de carros. Escolheu-se dois modelos de brucutus para teste de limpeza dos painéis como são visualizados na Figura 4.15. Neste projeto, os brucutus foram utilizados para fazer o jateamento de água na superfície do painel.

Figura 4.15 Brucutu de Celta



Fonte: Mercado Livre.

4.1.13. Bandeja de Alumínio

Para o sistema de arrefecimento, o elemento principal é a bandeja, na qual será armazenada a água sob a placa fotovoltaica para arrefecimento das células. Utilizou-se de um material de reciclagem, cuja designação inicial é para assoalhos de ônibus. Portanto, foi necessário fazer dobras no material para que tenham dimensões adequadas às placas, e tapar buracos decorrentes de onde haviam rebites/parafusos. Para o protótipo instalado no *setup* de teste, a bandeja tem as dimensões de 1.200 mm x 220 mm x 30 mm e volume interno aproximado de 7,9 litros. Já para o sistema de 3,2 kWp, são previstas bandejas de dimensões maiores, tendo em vista o modelo do painel instalado, possui dimensões de 2.008 mm x 1.002 mm x 40 mm. Portanto, imagina-se uma bandeja de dimensões próximas a 1.800 mm x 200 mm x 35 mm, com volume interno de 12,6 litros. Na Figura 4.16 é apresentado a bandeja e as mangueiras utilizadas para a entrada e saída de água do sistema de arrefecimento e na Figura 4.17 é mostrado a mesma bandeja com a tampa de zinco acoplada a ela, e um suspiro na parte superior feito com a mangueira de jardim verde.

Figura 4.16 Bandeja com o interior visível



Fonte: Autor.

Figura 4.17 Bandeja com tampa de zinco acoplada



Fonte: Autor.

4.1.14. Transdutor de Temperatura e Umidade - AM2302 DHT22

O DHT22 (Figura 4.18) é um transdutor de temperatura e umidade que permite fazer leituras de temperaturas entre -40 e +80 graus Celsius e umidade entre 0 a 100%. No sistema, sua utilização tem por finalidade avaliar a temperatura externa próximo ao sistema fotovoltaico e também prever a ocorrência de chuva (caso em que a umidade está elevada) de modo que o sistema de limpeza não atue, mesmo que o horário programado seja alcançado.

Figura 4.18 Imagem do transdutor de temperatura e umidade



Fonte: FilipeFlop.

4.1.15. Sensor Nível de Água

O sensor de nível funciona como uma chave liga-desliga que pode acionar chaves, bombas, lâmpadas ou enviar um sinal para o microcontrolador tomar alguma decisão. Pode ser utilizado tanto na parte superior do recipiente que armazena água como na parte inferior, já que possui um anel de vedação (*O-ring*) e travamento por porca. O sensor é instalado verticalmente, e sua função no projeto é indicar se existe água no reservatório para que a limpeza seja realizada e também informar a condição da bandeja de arrefecimento. O sensor de nível utilizado é visto na Figura 4.19.

Figura 4.19 Imagem de sensor de nível de água vertical



Fonte: FilipeFlop.

4.1.16. Transdutor de Radiação Ultravioleta - UV ML8511

Para fins de verificação se a potência gerada está condizendo com o nível de irradiação solar, utilizou-se um transdutor de UV, modelo ML8511. O transdutor de Luz Ultravioleta UV ML8511 (Figura 4.20), ao entrar em contato com raios UV, emite um sinal analógico, que é recebido e interpretado pelo microcontrolador, referente à quantidade de luz ultravioleta detectada. No trabalho, também foi utilizado a título de informação para coleta de dados e comparação de geração de energia elétrica entre cenários, por exemplo: “painel limpo” e “painel sujo”.

Figura 4.20 Transdutor de Radiação Ultravioleta - UV ML8511



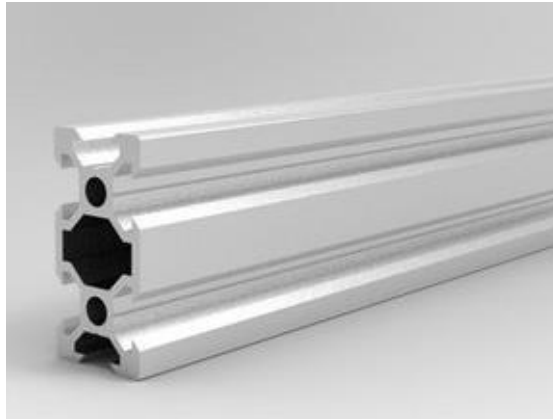
Fonte: Mercado Livre.

4.1.17. Perfil Estrutural em Alumínio V-Slot

A estrutura do caminho de movimentação do sistema de limpeza conta com um perfil em alumínio de 20 mm x 40 mm. Na Figura 4.21 é ilustrado o modelo de perfil utilizado no sistema. Juntamente com este trilho foram utilizadas guias com roldanas, mostradas na Figura 4.22 e responsáveis por dar a sustentação mecânica e permitir o deslocamento bidirecional ao perfil de alumínio. Tal movimentação é necessária para a completa lavagem dos painéis.

4.1.18. Cremalheira

Formada por uma coroa (engrenagem) e um trilho dentado, a Cremalheira é um artifício muito utilizado em portões residenciais para abertura automatizada. A coroa é acoplada a um motor e este tem o papel de locomover a cremalheira nos dois sentidos, quando acionado pelo controle. O mesmo tipo de aplicação para a cremalheira é utilizado neste trabalho. Na Figura 4.23 é apresentado os componentes mecânicos instalados no eixo do motor CC (coroa) e a cremalheira que foi instalada no perfil de alumínio *V-Slot* descrito na subseção 4.1.17.

Figura 4.21 Imagem do perfil de alumínio *V-Slot*

Fonte: Forseti.

Figura 4.22 Imagem de guia com roldanas *V-Slot*

Fonte: Forseti.

Figura 4.23 Imagem de cremalheira e engrenagem que a desloca



Fonte: Mercado Livre.

4.1.19. Display LCD

Para que o usuário pudesse acompanhar o funcionamento do sistema de limpeza e arrefecimento dos painéis fotovoltaicos, bem como a leitura de grandezas dos transdutores, optou-se por utilizar um display LCD de 16x2 bits (Figura 4.23). A programação no microcontrolador garantiu que as seguintes informações fossem enviadas a cada cinco segundos ao display:

- Temperatura e umidade ambiente;
- Nível de irradiação solar;
- Temperatura da água;
- Fim de curso do motor;
- Horário e data local;
- Status (*on* ou *off*) do sistema de limpeza e status do sistema de arrefecimento.

Como o display possui 16 dígitos em 2 colunas (LCD 16x2), as informações supracitadas foram mostradas de modo oscilatório cíclico.

Figura 4.24 Imagem do display LCD 16x2 azul



Fonte: FilipeFlop.

4.2. ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO DO PAINEL DO PROTÓTIPO

Para que fosse segura a alocação do sistema de limpeza e arrefecimento no painel do protótipo, uma estrutura em madeira foi desenvolvida e pode ser vista na Figura 4.24. O objetivo é que esta estrutura produzida fosse o mais próximo possível da estrutura real de instalação de painéis fotovoltaicos em telhados. Dessa forma, foi reproduzida a inclinação

ideal para a localização do protótipo. A Figura 4.25 ilustra a estrutura metálica comumente utilizada na instalação de painéis solares sobre telhados.

Figura 4.25 Estrutura de sustentação desenvolvida em madeira



Fonte: Autor.

Figura 4.26 Esqueleto de um sistema real capaz de receber os painéis fotovoltaicos. Em 1, tem-se os suportes de telhado e, em 2, tem-se o perfil de alumínio, comumente chamado de trilha



Fonte: Autor.

4.3. ESQUEMÁTICO PLANTA 3,2 kWp

O funcionamento de ambos os sistemas compartilha o uso da maioria dos aparelhos, instrumentos, de forma a minimizar os gastos no projeto. Desta forma, o microcontrolador, bomba, mangueiras e conexões, sensores, válvulas solenoides, relés, entre outros, trabalham em conjunto satisfazendo as funções de ambos os sistemas. Na Figura 4.26 é ilustrado o

esquemático para o sistema de 3,2 kWp, e a Figura 4.27 traz a legenda. No sistema, encontram-se oito painéis de 400 Wp com dimensões 2.008 mm x 1.002 mm x 40 mm cada, conectados em série, formando uma *string*; a soma da largura dos oito painéis mede aproximadamente 8,20 m. A maioria dos elementos do layout seguem uma numeração baseadas em sua alimentação, isto significa que os elementos sem numeração têm sua alimentação provinda do microcontrolador, ou que, ainda, são controlados por um segundo elemento (como o motor é controlado pela Ponte H, por exemplo). Assim sendo, vale salientar que todas as válvulas solenoides, a bomba, o motor (através da Ponte H) são alimentados pela fonte chaveada e todas as válvulas solenoides e a bomba são controlados por relés.

Seguindo a numeração do esquemático, tem-se:

1 – Válvula Solenoide que libera água do reservatório principal da residência para os sistemas de limpeza e arrefecimento.

2 – Válvula Solenoide que libera água para circulação entre as bandejas sob os painéis e o boiler.

3 – Bomba que tem a função de levar água a ambos os sistemas

4 – Válvula Solenoide que libera água para o sistema de limpeza

5 – Válvula Solenoide que libera água para o sistema de arrefecimento

6 – Pino PWM do Arduino para controle da Ponte H, consequentemente do motor.

7 – Transdutor de nível de água fixado a uma altura mínima no reservatório principal de forma que seja capaz de suprir água para ambos os sistemas quando demandado.

8 – Transdutor de nível de água fixado no boiler de modo a informar ao microcontrolador a situação para uma tomada de decisão. possibilidade de circulação de água entre o sistema de arrefecimento.

9 e 10 – Transdutores ultrassônicos fixados horizontalmente para analisar a presença do trilho contendo os elementos de limpeza e, assim, informar ao microcontrolador para tomada de decisão.

11 – Alimentação da Ponte H pela fonte chaveada, que através do controle feito pelo Arduino delimitará a potência a ser entregue ao motor.

12 – Válvula Solenoide que controla a entrada de água provinda do arrefecimento no boiler.

Para a descrição dos sistemas, evitando a repetitividade, os elementos que atuam de forma direta nos processos serão mencionados através do número que os acompanha, ficando subtendido que há um controle por trás destes. Por exemplo, para liberar passagem de água pela válvula solenoide 1, é necessário que o relé correspondente feche (abre para o caso das válvulas solenoides normalmente abertas) o circuito da fonte chaveada que alimenta a bobina da mesma. Portanto, a atuação do relé não será comentada, e sim a abertura da válvula para a finalidade que a precede.

4.3.2. Sistema de Limpeza para o Conjunto de 3,2 kWp

A condição inicial de funcionamento do sistema de limpeza exige que o transdutor de nível de água 7 indique que há água disponível para tal operação. Em caso afirmativo, as válvulas solenoides 1 e 5 abrem, dando condição de passagem à água, e assim, a bomba 3 é acionada. Dessa forma, a irrigação se encontrará em modo operante, restando ao microcontrolador fazer o controle do posicionamento dos brucutus que esguicharão água sobre os painéis. A princípio, o deslocamento da trilha com os brucutus foi projetado seguindo a ideia de portões eletrônicos residenciais, como segue no Anexo A. De tal forma, o motor é posicionado em uma das extremidades e a trilha só teria a opção de ser deslocada para a direita até que alcançasse o transdutor ultrassônico 1 (ou seja, antes que saia da “primeira” guia com roldana), e o limite de deslocamento para esquerda seria até que a trilha com a cremalheira estivesse com o seu final na engrenagem do motor, onde ainda há contato para retornar o movimento. Assim, a depender da posição das guias com roldanas, o sistema não lavaria todas as placas. Para fazê-lo, seria necessário dobrar o comprimento da trilha (como segue no Anexo B). Porém, surgiria o problema de um dos lados da trilha ter 8,2 m suspensa sem apoio, e aumentaria o custeamento do material.

De modo estratégico, o esquemático da Figura 4.26 apresenta a posição do motor determinada pela média da distância entre a primeira placa fotovoltaica e a última. Portanto, como a Ponte H é capaz de controlar o motor para que seu eixo rotacione no sentido horário e anti-horário, o aproveitamento da trilha se torna maior, podendo inclusive ser menor que 8,20 m (largura de todas as placas do sistema). Além disso, para que o sistema limpe com maior eficiência os painéis, a velocidade de rotação do motor deve ser reduzida através da Ponte H. Projetou-se a utilização de três brucutus esguichando água, onde estes estariam alocados nas extremidades da trilha e um no meio. Desta forma, o sistema abrangeria a limpeza sobre toda a extensão do conjunto. Para controle de fim de curso, utilizou-se do transdutor ultrassônico

(como pode-se ver Figura 4.6 e Figura 4.7). Na Figura 4.26, verificam-se três guias com roldanas para suporte e deslocamento da trilha. Porém, imagina-se que esta quantidade deverá ser acrescida, tendo em vista o peso que os equipamentos presentes na trilha mais o seu próprio peso resultaria sobre as guias. Com tudo que foi dito, demais condições ligadas ao funcionamento da limpeza se referem à frequência de limpeza e a condições meteorológicas.

Tomando-se a primeira condição, pela problemática de formação de poeira no sistema se dar de maneira intensa, determinou-se uma limpeza diária, onde programando o microcontrolador um horário e, no momento em que o RTC registrar o mesmo horário, o sistema tem início (caso a condição do transdutor de nível de água 7 esteja apontando que há água na caixa d'água). O período que se imaginou ser o mais viável é ao amanhecer, pois, pelo fato de ainda não haver movimentação de veículos, a formação de poeira seria pequena. No caso de a condição de meteorologia apontar que houve chuva em um certo dia, implicará na postergação da limpeza por parte do sistema, ou seja, na situação em que o transdutor de temperatura e umidade indicar um valor de umidade característico de quando o ambiente está chuvoso, a limpeza será adiada. Isto porque além da água da chuva fazer a limpeza dos módulos, o solo estará úmido e a formação de poeira será diminuída.

4.3.3. Sistema de Arrefecimento para o Conjunto de 3,2 kWp

Existem algumas propostas de arrefecimento artificial de painéis fotovoltaicos, porém, não se encontrou um método onde o resfriamento seria tão eficaz. Tendo em vista a disposição da serpentina ou outro condutor de água sob os módulos, foi analisado que se houvesse bandeja sob os módulos, de modo que apenas uma chapa de zinco (usada como tampa para vedar a bandeja) dividisse o contato direto da água em temperatura ambiente com a superfície traseira do módulo, a transferência de calor se daria com maior êxito. Para o sistema de arrefecimento pensou-se em uma forma de aproveitamento da água aquecida pelas placas no arrefecimento para uso em chuveiros e torneiras na residência. Para isto, é necessário que instalação hídrica da residência esteja de acordo para a recepção da água com temperaturas mais elevadas. Assim, além do ganho de eficiência de geração do conjunto fotovoltaico, haveria o benefício de economia de energia nesses aparelhos que possuem alto consumo.

As bandejas utilizadas para serem fixadas sob os painéis têm suas vedações feitas por silicone hídrico e terão suportes que farão força de baixo para cima (calço) nos perfis de alumínio que suportam os painéis. Desta maneira, os suportes tornam o contato das bandejas

nas partes traseiras das placas o mais acoplado possível. Assim como os painéis estão inclinados em relação ao plano horizontal na busca de seguir a latitude local, as bandejas também seguirão a mesma angulação, tornando-as o mais acoplado possível aos painéis. Considerou-se cenário inicial aquele onde o transdutor de nível de água 12 não indique água na altura em que este se encontra no boiler. Diante do exposto, seguindo a Figura 4.26, inicialmente a água provinda da caixa d'água principal fornece água às bandejas, de modo que as válvulas solenoide 1 e 5 são abertas e a bomba é acionada. A representação de ligação das bandejas uma a outra pode se dar por outra forma diferente à denotada na Figura 4.26. Da forma como foi exposto, a água preencherá a bandeja consecutiva à bomba e a sua adjacente simultaneamente (como segue em vasos comunicantes). Quando ambas tiverem seu volume ocupado por água, as demais serão preenchidas seguindo o mesmo padrão das duas primeiras.

A bomba abastecerá o sistema de arrefecimento até que o transdutor de nível de água 12 aponte a presença de água. Caso o sistema já indique presença de água no sensor, caracteriza-se um cenário de circulação de água entre o sistema de arrefecimento. Desta maneira, as válvulas solenoides 2 e 5 liberam passagem de água e a bomba 3 é acionada e a água presente nas bandejas é renovada por uma água mais fria presente no boiler. Caso o PT100 presente no boiler apresente uma temperatura maior que a temperatura lida pelo PT100 na “última” bandeja, o sistema de circulação será ignorado/interrompido.

4.4. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO COM PAINEL FOTOVOLTAICO DE 160 W

Explicado o funcionamento do sistema real, de 3,2 kWp, o primeiro passo para analisar a viabilidade dos sistemas se deu pelo desenvolvimento do protótipo instalado no Batlab – UFMS, que simula o projeto em escala reduzida.

Figura 4.28 Imagem do setup de teste e elementos do protótipo



Fonte: Autor.

Na Figura 4.28, observa-se os seguintes elementos:

- 1 – Perfil de alumínio com a cremalheira e o brucutu embutidos
- 2 – Brucutu
- 3 – Suporte brucutu articulado
- 4 – Motor com sua engrenagem em contato com a cremalheira.
- 5 – Bandeja instalada sob painel
- 6 – Transdutor ultrassônico dentro do encapsulamento

Salvo a estrutura de sustentação do painel, nos sistemas de limpeza e arrefecimento buscou-se seguir o esquemático do sistema de 3,2 kWp à risca em menor escala. Foi feita uma adaptação da cremalheira e da estrutura que sustenta o brucutu no perfil estrutural de alumínio *V-Slot*, e duas guias com roldanas foram fixadas cerca de 40 cm distante uma da outra em uma ripa madeira (imagina-se uma ripa que faça a função do perfil de alumínio que sustente os painéis em situação real). Foi feita uma adaptação com ripas para o motor, de modo que este estivesse a uma altura capaz de entrar em atrito com a cremalheira para fazer o deslocamento do brucutu.

A frequência de limpeza e arrefecimento foi dada de maneira que a extração de dados permitisse chegar às conclusões necessárias. Portanto, tomando os experimentos de limpeza por exemplo, a formação de poeira sobre o painel foi dada pelo espalhamento artificial, podendo inclusive não corresponder a um cenário real.

5. RESULTADOS DA ANÁLISE DE DESEMPENHO

O desempenho do sistema proposto foi avaliado experimentalmente a partir de parâmetros que indicam a performance do painel, ou seja, tensão de máxima potência, corrente de máxima potência, irradiação (dados obtidos pelo Transdutor MI8511 e pela estação meteorológica). Como visto na Seção 2.2, o inversor tem a tecnologia de rastreabilidade do ponto de MPPT. Devido ao fato de a placa solar do protótipo não estar ligado a nenhum inversor para desempenhar tal função, é necessário utilizar uma carga variável para levantar a curva $I - V$ e $P \times V$, típica de geração da placa fotovoltaica.

Em todos os testes realizados utilizou-se uma carga resistiva conectada ao painel para causar uma perturbação na tensão e corrente fornecidas. Os valores aproximados das resistências foram 0Ω ; $2,1 \Omega$; $3,3 \Omega$; $4,5 \Omega$; $5,7 \Omega$; $6,7 \Omega$; $8,2 \Omega$; $9,1 \Omega$; 10Ω ; 12Ω (resistência equivalente medida pelo multímetro), obtendo-se 10 pontos para cada curva. Colocou-se um multímetro no modo amperímetro para medição da corrente entregue a carga (I_{MP}), e um segundo multímetro para medir a tensão (V_{MP}). Através dos valores de corrente e tensão coletados dos experimentos de limpeza e arrefecimento, calculou-se a potência expondo as informações em gráficos de $I - V$ e $P \times V$. Assim é possível analisar os ganhos de geração para as distintas situações em que o painel foi submetido. O resultado é um gráfico com várias curvas similares à Figura 2.6, e assim, é possível analisar o ponto que se aproxima do MPPT.

As condições do painel para coleta de informações foram: sujo, limpo pelo sistema automatizado proposto, limpo com bucha (representando um cenário onde um profissional faz a limpeza manualmente), painel sem água na bandeja e painel com água na bandeja. As medições foram realizadas entre os meses de novembro e dezembro (primavera). Tal período é caracterizado por chuvas e formações de nuvens, resultando menor formação de poeira (inclusive para testes artificiais) e instabilidade solar, além de ocasionar um clima mais ameno. Estes fatores dificultaram o levantamento de dados para análise.

Portanto, os testes foram condicionados a períodos do dia em que foi observada uma estabilidade da intensidade de radiação solar sobre a região, ainda que estes períodos não

correspondessem à máxima irradiação solar. Um limitante do *setup* de testes é o fato de utilizar apenas um painel solar, logo, para cada condição de teste, foi tomado o cuidado de realizar as medições enquanto os níveis de irradiação fossem bem próximos entre um teste e outro, tornando possível uma comparação mais justa.

5.1. DESEMPENHO DO PAINEL REFERENTE A CONDIÇÕES DE SUJIDADE

Como visto anteriormente, a sujeira é um fator que influencia mais diretamente na corrente fornecida pelo módulo, logo, buscou-se analisar a diferença nas curvas características antes e após a atuação do sistema de limpeza proposto.

A sequência de experimentos para coleta de dados de limpeza segue conforme a ordem: inicialmente tomou-se a geração do módulo para o painel limpo manualmente, em seguida realizou-se as mesmas medições com poeira sobre o módulo e por fim, foram feitas medições com o painel limpo pelo sistema proposto. A simulação da condição de sujeira do módulo foi feita a seleção de uma terra propícia para formação de poeira. Na Figura 5.1 é retratada cada uma das condições supracitadas. Na Figura 5.2 é mostrado a foto tirada com uma câmera térmica onde podem ser observados dois detalhes: i) a área de varredura do jato de água que faz a limpeza e, ii) a limpeza também ajuda na redução da temperatura do painel, melhorando a eficiência.

Figura 5.1 Imagens do painel para experiência de limpeza



Figura 5.1.1. Imagem do painel limpo pelo profissional.



Figura 5.1.2. Imagem do painel sujo.



Figura 5.1.3. Imagem do painel limpo pelo sistema.

Fonte: Autor.

Figura 5.2 Fotos térmicas da placa fotovoltaica em condições limpas pelo profissional e limpa pelo sistema



Figura 5.2.1. Imagem térmica antes de se fazer a limpeza



Figura 5.2.2. Imagem térmica depois de se fazer a limpeza.

Fonte: Autor.

5.1.2. Desempenho do Módulo Limpo Manualmente

Fez-se a coleta de dados para o procedimento de análise de desempenho do sistema com a placa fotovoltaica limpa conforme os dados meteorológicos mostrados na Tabela 1. Os resultados são vistos na Tabela 2.

Tabela 1 Dados para situação do painel nas condições de limpeza do momento em que se fez a leitura

Horário	Situação Placa	Intensidade de Radiação Ultravioleta (mW/cm²), Transdutor MI8511	Intensidade de Radiação Ultravioleta (W/m²), Estação Meteorológica BATLAB	Temperatura Ambiente (°C)	Umidade (%)	Temperatura Painel Lado com Bandeja (°C)	Temperatura Painel Lado sem Bandeja (°C)
09:10:00	Limpa pelo Profissional	3,49	654	33	55	50	50

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 2 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 1

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência- V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	6,33	0,406	2,56998
2,1	6,37	10,03	63,8911
3,3	5,12	14,6	74,752
4,5	3,7	16,38	60,606
5,7	3	17,1	51,3
6,7	2,6	17,48	45,448
8,2	2,24	17,84	39,9616
9,1	2,01	18,06	36,3006
10	1,77	18,29	32,3733
12	1,51	18,5	27,935
Infinito	0,17	19,64	3,3388

Fonte: Elaboração do autor.

5.1.3. Desempenho do Módulo Sujo

Em seguida, avaliou-se o desempenho do painel sujo sob as condições de tempo e temperatura na placa fotovoltaica mostrados na Tabela 3. As medições para este caso estão reunidas na Tabela 4.

Tabela 3 Dados para situação do painel nas condições de sujidade do momento em que se fez a leitura

Horário	Situação Placa	Intensidade de Radiação Ultravioleta (mW/cm^2), Transdutor MI8511	Intensidade de Radiação Ultravioleta (W/m^2), Estação Meteorológica BATLAB	Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$)	Umidade (%)	Temperatura Painel Lado com Bandeja ($^{\circ}C$)	Temperatura Painel Lado sem Bandeja ($^{\circ}C$)
09:14:00	Suja	3,33	585	33	55	56	56

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 4 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 3

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência- V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	4,75	0,334	1,5865
2,1	4,37	6,96	30,4152
3,3	4,22	12,24	51,6528
4,5	3,69	15,29	56,4201
5,7	3	16,34	49,02
6,7	2,64	16,8	44,352
8,2	2,18	17,37	37,8666
9,1	1,96	17,65	34,594
10	1,79	17,85	31,9515
12	1,48	18,18	26,9064
Infinito	0,16	19,42	3,1072

Fonte: Elaboração do autor.

5.1.4. Desempenho do Módulo Limpo pelo Sistema Proposto

O terceiro teste consiste em realizar as medições de tensão e corrente fornecida pelo painel após a realização da limpeza. Para isso, executou-se o *firmware* da limpeza para acionar o jateamento de água para remover a sujeira. Após a limpeza os dados de irradiação já estavam similares ao do caso do painel limpo manualmente. A situação que o módulo se encontrava pode ser analisada na Tabela 5, e na Tabela 6 tem-se as medições para estas condições.

Tabela 5 Dados para situação do painel nas condições de sujidade do momento em que se fez a leitura

Horário	Situação Placa	Intensidade de Radiação Ultravioleta (mW/cm^2), Transdutor MI8511	Intensidade de Radiação Ultravioleta (W/m^2), Estação Meteorológica BATLAB	Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$)	Umidade (%)	Temperatura Painel Lado com Bandeja ($^{\circ}C$)	Temperatura Painel Lado sem Bandeja ($^{\circ}C$)
09:23:00	Limpa com Sistema	3,5	656	33	56	36	36

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 6 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 5

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência- V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	7,5	0,496	3,72
2,1	6,58	8,39	55,2062
3,3	5,51	15,83	87,2233
4,5	3,98	17,66	70,2868
5,7	3,36	18,27	61,3872
6,7	2,79	18,81	52,4799
8,2	2,4	19,16	45,984
9,1	2,16	19,37	41,8392
10	1,9	19,61	37,259
12	1,62	19,86	32,1732
Infinito	0,18	21,05	3,789

Fonte: Elaboração do autor.

Como visto no Capítulos 2, a tensão é influenciada pela temperatura em que as células fotovoltaicas se encontram, sofrendo um percentual característico de decréscimo a cada grau Celsius. Como busca-se analisar apenas a influência da sujeira sobre o módulo, alterou-se os valores de tensão coletados na Tabela 6 para os valores da Tabela 4, ou seja, do painel sujo. Fez-se esta manipulação pois, em um dia de alta temperatura ambiente, o ganho de tensão gerado pelo resfriamento do módulo após o contato da água sobre o módulo perduraria por alguns minutos, e em seguida a temperatura voltaria a ser alta novamente nas células.

Tabela 7 Dados de corrente segundo o experimento da Tabela 6. Porém, manipulando os dados de tensão para os valores da Tabela 4

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência- V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	7,5	0,334	2,505
2,1	6,58	6,96	45,7968
3,3	5,51	12,24	67,4424
4,5	3,98	15,29	60,8542
5,7	3,36	16,34	54,9024
6,7	2,79	16,8	46,872
8,2	2,4	17,37	41,688
9,1	2,16	17,65	38,124
10	1,9	17,85	33,915
12	1,62	18,18	29,4516
Infinito	0,18	19,42	3,4956

Fonte: Elaboração do autor.

5.2. DESEMPENHO DO MÓDULO ATRAVÉS DAS CONDIÇÕES DE TEMPERATURA (ARREFECIMENTO)

As experiências de arrefecimento foram realizadas no mesmo dia da limpeza. O objetivo do arrefecimento proposto é melhorar o nível de tensão do módulo ao se reduzir a temperatura no mesmo, visto que ambos estão diretamente ligados como consta no *datasheet* da placa fotovoltaica (Anexo F). O coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto vale aproximadamente $(-0,37\%)/(^{\circ}\text{C})$ e de uma maneira geral, o coeficiente de temperatura de potência máxima é informado como $(-0,45\%)/(^{\circ}\text{C})$.

Na Figura 5.3 são mostradas as imagens térmicas da placa testada. Nota-se que a temperatura na placa era de aproximadamente 50 graus, porém em dias mais quentes esta temperatura atinge níveis ainda maiores. Por outro lado, a mesma imagem térmica logo após o enchimento da bandeja com água é vista na Figura 5.4. É evidente que a temperatura da placa diminui drasticamente no lado esquerdo. É importante lembrar que a bandeja foi confeccionada com dimensões reduzidas justamente para avaliar a interferência do arrefecimento. Em um sistema real, a bandeja ocuparia uma área maior, reduzindo a temperatura do módulo como um todo.

Figura 5.3 Imagens térmicas do painel com bandeja instalado sob o mesmo, analisando temperatura na região onde foi instalada a bandeja e na região lateral



Figura 5.3.1. Imagem térmica do painel, analisando a temperatura na lateral esquerda de onde a bandeja estava instalada.

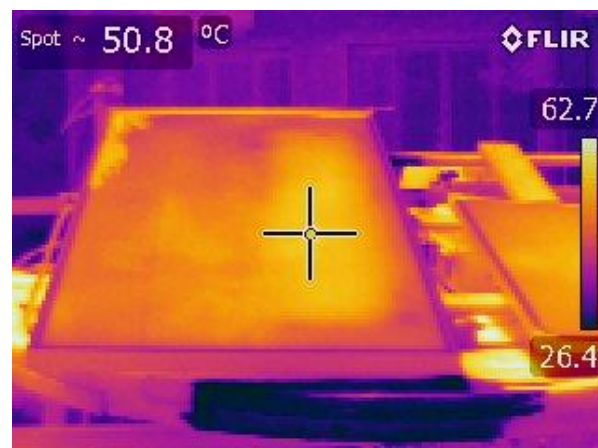


Figura 5.3.2. Imagem térmica do painel, analisando a temperatura no local onde estava instalada a bandeja.

Fonte: Autor.

Figura 5.4 Imagens térmicas do painel após colocar água na bandeja, analisando a temperatura originada na região onde estava a bandeja e na região lateral



Figura 5.4.1. – Imagem térmica do painel, analisando a temperatura na lateral esquerda de onde a bandeja estava instalada com água.



Figura 5.4.2. – Imagem térmica do painel, analisando a temperatura no local onde estava instalada a bandeja com água.

Fonte: Autor.

5.2.2. Desempenho do Módulo sem Água na Bandeja

Nesta condição buscou-se analisar o módulo em uma situação cotidiana. Apesar da bandeja já estar instalada sob a placa, a mesma estava sem água. Fez-se duas medições para o painel sem água na bandeja, a primeira com uma irradiação de 737 W/m^2 e a segunda com 202 W/m^2 como foi mostrado na estação meteorológica. Os dados climáticos e do painel no instante das medições são apresentados na Tabela 8, e os parâmetros de geração estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 8 Dados climáticos e de situação do painel para situação em que foi colocada uma bandeja de alumínio em contato com sua parte debaixo do momento em que se fez a leitura (irradiação: 737 W/m^2)

Horário	Situação da Bandeja	Intensidade de Radiação Ultravioleta (mW/cm^2), Transdutor MI8511	Intensidade de Radiação Ultravioleta (W/m^2), Estação Meteorológica BATLAB	Temperatura Ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	Umidade (%)	Temperatura Painel Lado com Bandeja ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Painel Lado sem Bandeja ($^{\circ}\text{C}$)
10:27:00	Sem Água	3,53	202	33	55	49	43

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 9 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 8

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência - V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	1,67	0,155	0,25885
2,1	1,63	3,28	5,3464
3,3	1,75	5,228	9,149
4,5	1,73	7,74	13,3902
5,7	1,7	9,35	15,895
6,7	1,67	10,81	18,0527
8,2	1,65	13,25	21,8625
9,1	1,52	14,63	22,2376
10	1,5	15,69	23,535
12	1,34	16,49	22,0966
Infinito	0,16	18,81	3,0096

Fonte: Elaboração do autor.

Após realizado o experimento que segue os dados das Tabelas 8 e 9, a irradiação foi alterada pela presença de nuvens que taparam a incidência dos raios solares sobre as células.

Desta forma, fez-se uma nova medição para a situação com a diminuição de irradiação para análise.

Tabela 10 Dados climáticos e de situação do painel para situação em que foi colocada a bandeja em contato com sua parte de baixo do momento em que se fez a leitura (irradiação: 202 W/m²)

Horário	Situação da Bandeja	Intensidade de Radiação Ultravioleta (mW/cm ²), Transdutor MI8511	Intensidade de Radiação Ultravioleta (W/m ²), Estação Meteorológica BATLAB	Temperatura Ambiente (°C)	Umidade (%)	Temperatura Painel Lado com Bandeja (°C)	Temperatura Painel Lado sem Bandeja (°C)
10:27:00	Sem Água	3,53	202	33	55	49	43

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 11 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 10

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência- V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	1,67	0,155	0,25885
2,1	1,63	3,28	5,3464
3,3	1,75	5,228	9,149
4,5	1,73	7,74	13,3902
5,7	1,7	9,35	15,895
6,7	1,67	10,81	18,0527
8,2	1,65	13,25	21,8625
9,1	1,52	14,63	22,2376
10	1,5	15,69	23,535
12	1,34	16,49	22,0966
Infinito	0,16	18,81	3,0096

Fonte: Elaboração do autor.

5.2.3. Desempenho do Módulo com Água na Bandeja

Após a segunda medição da bandeja sem água (irradiação: 202 W/m²), a temperatura no painel manteve-se estabilizada conforme a Tabela 10. Executou-se então o algoritmo programado no microcontrolador para que fosse bombeado água na bandeja de modo a analisar o ganho da geração pelo parâmetro de tensão.

Tabela 12 Dados climáticos e de situação do painel para situação em que foi colocada a bandeja com água no seu interior em contato com sua parte debaixo do momento em que se fez a leitura (irradiação: 281 W/m²)

Horário	Situação da Bandeja	Intensidade de Radiação Ultravioleta (mW/cm ²), Transdutor MI8511	Intensidade de Radiação Ultravioleta (W/m ²), Estação Meteorológica BATLAB	Temperatura Ambiente (°C)	Umidade (%)	Temperatura Painel Lado com Bandeja (°C)	Temperatura Painel Lado sem Bandeja (°C)
10:30:00	Com Água	3,83	281	32	56	40	39

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 13 Dados de corrente, tensão e potência de máximas potências para as condições especificadas na Tabela 12, irradiação: 281 W/m²

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência- V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	2,59	0,235	0,60865
2,1	2,45	4,189	10,26305
3,3	2,47	7,29	18,0063
4,5	2,46	11,1	27,306
5,7	2,48	13,53	33,5544
6,7	2,33	15,89	37,0237
8,2	2,09	16,76	35,0284
9,1	1,91	17,23	32,9093
10	1,74	17,59	30,6066
12	1,47	18,05	26,5335
Infinito	0,17	19,73	3,3541

Fonte: Elaboração do autor.

É importante elucidar que para esta medição contendo água na bandeja a irradiação sofreu um acréscimo em relação ao período em que a bandeja estava vazia de 202 W/m² para 281 W/m². Portanto, na Tabela 14 fez-se a manipulação de dados mantendo a corrente idêntica à da Tabela 11, ou seja, desconsiderou-se o ganho de corrente proporcionado pelo aumento de irradiação, analisando somente o ganho de tensão ocasionado pela redução de temperatura no módulo.

Tabela 14 Dados de tensão como segue a Tabela 13 e de corrente da Tabela 11, irradiação: 202 W/m²

Carga (Ω)	Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	Tensão de Máxima Potência- V_{mp} (V)	Potência de Pico - P_{mp} (W)
0	1,67	0,235	0,39245
2,1	1,63	4,189	6,82807
3,3	1,75	7,29	12,7575
4,5	1,73	11,1	19,203
5,7	1,7	13,53	23,001
6,7	1,67	15,89	26,5363
8,2	1,65	16,76	27,654
9,1	1,52	17,23	26,1896
10	1,5	17,59	26,385
12	1,34	18,05	24,187
Infinito	0,16	19,73	3,1568

Fonte: Elaboração do autor.

5.3. ANÁLISES GRÁFICAS

As tabelas e gráficos obtidos até então dão suporte para a análise de desempenho e viabilidade. Adicionalmente, faz-se uma expansão da análise para o sistema de 3,2 kWp. Considerando os valores investidos no desenvolvimento do protótipo, o *payback* é calculado para o sistema instalado em Araguainha.

Será utilizado como base para o cálculo de viabilidade a capacidade de geração do módulo utilizado no protótipo e do sistema de 3,2 kWp. Assim, a análise de viabilidade e *payback* será baseada nos kWh que serão gerados pela melhoria de eficiência empregando os sistemas de limpeza e arrefecimento e o preço do kWh que a concessionária aplica para os consumidores do grupo B.

Sabe-se por [23] que a energia gerada pelo módulo pode ser calculada pela eq. (2), e com isso tem-se uma estimativa do valor financeiro obtido com a solução proposta.

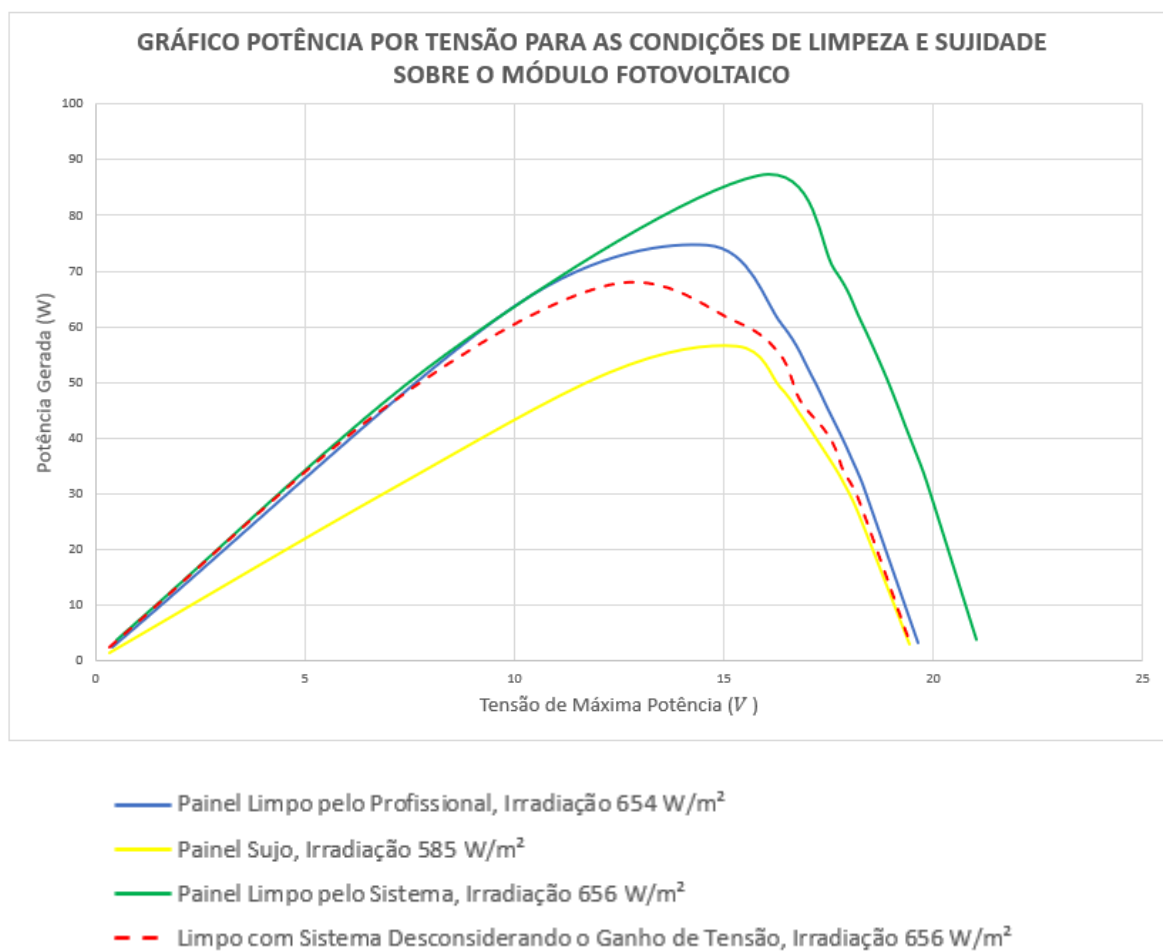
$$\text{Energia} = (\text{Potência do Módulo Solar}).(\text{Tempo}).(\text{Rendimento}) \quad (2)$$

5.4. GRÁFICOS E ANÁLISES DE DESEMPENHO DO MÓDULO PARA CONDIÇÕES DE SUJIDADE E LIMPEZA AO QUAL FOI SUBMETIDO NA SEÇÃO 5.1

A partir dos dados coletados das Tabelas 5.1 a 5.7, plotou-se os gráficos mostrados nas Figuras 5.5 e 5.6 no Software *Excel* das curvas I – V e P x V de desempenho do módulo fotovoltaico para as condições de limpeza e sujidade.

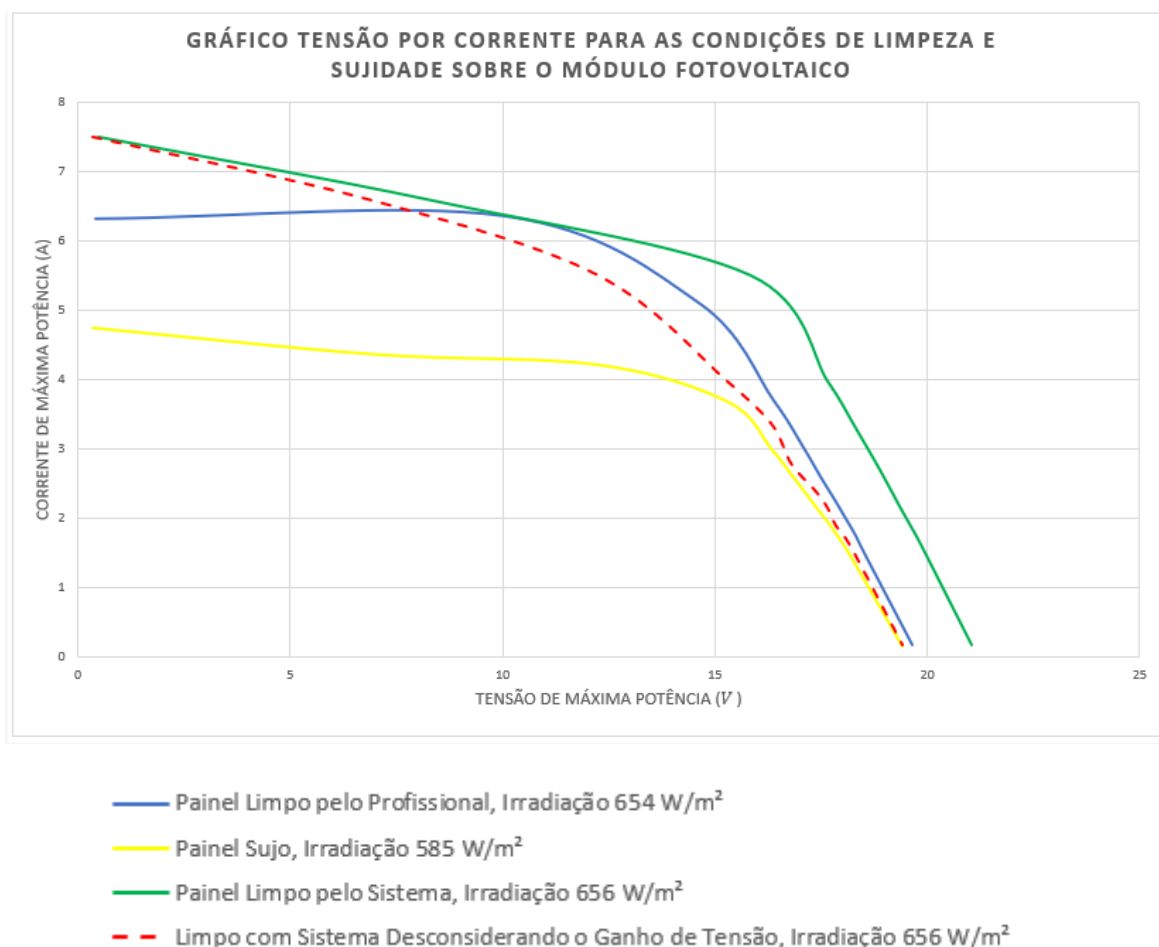
Tomando-se o gráfico P x V (Figura 5.5) de geração do módulo para todas as condições de limpeza e sujidade imposta, a potência desenvolvida pelo módulo representada pela linha azul se refere à condição de limpeza como se fosse de fábrica (feita a limpeza por um profissional, sem interferência de água para arrefecimento). Nesta situação a potência de pico e tensão de máxima potência são aproximadamente 75 W e tensão 14,5 V, respectivamente. Para a curva em linha amarela onde o módulo esteve sujo com poeira, a potência de pico e tensão de máxima potência são de, aproximadamente, 56,4 W e 15,3 V. Após feita a limpeza a curva designada pela linha verde indica que a potência de pico e tensão de máxima potência valem aproximadamente 87,2 W e 15,8 V. E por fim a linha tracejada em vermelho representa o ganho de potência desconsiderando o ganho de tensão (neste caso obtido pelo resfriamento do painel logo após realizar a lavagem), sendo de aproximadamente 67,44 W.

Figura 5.5 Tensão de Máxima Potência por Corrente de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Limpeza e Sujidade



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 5.6 Tensão de Máxima Potência por Potência de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Limpeza e Sujidade



Fonte: Elaboração do autor.

Com isso observa-se o ganho de potência gerada em relação ao módulo sujo para as demais condições como sendo: de 18,6 W para o módulo limpo manualmente (profissional de manutenção), de 30,8 W após a limpeza realizada automaticamente pelo sistema, e de 11 W para a situação após limpeza desconsiderando o resfriamento ocasionado pelo contato da água.

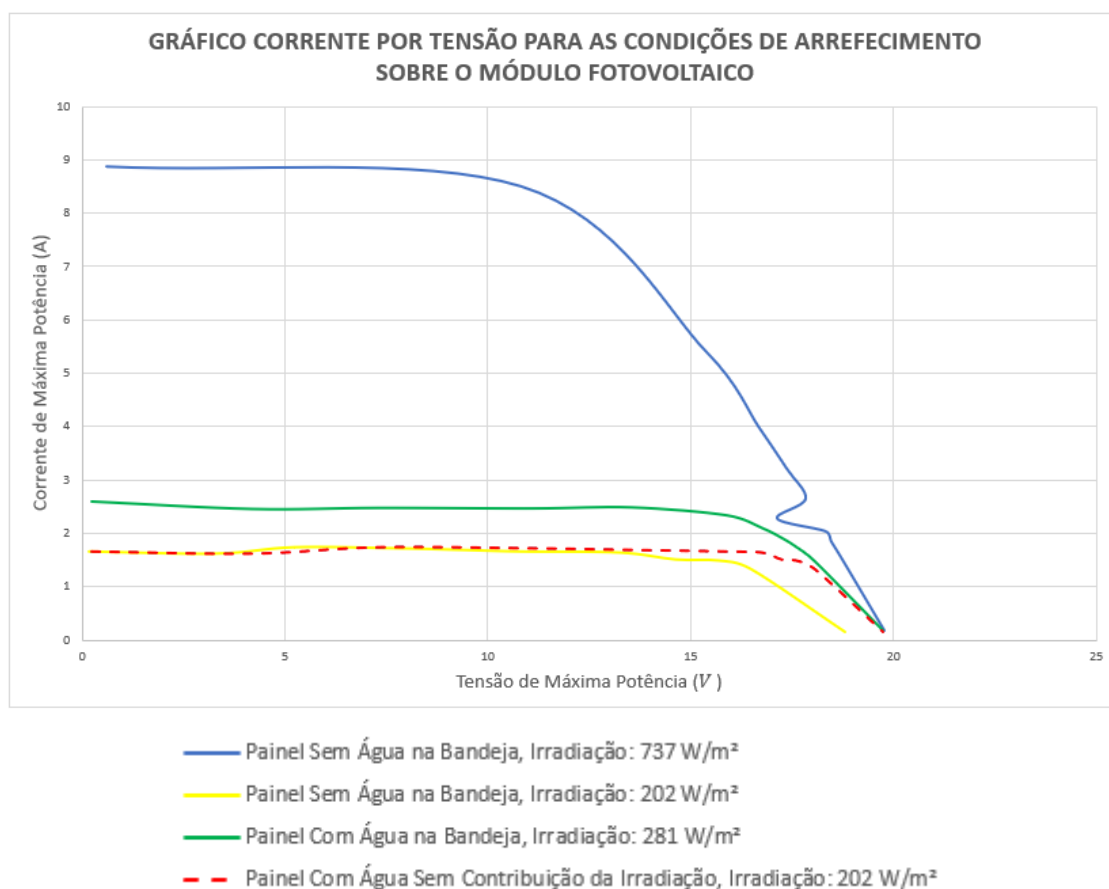
Tomando como parâmetro ideal de geração para sujidade o cenário onde o painel estaria limpo após a realização de uma limpeza por empresa especializada, tem-se que a redução de potência ocasionada pela poeira sobre o módulo foi de 24,8%, para o caso onde o painel é sujeito a limpeza pelo sistema há um ganho de 16,3% e desconsiderando o ganho de tensão, tem-se um acréscimo de potência da ordem de 19,57%.

Nota-se que o aumento de potência causado pela limpeza do módulo é superior a geração do módulo limpo pelo profissional. Por isso, na subseção 6.3.1 para análise de viabilidade serão utilizados os parâmetros de limpeza desconsiderando a tensão acrescida em consequência da limpeza.

5.5. GRÁFICOS E ANÁLISES DE DESEMPENHO DO MÓDULO PARA CONDIÇÃO DE ARREFECIMENTO AO QUAL FOI SUBMETIDO NA SEÇÃO 5.2

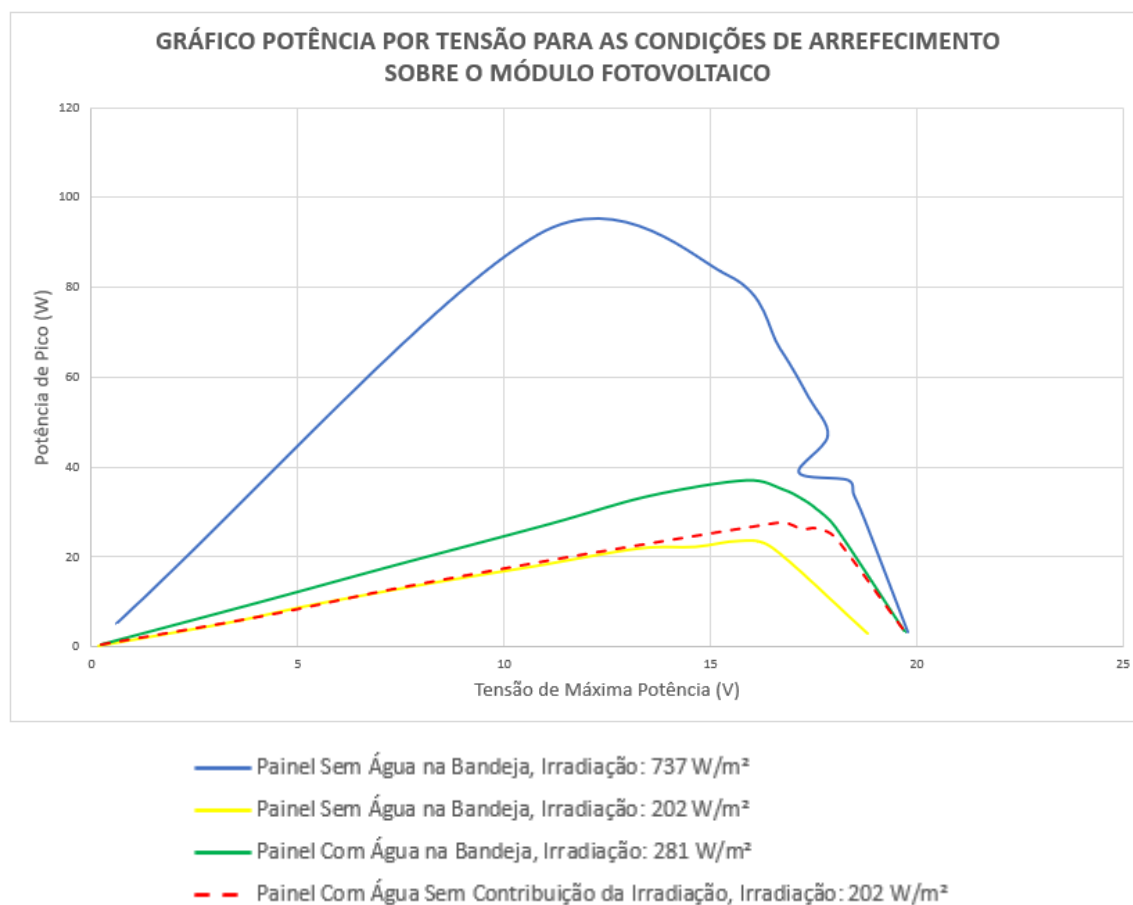
A partir dos dados coletados das Tabelas 5.8 a 5.13, plotou-se os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 no Software *Excel* das curvas I – V e P x V de desempenho do módulo fotovoltaico para as condições de arrefecimento.

Figura 5.7 Tensão de Máxima Potência por Corrente de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Arrefecimento.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 5.8 Tensão de Máxima Potência por Potência de Máxima Potência para Carga Resistiva Variável Conectada ao Módulo com Condições Experimentais de Arrefecimento.



Fonte: Elaboração do autor.

Assim como na limpeza, tomando-se o gráfico $P \times V$ de geração do módulo para todas as condições de normalidade e arrefecimento desempenhada no painel, tem-se que na linha azul representando a condição sem água no interior da bandeja (sem arrefecimento) uma potência de pico de 91,9 W e tensão de máxima potência de 10,81 V. Ainda para uma situação sem água na bandeja, porém, com uma irradiação na região menor por conta da entrada de nuvens, a curva em amarelo demonstra uma potência de pico de 23,5 W e uma tensão de máxima potência de 15,7 V. Ao se colocar água na bandeja para fazer o arrefecimento da placa, ainda com uma irradiação baixa, a curva em verde apresenta uma potência de pico de 37 W e tensão de máxima potência de 15,9 V. Pelo fato de haver uma diferença da irradiação entre as situações onde a bandeja está com e sem água, a curva tracejada em vermelho toma a corrente quando a bandeja estava sem água (irradiação de $202 W/m^2$) para observar apenas o

ganho de tensão obtida com o sistema de arrefecimento, com isso, a potência de pico se mostra em 27,6 W e tensão de máxima potência de 16,7 V.

Fazendo a análise de ganho de potência do painel sem arrefecimento designado pela linha em amarelo com as demais curvas (exceto a curva em azul), tem-se: para a curva representado pela linha em verde o ganho de potência é de 13,5 W e para a curva representada pela linha em tracejada vermelha o ganho é de 4,1 W.

Tomando a curva em amarelo como sendo a situação rotineira da placa, ou seja, sem nenhum método de resfriamento para o painel, considera-se a potência de saída desta situação como de 100%. Disso, tem-se que a porcentagem de aumento de potência para a curva em verde é de 57,45% e para a curva em vermelho tracejado é de 17,45%.

Assim como observado na limpeza, a maior eficiência de potência obtida pelo painel foi com a bandeja com água. Porém, pelo fato de haver uma mudança na irradiação detectada pelos sensores, a análise de viabilidade realizada na próxima seção será dada desconsiderando o ganho de corrente (que está mais diretamente ligado à irradiação).

5.6. ANÁLISE SIMPLIFICADA DA VIABILIDADE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE LIMPEZA E ARREFECIMENTO

Os materiais utilizados para desenvolvimento do protótipo servem de parâmetro financeiro para o desenvolvimento de um projeto de uma escala maior para atender ao sistema piloto de 3,2 kWp. Entretanto, alguns dispositivos, como o LCD foram utilizados para facilitar a obtenção dos dados para a elaboração deste trabalho, os quais podem ser desconsiderados no levantamento do investimento necessário.

As partes foram separados em mecânicas e elétricas que controlam e alimentam os mecanismos de execução do protótipo. Boa parte do material quando instalado no projeto de oito painéis em Araguainha deverá ser substituído por peças que adequem ao material que compõe um projeto de instalação de placas fotovoltaicos.

Os custos de instalação do protótipo foram de aproximadamente R\$ 2.240,00, dos quais aproximadamente R\$ 815,00 são investimentos em materiais que suprem

exclusivamente o sistema de limpeza, e R\$ 150,00 de uso exclusivo do arrefecimento. O restante é de uso comum dos dois sistemas.

Para o sistema de 3,2 kWp prevê-se um gasto total de aproximadamente R\$ 4.000,00 cujo o valor de R\$ 1.021,00 é destinado de forma específica para a limpeza e R\$ 820,00 para o arrefecimento, de forma que a diferença corresponde a materiais de uso comum das aplicações, como a bomba e algumas válvulas.

Nota-se uma aproximação do valor do arrefecimento com a limpeza no conjunto de oito painéis em relação a diferença dos sistemas no protótipo. Isso se dá pela utilização de um número maior de bandejas para o arrefecimento, de forma que seja feito o resfriamento de todas as placas. Além disso, imagina-se uma instalação residencial onde já exista um boiler e todo encanamento que derive dele para chuveiros e torneiras, do contrário, os benefícios do arrefecimento não serão aproveitados na sua totalidade.

Uma observação importante sobre esta seção é que a análise de viabilidade feita neste trabalho não leva em conta o custo financeiro do dinheiro, advindo de juros e inflação, nem o custo de oportunidade, ou seja, o custo da segunda melhor alternativa para uso do dinheiro. Portanto, o *payback* é calculado com base apenas nos custos de materiais adquiridos no varejo, e desta forma sem o possível desconto para compra de muitas unidades.

5.6.1. Impacto Econômico do Sistema de Limpeza

Da equação (2), tem-se a partir de dados da CRESESB que a média de horas de sol pleno na localidade em que se está instalada o protótipo é de 5 horas. Assim, a energia gerada pelo módulo utilizado no protótipo será de:

$$Energia_{160\text{ Wp}} = 160 \times 5 \times 0,8 \rightarrow Energia_{160\text{ Wp}} = 640 \text{ Wh/dia} \quad (3)$$

Supondo que a energia gerada no dia calculada em (3) corresponda à energia gerada com o painel limpo pelo profissional, ou seja, o painel limpo corresponda a 100% da sua capacidade de fornecimento de potência. O fator de 0,8 utilizado corresponde a uma eficiência média de 80% durante estas 5 horas de sol pleno. Como visto na seção 5.3 o painel sujo tem uma perda de aproximadamente 24,8% da sua capacidade de geração. A relação de ganho de potência para o módulo limpo pelo sistema em relação a ele sujo é 19,57% da energia gerada.

Por outro lado, o percentual de perda de geração com o painel limpo automaticamente em relação ao módulo limpo por um profissional foi de 10,08%.

Primeiramente será analisada a geração de kWh para o módulo de 160 W, e em seguida, para o sistema de 3,2 kWp. Como calculado em (3), para o painel limpo pelo profissional tem-se 640 Wh gerados diariamente resultando em 19,2 kWh gerados mensalmente. Para o painel sujo a eficiência é de 75,2% em relação ao painel limpo pela intervenção do profissional de manutenção, assim, calcula-se:

$$Energia_{160Wp} = 640 \cdot 0,752 \rightarrow Energia_{160Wp} = 481,28 \text{ Wh/dia} \quad (4)$$

$$Energia_{160Wp} = 481,28 \cdot 30 \rightarrow Energia_{160Wp} = 14,44 \text{ kWh/mês} \quad (5)$$

Para o painel limpo pelo sistema (desconsiderado o ganho de tensão) a eficiência é de aproximadamente 89,9% em relação ao painel limpo, o cálculo de geração se dá por:

$$Energia_{160Wp} = 640 \cdot 0,899 \rightarrow Energia_{160Wp} = 575,36 \text{ Wh/dia} \quad (6)$$

$$Energia_{160Wp} = 575,36 \cdot 30 \rightarrow Energia_{160Wp} = 17,26 \text{ kWh/mês} \quad (7)$$

Portanto, levando em consideração as porcentagens de eficiência de sujidade e limpeza que o módulo do protótipo apresentou para o sistema de 3,2 kWp, tomou-se a média de horas de sol pleno de Araguainha no período de maior concentração de poeira, ou seja, entre fevereiro e outubro e desta forma calculou-se a geração:

$$Energia_{3,2kWp} = 3200 \cdot 5,52 \cdot 0,8 \rightarrow Energia_{3,2kWp} = 14,13 \text{ kWh/dia} \quad (8)$$

Tendo como parâmetro a geração mensal do conjunto fotovoltaico de 3,2 kWp, considera-se que o valor correspondente a sua geração diária equivale a 100% da sua capacidade de geração. Desta maneira, faz-se os cálculos para as situações de sujidade e limpeza.

Assim como no painel de 160 W adotou-se uma porcentagem de geração reduzida devido a sujeira de 75,2%, logo:

$$Energia_{3,2kWp} = 14,13 \cdot 10^3 \cdot 0,752 \rightarrow Energia_{3,2kWp} = 10,62 \text{ kWh/dia} \quad (9)$$

$$Energia_{3,2\text{ kWp}} = 10,62.10^3 . 30 \rightarrow Energia_{3,2\text{ kWp}} = 318,6\text{ kWh/mês} \quad (10)$$

Agora, considerando que ao se fazer a limpeza pelo sistema proposto obtenha-se o mesmo percentual de geração que na placa fotovoltaica de 160 W, ou seja, 89,9%. O cálculo da geração diária e mensal do sistema de 3,2 kWp se dá por:

$$Energia_{3,2\text{ kWp}} = 14,13.10^3 . 0,899 \rightarrow Energia_{3,2\text{ kWp}} = 12,70\text{ kWh/dia} \quad (11)$$

$$Energia_{3,2\text{ kWp}} = 12,70.10^3 . 30 \rightarrow Energia_{3,2\text{ kWp}} = 381,0\text{ kWh/mês} \quad (12)$$

Portanto, através dos cálculos da energia gerada mensalmente para o caso do painel sujo e limpo pelo sistema, obtém-se que se o sistema solar, se mantido sempre limpo, pelo mecanismo automatizado e com porcentagem idêntica à encontrada no protótipo, o sistema de 3,2 kWp irá apresentar um ganho mensal de energia gerada de 62,4 kWh. Considerando o preço do kWh de R\$ 0,83/kWh a economia mensal gerada pela melhoria de eficiência devido à limpeza será de R\$ 51,80.

Levando em conta os custos dos materiais, de instalação e demais valores agregados de implantação do sistema de limpeza, observou-se que o custo para o sistema de limpeza e arrefecimento se dá por R\$ 4.000,00, dos quais R\$ 1.021,00 é o valor necessário exclusivo para aquisição do material de limpeza e levando em conta que a economia se desse apenas no período de seca, tem-se que a economia anual de energia gerada é de R\$ 466,2. Com isso, se o *payback* for calculado em cima apenas do valor de aquisição do material do sistema de limpeza em aproximadamente dois anos e três meses o sistema seria pago. Porém, levando em conta que o custo de instalação se dá pelo total (limpeza e arrefecimento), descontado o valor de instalação do sistema de arrefecimento, o valor pago para instalação do sistema de limpeza seria de R\$ 3.180,00; assim, o *payback* do sistema se dá em aproximadamente seis anos e 10 meses.

A avaliação do *payback* pode ser afetada pela variação no custo dos equipamentos/dispositivos utilizados no projeto, dependendo da localização do sistema fotovoltaico. Por outro lado, a aquisição em grande quantidade tende a baratear o custo, reduzindo o tempo de retorno do investimento.

É importante mencionar ainda que não foram considerados os custos com a água, que para realizar cada limpeza, consome cerca de 2 litros por placa para a velocidade que foi

configurada na Ponte H. Os custos foram desconsiderados por dois motivos principais: i) no local onde o sistema de 3,2 kWp está instalado, a água provém de poço artesiano e, ii) no futuro será avaliado um sistema de reaproveitamento da água utilizada na lavagem dos painéis.

5.6.2. *Impacto Econômico do Sistema de Arrefecimento*

Para o cálculo de viabilidade da melhoria obtida com o arrefecimento pode-se considerar alguns dos cálculos utilizados na viabilidade econômica da limpeza. Dentre estes, o cálculo de geração que corresponde a 100% da geração que o módulo do protótipo pode fornecer (3). Porém, o rendimento utilizado de 0,8 nos cálculos de geração do módulo, envolvem também a perda de energia gerada por conta da alta temperatura que permeia sobre as células fotovoltaicas. Portanto, o ganho de potência gerada pela utilização do arrefecimento do módulo será dado por valores acima do que se calculou que o módulo poderia gerar, ou seja, acima de 100%, pois, considerou 100% o módulo sob condições normais (sem método de melhoria de eficiência pelo arrefecimento). Para o cálculo de *payback*, o que levar-se-á em conta será o incremento de geração que trará economia ao usuário da energia fotovoltaica com método de melhoria de eficiência por arrefecimento.

Uma observação a se fazer é que o mesmo poderia ser feito para o sistema de limpeza, ou seja, analisar o ganho de potência acima dos 100% de geração, já que o rendimento definido também leva em conta os fatores de sujidade sobre o painel. Porém, analisou-se o “delta” como sendo por valores menores de 100% da capacidade de geração, pois assumiu-se que 100% é o módulo limpo de fábrica.

Desta forma, o cálculo de geração de (3) é relacionado ao painel sem utilização do método de eficiência pelo sistema de arrefecimento proposto. Assim, como visto na seção 6.2, o ganho de potência gerada utilizando o sistema de arrefecimento e desconsiderando a influência da corrente sobre esse ganho é de 17,45%. Com isso, o cálculo da geração do módulo para esta condição se dá por:

$$Energia_{160Wp} = 640 \cdot 1,174 \rightarrow Energia_{160Wp} = 751,36 \text{ Wh/dia} \quad (13)$$

$$Energia_{160Wp} = 751,36 \cdot 30 \rightarrow Energia_{160Wp} = 22540,8 \text{ kWh/mês} \quad (14)$$

Fazendo-se os cálculos das potências geradas diárias e mensais para o sistema de 3,2 kWp sem método de melhoria de eficiência pelo sistema de arrefecimento proposto, entretanto, utilizando a média de horas de sol pleno anual de 5,43; pelo fato do arrefecimento ser aproveitado em sua maior parte em todos os meses do ano, uma vez que a temperatura elevada diminui a geração ao longo de todo ano.

$$Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 3200 \cdot 5,43 \cdot 0,8 \rightarrow Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 13,9 \text{ kWh/dia} \quad (15)$$

$$Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 13,9 \cdot 10^3 \cdot 30 \rightarrow Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 417 \text{ kWh/dia} \quad (16)$$

Com isso, a geração resultante da utilização do sistema de arrefecimento, é calculado como:

$$Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 13,9 \cdot 10^3 \cdot 1,174 \rightarrow Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 16,32 \text{ kWh/dia} \quad (17)$$

$$Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 16,32 \cdot 10^3 \cdot 30 \rightarrow Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 489,6 \text{ kWh/mês} \quad (18)$$

Desta forma, a porcentagem de ganho de potência pelo sistema de arrefecimento foi calculada, por parâmetros obtidos logo em seguida à adição de água na bandeja que estava sob o painel cuja temperatura estava relativamente alta. Sabe-se que ao longo do dia, a transferência de calor da placa para água vai sendo estabilizada e consequentemente a eficiência de geração vai reduzindo novamente. Portanto, o sistema de arrefecimento conta com um algoritmo de controle de circulação de água ao longo do dia em que, a água aquecida sob os painéis fotovoltaicos é substituída pelo bombeamento da água da bandeja para o boiler. De modo a considerar uma eficiência reduzida por conta da perda de capacidade de resfriamento que a água vai sofrendo ao longo do dia, admite-se que a porcentagem de geração deixe de ser 17,4% e se torne em média 10% no dia, assim, o cálculo para este rendimento se dá por:

$$Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 13,9 \cdot 10^3 \cdot 1,10 \rightarrow Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 15,29 \text{ kWh/dia} \quad (18)$$

$$Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 15,29 \cdot 10^3 \cdot 30 \rightarrow Energia_{3,2 \text{ kWp}} = 458,7 \text{ kWh/mês} \quad (19)$$

Portanto, a partir dos cálculos da energia gerada mensalmente para o caso do painel submetido ao sistema de arrefecimento de eficiência de 117,4% e 110% quando comparado à geração de 100% — equação (16) —, tem-se que o sistema de 3,2 kWp alcançará um ganho

de potência mensal de 72,6 kWh para 117,4% de eficiência e 41,7 kWh para 110% de eficiência. Levando em consideração o preço do kWh de R\$ 0,83/kWh a economia mensal gerada pela eficiência do arrefecimento se dá por cerca de R\$ 60,26/mês para 117,4% de eficiência e R\$ 34,61/mês para 110% de eficiência.

Isto posto, utilizando apenas a eficiência de 110% (pior caso), o valor anual de economia gerada pela utilização do sistema de arrefecimento será de R\$ 415,32 (estima-se este valor sem levar em consideração a economia indireta proporcionada pela redução do uso do chuveiro elétrico, isto é, sem utilizar o aproveitamento da água do boiler aquecida). Levando em conta o valor de aquisição do sistema de arrefecimento para a microgeração de 3,2 kWp, desconsiderando os custos adicionais de implantação, ou seja, apenas os R\$ 820,00 de material, tem-se que o *payback* calculado se dá em aproximadamente um ano e 11 meses. Porém, atribuindo o custo geral de implantação como sendo o custo dos dois sistemas, ou seja, limpeza e arrefecimento menos o custo do sistema de limpeza tem-se o valor de R\$ 2.979,00; e para este custo o *payback* se dá em sete anos e dois meses.

Por fim, fazendo o cálculo de instalação dos dois sistemas juntos, tem-se que a economia mensal do sistema de limpeza se deu por R\$ 466,20 e do sistema de arrefecimento de R\$ 415,32. Com isso, o montante de economia anual dos sistemas é de R\$ 881,52, e assim, o valor dos dois sistemas como mencionado no início da presente seção é de R\$ 4.000,00 resultando em um *payback* de ambos sistemas de quatro anos e aproximadamente seis meses.

Uma observação importante é que os percentuais de melhoria alcançados com o arrefecimento foram obtidos com o protótipo em pequena escala cuja bandeja foi projetada para ocupar metade da área correspondente à superfície dos painéis para fins comparativos a partir da imagem térmica. Como no sistema real a bandeja irá ocupar toda a área das células fotovoltaicas, é possível que a melhoria obtida seja o dobro, resultando em metade do tempo de retorno calculado.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a comodidade que os sistemas propostos de limpeza e arrefecimento trazem aos usuários de energia solar fotovoltaica, obter um sistema economicamente viável e que tenha uma confiabilidade para necessitar de uma frequência de manutenção mínima possível, foi desafiador. Além do estudo do funcionamento de um sistema fotovoltaico, das condições climáticas que interferem no seu rendimento, a implementação do protótipo de automação controlada por um algoritmo ajustável (data e horário) abrangeu várias áreas, inclusive partes mecânicas. Como a maioria dos elementos mecânicos não são encontrados prontos no mercado, a contratação de serviços terceiros como tornearia e serralheria se fizeram necessários. Em resumo, alguns fatores que implicaram em demanda de tempo e verba foram: a adaptação feita no motor da engrenagem da cremalheira, estrutura de fixação do brucutu, dobra da chapa de alumínio para fabricação da bandeja, entre outros.

Além disso, uma falta de atenção na instalação do sistema de arrefecimento resultou em danos à placa fotovoltaica, sendo necessária sua substituição. As possíveis causas do incidente são o choque térmico do contato da água no módulo com temperatura mais alta, aliado à pressão que a água causou na face inferior do painel. Para solucionar o problema, foi instalado um “suspiro” na parte superior da bandeja para que o ar aprisionado pudesse escapar enquanto a água preenche o interior da bandeja. Uma das maiores dificuldades durante o desenvolvimento do trabalho foram a realização dos testes experimentais. Devido ao período do ano, a constância de chuvas e formação de nuvens dificultou a avaliação do protótipo em condições semelhantes em cada condição testada.

De forma geral, independentemente da maior eficiência que as placas fotovoltaicas passam a ter com o avanço da tecnologia, o projeto do presente trabalho sempre aumentará o rendimento de geração dos módulos, pois atua diretamente para amenizar fatores naturais. Além disso, como os usuários da energia solar fotovoltaica passarão ao menos 25 anos com o conjunto gerador após sua instalação (a depender da garantia de cada fabricante), a melhoria da eficiência do conjunto pelos sistemas propostos se torna viável desde que o *Payback* de aquisição dos mesmos seja menor que o tempo de garantia dos módulos. No caso analisado, o

Payback calculado para o conjunto de oito painéis da instalação dos sistemas de limpeza e arrefecimento se dá em quatro anos e seis meses.

Portanto, conclui-se que a instalação dos sistemas de limpeza e arrefecimento são viáveis economicamente aos usuários de conjuntos geradores solares de baixa potência. Além disso, uma frequência de rotina de limpeza dos módulos colabora também com a vida útil das placas fotovoltaicas por diminuir a probabilidade de aparecimento de manchas e fungos, consequentes da impregnação de poeira sobre as mesmas. Ainda sobre as vantagens, caso se opte pela contratação de um profissional que faça a limpeza de maneira mais frequente para melhoria de eficiência dos painéis, há também a problemática de poder haver o custo de trocas de telhas quebradas por consequência do deslocamento do profissional sobre elas. Porém, a contratação do profissional não deve ser descartada, sendo inclusive necessária a limpeza e acompanhamento de um profissional para manutenção do conjunto gerador, mas o sistema de limpeza proposto posterga a necessidade da manutenção humana de maior frequência.

Para trabalhos futuros, algumas melhorias a serem feitas foram observadas para tornar os sistemas de limpeza e arrefecimento mais viáveis. Dentre elas, identificou-se a possibilidade de se fazer o aproveitamento da água da limpeza para outros fins (após filtragem), como limpeza de áreas, regar plantas, entre outros; analisar a eficiência que um sistema similar ao proposto de limpeza, porém de menor custo e substituindo toda a parte mecânica por mangueiras com furos que farão o jateamento da água sobre os painéis.

É importante salientar que os cálculos de eficiência de ambos sistemas se deram em condições climáticas adversas, principalmente pelos fatores da baixa irradiância e da estação não ser característica ao de seca de Araguainha, portanto, para trabalhos futuros indica-se fazer as experimentações que sejam em cenários críticos similares ao de onde se farão a instalação dos sistemas. Também podem ser analisadas outras arquiteturas para o mecanismo de limpeza, como o deslocamento do braço de jato de água na horizontal, cobrindo toda a dimensão lateral do painel.

Ademais, de posse de mais dados experimentais referentes a diferentes épocas do ano é possível obter uma média para o desempenho do sistema e realizar um estudo de viabilidade econômica mais completo.

7. REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012.
- [2] Como Funciona o Painel Solar Fotovoltaico (Placas Fotovoltaicas). Portal Solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 21 nov. 2020.
- [3] Dados do Mercado de Energia Solar no Brasil. Portal Solar, 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em: 04 nov. 2020.
- [4] Datasheet ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V. Microchip. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2020.
- Energia Solar. Blog Solar Energia. Disponível em: <<http://solarenergiabrasil.blogspot.com/p/energia-solar.html>>. Acesso em: 05 dez. 2020.
- [5] FIGGIS, B.; PLAZA, D. M.; MIRZA, T. PV Soiling Rate Variation over Long Periods. Qatar Environment & Energy Research Institute, 2014. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/2015_pvmrw_02_figgis.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.
- [6] LOCKS, G. Análise de modelos de temperatura em módulos fotovoltaicos. 2019. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Centro de Araranguá, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/203259/TCC%20Engenharia%20de%20Energia%20Giovana%20Locks.pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2020.
- [7] Manual do usuário: kit gerador solar fotovoltaico. Komeco. Disponível em: <<http://www.komeco.com.br/modulosfotovoltaicos/wp-content/uploads/2019/03/MANUAL-FOTOVOLTAICO.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- [8] O clima do Brasil: Quando ir lá? Guia Viagem. Tradução de Dietrich Köster. Disponível em: <<https://www.guiaviagem.org/brasil-clima>>. Acesso em: 11 dez. 2020.

- [9] PEREIRA, E. B et al. Atlas brasileiro de energia solar. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2014.
- [10] Potencial Solar - SunData v 3.0. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 06 out. 2020.
- [11] Quantos Painéis Solares preciso para uma residência? Portal Solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/quantos-paineis-solares-preciso-para-residencia.html>>. Acesso em: 12 dez. 2020.
- [12] SILVA, R. C. da. Clima de Mato Grosso. InfoEscola. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/geografia/clima-de-mato-grosso/>>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- [13] SILVA, Y. L. de F. C. da. Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos com Rastreadores Solares para as Diferentes Regiões do Brasil. 2019. 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande – MS, 2019.
- [14] VILLALVA, M. G. Entendendo as curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos. Canal Solar, 2019. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/59-entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos>>. Acesso em: 27 nov. 2020.
- [15] VILLALVA, M. G. Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.
- [16] WEIMAR, N. D. Standard Test Conditions (STC): definition and problems. Sino Voltaics. Disponível em: <<https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- [17] POLON, L. Outono: quando começa e características desta estação. Estudo Kids, 2015. Disponível em: <<https://www.estudokids.com.br/outono-passagem-do-verao-para-o-inverno/>>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- [18] GUIMARÃES, G. Aprenda a realizar a manutenção de sistemas solares fotovoltaicos. SolarVolt Energia. Disponível em: <<https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/aprenda-a-realizar-a-manutencao-de-sistemas-solares-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 21 dez. 2020.
- [19] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO – CRESESB. Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica: radiação solar. 2008. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301>.

Acesso em: 22 dez. 2020.

[20] GIMENES, D. Mais competitiva, energia solar cresce, gera emprego e mira inclusão. Veja, 2020. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/economia/mais-competitiva-energia-solar-cresce-gera-emprego-e-mira-inclusao/>>. Acesso em: 23 dez. 2020.

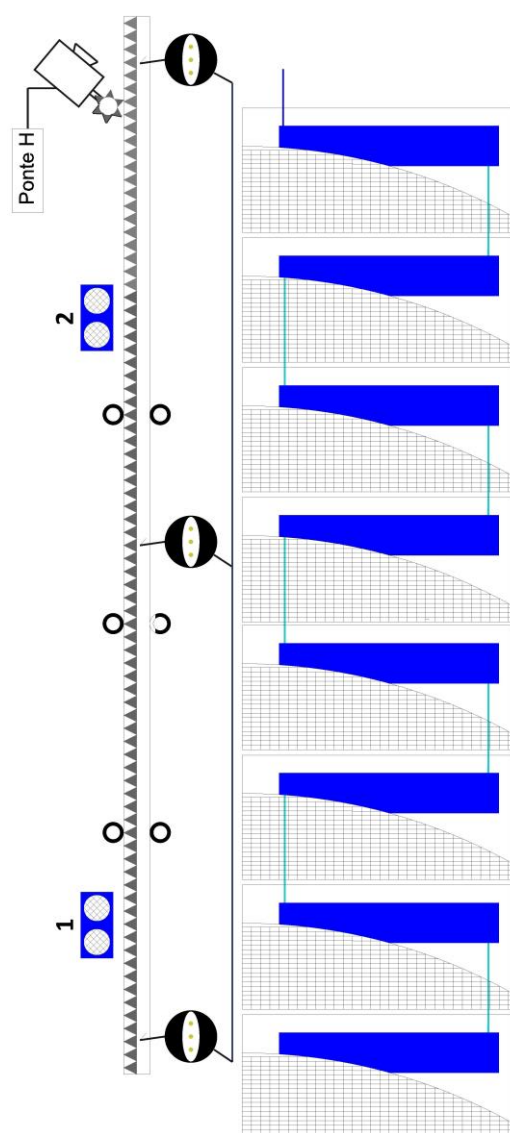
[21] ROCHA, V. R. da. Irradiância Solar no Topo da Atmosfera. Monolito Nimbus, 2019. Disponível em: <<https://www.monolitonimbus.com.br/irradiancia-solar-no-topo-da-atmosfera/>>. Acesso em: 24 dez. 2020.

[22] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída: sistema de compensação de energia elétrica.

[23] ANDREA, C. Q. Instrumentação Industrial: aula 1. 2020. 77 slides. Material apresentado para a disciplina de Instrumentação Industrial no curso de Engenharia Elétrica da UFMS.

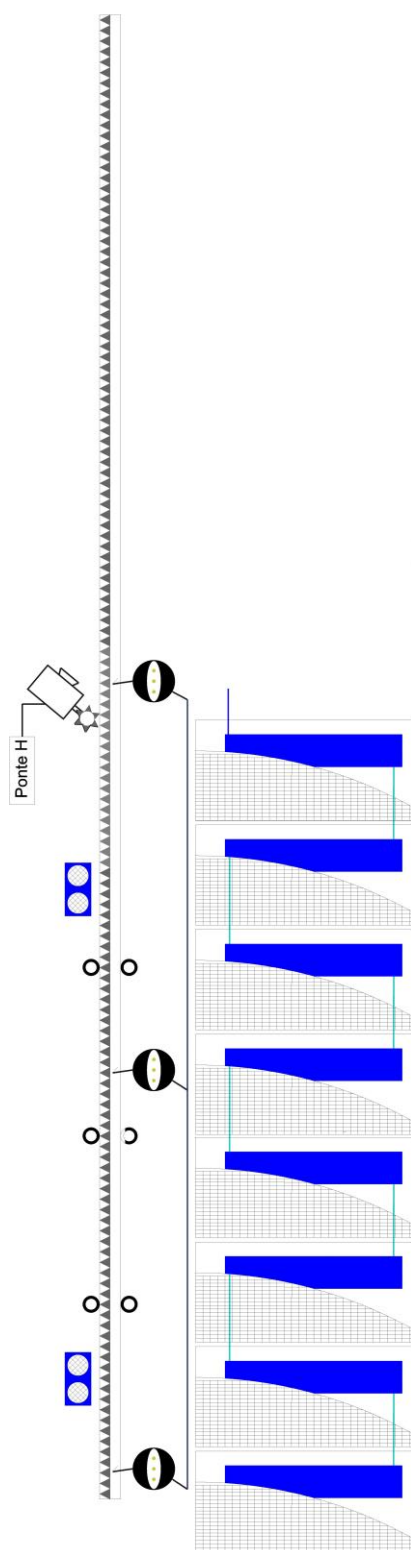
APÊNDICE - FIGURAS AUXILIARES

Anexo A – Funcionamento do sistema de limpeza seguindo o exemplo de portões residenciais



Fonte: Autor.

Anexo B – Sistema de limpeza seguindo o padrão de portões residenciais



Fonte: Autor.

Anexo C – Irradiação solar diária média mensal em Araguainha (kWh/m².dia)

Estação: Araguainha

Município: Araguainha, MT - BRASIL

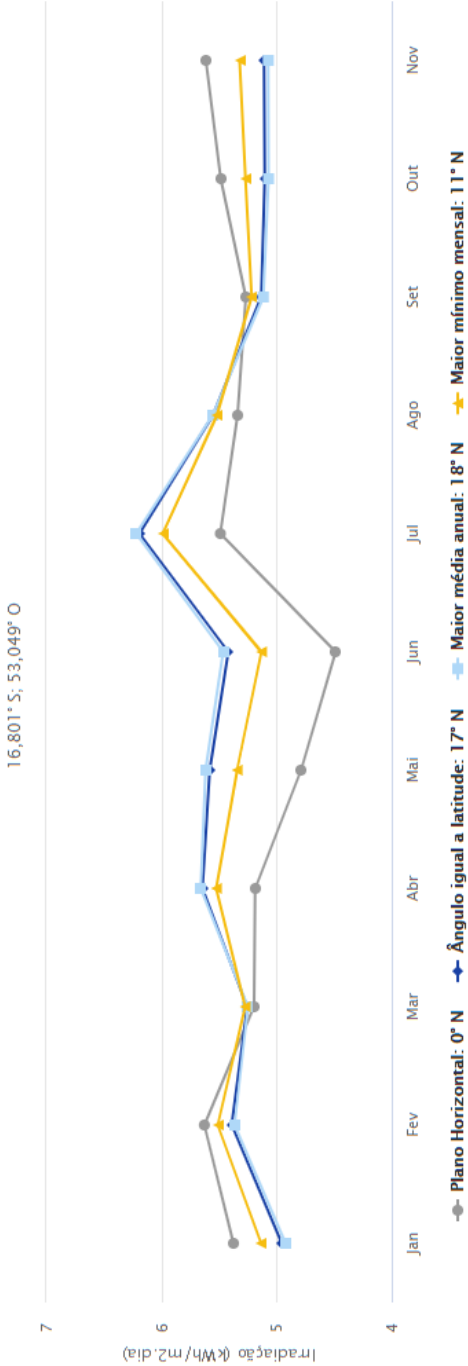
Latitude: 16,801° S

Longitude: 53,049° O

Distância do ponto de ref. (16,8567° S; 53,029916° O): 6,5 km

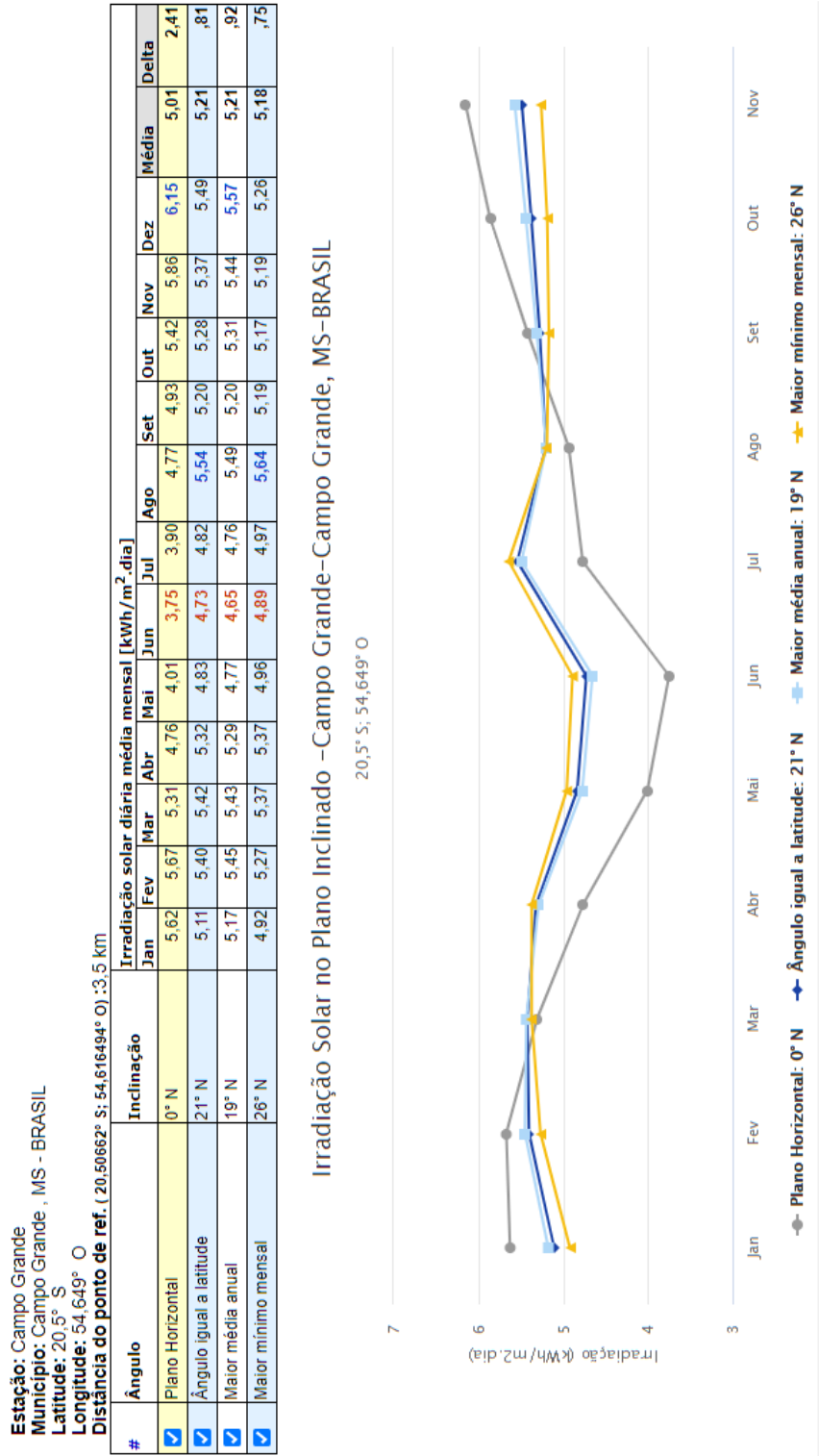
#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Plano Horizontal	0° N	5,37	5,63	5,20	5,19	4,79	4,49	4,59	5,49	5,34	5,27	5,49	5,61	5,20	1,14
✓	Ângulo igual a latitude	17° N	4,95	5,39	5,26	5,64	5,58	5,42	5,46	6,19	5,55	5,13	5,10	5,11	5,40	1,24
✓	Maior média anual	18° N	4,92	5,36	5,25	5,66	5,62	5,46	5,50	6,22	5,55	5,11	5,07	5,07	5,40	1,30
✓	Maior mínimo mensal	11° N	5,13	5,51	5,27	5,52	5,34	5,13	5,19	5,99	5,52	5,22	5,27	5,32	5,37	,86

Irradiação Solar no Plano Inclinado – Araguainha–Araguainha, MT–BRASIL



Fonte: [10].

Anexo D – Irradiação solar diária média mensal no Batlab (kWh/m².dia)



Fonte: [10].

Anexo E – Informações adicionais sobre o Arduino Mega

Características	
Microcontrolador	ATmega2560
Voltagem de alimentação	5V
Voltagem de entrada (recomendada)	7-12V
Voltagem de entrada (limites)	6-20V
Pinos digitais I/O	54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	16
Corrente contínua por pino I/O	40 mA
Corrente contínua para o pino 3.3V	50 mA
Memória Flash	256 KB of which 4 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade de Clock	16 MHz

Fonte: Multilógica Shop.

Anexo F – Informações adicionais sobre o painel do protótipo no Batlab

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Parâmetros elétricos para as condições padrões (STC)			
Módulo			JS 150
Tipo de módulo			YLxxxP-17b
Potência de saída	P_{max}	W	150
Tolerância potência saída	ΔP_{max}	W	+ / - 5
Eficiência módulo	η_m	%	15.0
Tensão em P_{max}	V_{mpp}	V	18.5
Corrente em P_{max}	I_{mpp}	A	8.12
Tensão em circuito aberto	V_{oc}	V	22.9
Corrente em curto-circuito	I_{sc}	A	8.61

STC: 1000 W / m2 irradiância, temperatura do módulo de 25 ° C, AM1.5 distribuição espectral de acordo com a norma EN 60904-3

Redução média de 5 % de eficiência relativa de 200 W / m2 de acordo com EN 60904-1

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Temperatura nominal da célula	NOCT	°C	46 + / - 2
Coeficiente de temperatura para P_{max}	γ	%/°C	-0.45
Coeficiente de temperatura para V_{oc}	β_{Voc}	%/°C	-0.37
Coeficiente de temperatura para I_{sc}	α_{Isc}	%/°C	0.06

Fonte: NeoSolar.