

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VINÍCIUS DALLA CORTE**

**ANÁLISE TÉRMICA DAS CÉLULAS DE UM MÓDULO  
FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA  
ÓPTICA PARA UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

**DISSERTAÇÃO**

**PATO BRANCO**

**2022**

**VINÍCIUS DALLA CORTE**

**ANÁLISE TÉRMICA DAS CÉLULAS DE UM MÓDULO  
FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA  
ÓPTICA PARA UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

**THERMAL ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC MODULE CELLS  
USING BRAGG GRATINGS SENSORS IN OPTICAL FIBER FOR A  
WATER PUMPING SYSTEM**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ivo de Lourenço Junior

**PATO BRANCO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Pato Branco**



VINICIUS DALLA CORTE

**ANÁLISE TÉRMICA DAS CÉLULAS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA PARA UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Sistemas E Processamento De Energia.

Data de aprovação: 30 de Setembro de 2022

Dr. Fabricio Hoff Dupont, Doutorado - Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó)

Dr. Kleiton De Moraes Sousa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Uilian Jose Dreyer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/09/2022.

Dedico este trabalho aos meus avós que hoje moram no céu.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado sempre em busca de meus objetivos e à minha família por me apoiar sempre em meus estudos.

Agradeço de coração ao meu colega de grande trajetória e orientador Prof. Dr. Ivo de Lourenço Junior por todas as orientações, em uma caminhada que se iniciou desde a iniciação científica, graduação e agora neste trabalho de mestrado.

Ao colega Edson Antonio Santolin por ter me auxiliado nas pesquisas e estudos.

Aos colegas da Universidade Célio Antônio Degaraes e Luiz Fernando Puttow Southier pela ajuda durante o trabalho realizado.

## RESUMO

DALLA CORTE, Vinícius. **Análise térmica das células de um módulo fotovoltaico utilizando redes de Bragg em fibra óptica para um sistema de bombeamento de água.** 2022. 82. f. Trabalho Individual – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o uso de sensores à fibra óptica, baseados em redes de Bragg para o monitoramento e análise do comportamento térmico das células de um módulo fotovoltaico, utilizado para verificar a temperatura de algumas células durante o início e fim do processo operação de um sistema de bombeamento de água. O sistema foi utilizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco. Foram utilizados dezesseis sensores de redes de Bragg à fibra óptica (Fiber Bragg Gratings - FBGs) dispostos na face frontal do módulo, permitindo o monitoramento da temperatura de dezesseis células durante o funcionamento do sistema de bombeamento d'água. As células fotovoltaicas que compõe um módulo são peças chaves para a geração de energia e para um bom funcionamento do mesmo, acarretando em uma vida útil prolongada caso este seja conectado a um sistema de bombeamento de água por exemplo. Atualmente o monitoramento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água apresentam limitações em relação ao monitoramento da temperatura das células ao longo do tempo, como por exemplo sujeiras, trincas e fissuras ou pontos quentes. O uso dos sensores FBGs pretende auxiliar em estudos e pesquisas onde se deseja monitorar a temperatura das células do painel fotovoltaico, através da utilização de uma energia limpa e renovável, sendo a energia fotovoltaica. Pelo fato dos sensores FBGs serem inscritos em um segmento de fibra monomodo, apresentam particularidades de tamanho e peso reduzidos, acarretando em não sombreamento sobre o módulo, sendo possível estudar o impacto das variações térmicas ocasionadas pelos fatores ambientais e elétricos no sistema de bombeamento de água e com isso verificar o seu desempenho e possíveis potencialidades de sua utilização, como o estudo do início e fim da operação do bombeamento de água. O sistema é composto por dezesseis sensores FBGs, sendo feita a ligação da bomba de água diretamente ao módulo fotovoltaico.

**Palavras-chave:** Módulo fotovoltaico, Redes de Bragg, Sensores à fibra óptica, Monitoramento térmico.

## ABSTRACT

DALLA CORTE, Vinícius. **Thermal analysis of photovoltaic module cells using Bragg gratings sensors in optical fiber for a water pumping system.** 2022. 82 f. Individual Work - Post-Graduation Program on Electrical Engineering (PPGEE), Federal Technological University of Parana (UTFPR). Pato Branco, 2022.

The present study aims at presenting the use of fiber optic sensors, based in Bragg gratings for monitoring and analyzing the thermal behavior of the cells of a photovoltaic module, used to verify the temperature of some cells during the beginning and the end of the process operation of a water pumping system. The system was implemented at Federal University of Technology - Paraná – UTFPR – campus of Pato Branco. Sixteen Fiber Bragg Gratings (FBGs) were used, placed at the front surface of the module, allowing the temperature monitoring of sixteen cells during the operation of the water pumping system. The photovoltaic cells which compose a module are key factors for power generation as well as for the good functioning of the same, resulting in a prolonged lifespan if connected to a water pumping system, for instance. The monitoring of photovoltaic water pumping systems currently presents limitations, such as dirt, cracks and fissures or hot spots, in relation to the monitoring of the cells temperature over time. The use of FBGs sensors intends to assist in studies and research aimed at monitoring the cells temperature of a photovoltaic panel, through the use of clean and renewable energy, that is to say, the photovoltaic. Due to the fact that FGB sensors are inscribed on a single-mode fiber segment, they have reduced size and weight, resulting in no shading over the module, what enables the study of thermal variations impact caused by environmental and electrical factors on the water pumping system and thereby the verification of its performance and possible usage potentialities, such as the study of the beginning and the end of the water pumping operation. The system is composed of sixteen FGB sensors, with the water pump directly connected to the photovoltaic module.

**Keywords:** Photovoltaic module, Bragg gratings, Fiber optic sensors, thermal monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível .....	20
Figura 2 – Ilustração da radiação global, soma das radiações direta e difusa .....	21
Figura 3 – Piranômetro SR20.....	21
Figura 4 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico, irradiância constante a 1000 W/m <sup>2</sup> .....	22
Figura 5 – Influência da intensidade da irradiância solar na operação de um módulo fotovoltaico em temperatura constante de 25° C.....	23
Figura 6 – Perfil de irradiância solar ao longo de um dia .....	24
Figura 7 – Composição de módulos fotovoltaicos .....	25
Figura 8 – Componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino.....	26
Figura 9 – Tipos de sistemas fotovoltaicos .....	29
Figura 10 – Exemplo de um sistema isolado ( <i>off-grid</i> ).....	30
Figura 11 – Exemplo de um sistema de bombeamento de água com energia solar <i>off-grid</i>	31
Figura 12 – Exemplo de um sistema conectado à rede ( <i>on-grid</i> ).....	32
Figura 13 – Níveis de seleção do tipo de bomba para diferentes alturas e vazões.....	35
Figura 14 – Visão geral de um feixe de luz que incide em um cordão de fibra óptica e seus componentes.....	36
Figura 15 – Modelo de uma FBG, modulação local e periódica do índice de refração em relação ao núcleo da fibra.....	38
Figura 16 – Ilustração de um possível espectro de reflexão de uma rede de Bragg uniforme .....	39
Figura 17 – Técnica de encapsulamento para os sensores FBGs .....	43
Figura 18 – Fibra óptica após a técnica de encapsulamento ser empregada .....	43
Figura 19 – Sistema utilizado para caracterização de fibras ópticas com circulador térmico .....	45
Figura 20 – Regressão linear para o sensor 4 do cordão 2 (S4_C2) .....	47
Figura 21 – Montagem do sistema de aquisição de grandezas climáticas (a) e (b) de dados da fibra óptica dos sensores FBGs .....	48
Figura 22 - Bomba Shurflo 8000-443-136 Solar 12V.....	49
Figura 23 – Estação de dados meteorológicos do câmpus UTFPR de Pato Branco - EPESOL .....	50



Figura 24 – Módulo fotovoltaico instalado .....	52
Figura 25 - Disposição dos 16 sensores FBGs na (a) face frontal do módulo e da caixa de saída de terminais (b) face de trás do módulo .....	52
Figura 26 - Representação de corte na secção transversal por meio da técnica de fixação do cordão de fibra óptica.....	53
Figura 27 – Sensor fixado na superfície frontal do módulo fotovoltaico.....	53
Figura 28 - Montagem do sistema de bombeamento de água utilizando uma fonte.....	55
Figura 29 - Montagem do sistema de bombeamento de água utilizando o módulo fotovoltaico .....	56
Figura 30 – Ilustração dos diferentes pontos utilizados com a caixa d'água e com diferentes declives.....	57
Figura 31 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 22 outubro de 2020 .....	58
Figura 32 – Tempo e potência instantânea para a bomba preencher o volume fixo de 13 litros para um dia ensolarado.....	59
Figura 33 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 25 outubro de 2020 .....	60
Figura 34 – Tempo e potência instantânea para a bomba preencher o volume fixo de 13 litros para um dia parcialmente nublado.....	61
Figura 35 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 02 de novembro de 2020.....	64
Figura 36 – Potência instantânea e irradiância solar no início de operação do sistema de bombeamento de água.....	65
Figura 37 – Temperatura dos sensores FBGs no início de operação do sistema de bombeamento de água.....	65
Figura 38 – Influência da intensidade da irradiância solar nas FBGs .....	67
Figura 39 – Potência instantânea e irradiância solar no fim de operação do sistema de bombeamento de água.....	68
Figura 40 – Temperatura dos sensores FBGs no fim de operação do sistema de bombeamento de água.....	68
Figura 41 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 05 de novembro de 2020.....	69

Figura 42 – Potência instantânea e irradiância solar no início de operação do sistema de bombeamento de água.....	70
Figura 43 – Temperatura dos sensores FBGs no início de operação do sistema de bombeamento de água.....	71
Figura 44 – Potência instantânea e irradiância solar no final da operação do sistema de bombeamento de água.....	72
Figura 45 – Temperatura dos sensores FBGs no fim de operação do sistema de bombeamento de água.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potência anual médio de energia solar, segundo unidade padrão da ABNT.....	23
Tabela 2 – Valores de comprimento de onda apresentados para o cordão 1 com sete sensores .....	45
Tabela 3 – Valores de comprimento de onda apresentados para o cordão 2 com quatro sensores .....	46
Tabela 4 – Valores de comprimento de onda apresentados para o cordão 3 com cinco sensores .....	46
Tabela 5 – Principais parâmetros bomba modelo Shurflo 8000-443-136.....	48
Tabela 6 – Especificações elétricas do módulo fotovoltaico utilizado de modelo KC85TS. Desempenho elétrico sob condições de teste de 1000 W/m <sup>2</sup> e temperatura de 25 °C.....	51
Tabela 7 – Parâmetros do teste realizado com a bomba d’água.....	54
Tabela 8 – Desempenho do sistema de bombeamento de água em um dia ensolarado .....	57
Tabela 9 – Desempenho do sistema de bombeamento de água em um dia parcialmente nublado.....	60
Tabela 10 – Valores de temperatura medidos pelos sensores FBGs .....	62
Tabela 11 – Valores de temperatura medidos pela Câmera IR .....	63
Tabela 12 – Condições ambientais observadas durante a realização do experimento I com sensores FBGs .....	66
Tabela 13 – Condições ambientais observadas durante a realização do experimento II com sensores FBGs .....	70

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
FBGs	Fiber Bragg Gratings (Redes de Bragg em Fibra)
STC	Standart Test Conditions (Condições de Teste Padrão).
AM	Air Mass (Massa de ar).
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature (Temperatura Nominal de Operação da Célula).
EMI	Eletromagnetic Interference (Interferência Eletromagnética).
C <sub>x</sub> _S <sub>y</sub>	Cordão de fibra (x), elemento sensor (y).
GD	Geração Distribuída
IR	Infravermelho.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda_B$	Comprimento de onda de Bragg, [nm]
$\xi$	Coefficiente termo-óptico, [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$\Lambda$	Período espacial da rede de Bragg, [nm]
$\eta_{eff}$	Índice de refração efetivo do núcleo, [adimensional]
$\Delta\lambda_B$	Varição do comprimento de onda de Bragg, [nm]
$\alpha$	Coefficiente de expansão térmica da sílica, [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$\Delta T$	Varição da temperatura, [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\nu$	Coefficiente de Poisson, [adimensional]
$\Delta L$	Varição da deformação mecânica, [nm]
$I$	Corrente, [A]
$P$	Potência, [W]
$V$	Tensão, [V]
$P_m$	Potência máxima, [W]
TWh	Terawatt-hora, [TWh]
$A_{mf}$	Área de um módulo fotovoltaico, [ $\text{m}^2$ ]
$R_s$	Intensidade da irradiância solar, [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto, [V]
$\eta$	Eficiência, [%]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>RADIAÇÃO SOLAR .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>ENERGIA SOLAR .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>24</b>
2.3.1	EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	27
2.3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	28
<b>2.4</b>	<b>SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA.....</b>	<b>34</b>
<b>2.5</b>	<b>FIBRAS ÓPTICAS .....</b>	<b>36</b>
<b>2.6</b>	<b>REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA.....</b>	<b>37</b>
2.6.1	REDES DE BRAGG ATUANDO COMO ELEMENTO SENSOR .....	39
2.6.2	TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO PARA OS SENSORES FBGs .....	42
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>44</b>
3.1	MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS .....	44
<b>3.2</b>	<b>SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3</b>	<b>BOMBA SHURFLO .....</b>	<b>48</b>
<b>3.4</b>	<b>SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS DA UTFPR .....</b>	<b>50</b>
<b>3.5</b>	<b>MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>54</b>
4.1	TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA .....	54
4.2	TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA E MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	55
5.1	TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA E MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM UM DIA ENSOLARADO .....	62
5.2	TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA E MÓDULO FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM UM DIA PARCIALMENTE NUBLADO .	69
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento social e econômico do ser humano está intrinsecamente ligado à disponibilidade de água e à qualidade da mesma que é entregue as pessoas que convivem no planeta Terra. De acordo com o último relatório da UNICEF (Fundo Internacional de Emergência das Nações Unidas para a Infância) e da Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 2,2 bilhões de pessoas não têm serviços de água potável gerenciados de forma segura, 4,2 bilhões não têm serviços de esgotamento sanitário e 3 bilhões não possuem instalações básicas para a higienização das mãos (UNICEF, 2019). O relatório da UNICEF e da OMS apresenta também outra situação preocupante, onde uma em cada 10 pessoas (785 milhões) ainda carece de serviços básicos, incluindo as 144 milhões que bebem água sem tratamento. Os dados da ONU (Organização das Nações Unidas) mostram que oito em cada dez pessoas que vivem em áreas rurais não têm acesso aos serviços de água potável e saneamento básico. Além do setor agrícola, responsável por cerca de 70% das captações de água em todo o mundo, um aumento da demanda de água é previsto tanto para a indústria e produção de energia (ONU, 2017).

Juntamente com a utilização e acesso à água, têm-se outra demanda mundial crescente: a energia elétrica. No Brasil, diversas comunidades ainda estão a quilômetros de distância das linhas de transmissão e conseqüentemente não têm eletricidade em suas propriedades (IEA, 2021). Em relação ao acesso à energia elétrica, de acordo com o *IEA (International Energy Agency)* estima-se que 1,2 bilhão de pessoas não têm eletricidade em suas casas e 38% da população mundial coloca em risco a sua saúde ao utilizar meios poluentes para cozinhar (IEA, 2015). A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em seu Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2017) estima que o consumo de energia elétrica residencial do Brasil crescerá 1,8% ao ano no período entre 2016 e 2026. Por esse motivo, torna-se necessário buscar soluções energéticas eficazes para aumentar a cada ano a parcela da população com acesso à eletricidade. Dentre as formas de geração de energia existentes, observa-se como uma possível solução a tecnologia da energia solar fotovoltaica, principalmente por ser uma fonte de energia renovável, inesgotável e não poluente (VILLALVA, 2015). Um mapeamento divulgado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) apontou que 96,5% dos municípios paranaenses já possuem algum sistema de energia solar fotovoltaica. No total são 18.509 conexões em 385 cidades, atingindo 19.048 consumidores (ABSOLAR, 2021).

Fatores antigamente ignorados, como por exemplo, impactos ambientais e crises energéticas motivam a difusão dos sistemas fotovoltaicos e de aplicações decorrentes que fazem o uso da energia solar (CARVALHO, 2016). A ANEEL estima que, até o ano de 2024, mais de 1 milhão de consumidores devem passar a gerar a própria energia (ANEEL, 2019). Segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (*Internacional Renewable Energy Agency*), a energia solar é a fonte renovável que mais gera empregos no planeta, sendo responsável por mais de um terço dos mais de 11 milhões de empregos vindos de fontes renováveis no mundo (IEA, 2021). Uma de suas vantagens é a possibilidade de utilizar o sistema fotovoltaico sem a conexão com a rede elétrica convencional. Esta tecnologia proveniente do Sol é considerada uma fonte de energia limpa, pois em comparação com os combustíveis fósseis apresentam reduzidos impactos ambientais e evitam a emissão de poluentes, necessitam de manutenção mínima além de ser muito útil em lugares remotos de difícil acesso (VILLALVA, 2015). Desta maneira, com uma diversificação da matriz energética é possível diminuir barreiras e levar cada vez mais energia elétrica para a população em geral (IEA, 2021).

No ano de 2012 foi aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a minuta da resolução normativa nº 482 que permite a microgeração e a minigeração de energia elétrica incluindo fontes renováveis e alternativas a partir de sistemas de geração distribuída conectadas às redes elétricas de baixa tensão. A publicação foi um marco histórico no Brasil, beneficiando a população e obrigando as concessionárias de energia elétrica a aderirem à entrada de sistema de geração distribuída, dentre elas a energia solar fotovoltaica, nas redes de distribuição de baixa tensão. Assim, cada cidadão brasileiro ou empresa poderá ter em seu telhado uma usina fotovoltaica, produzindo eletricidade para o consumo próprio ou para abater os créditos provenientes do sistema de geração em mais de uma unidade consumidora (ANEEL, 2019). Além de aumentar a acessibilidade de eletricidade e dos benefícios ambientais do uso de fontes renováveis, a inserção da energia solar fotovoltaica no país impulsiona o desenvolvimento tecnológico, geração de empregos e movimentação da economia interna do país (VILLALVA, 2015).

Diferentemente das aplicações de energia solar fotovoltaica conectadas à rede *on-grid*, os sistemas *off-grid* caracterizam-se por dispensarem o uso das linhas de transmissão e utilizam-se do armazenamento de energia elétrica por meio do uso de baterias ou estocando a água em reservatórios, para ser utilizada em momentos que não houver produção. Uma de suas principais aplicações desta tecnologia são os sistemas de irrigação e de bombeamento



de água. Especialmente em regiões áridas e semiáridas sem o fornecimento de energia elétrica e que necessitam do fornecimento de água, o sistema fotovoltaico *off-grid* torna-se uma alternativa viável (Vick e Neal, 2012).

Dentre os principais problemas nos sistemas fotovoltaicos estão as microfissuras causadas por estresse mecânico e a degradação induzida por potencial (PID, *Potential Induced Degradation*) provocado pela exposição dos módulos a altos potenciais durante a operação (Pingel et al., 2010). Outras particularidades destes sistemas é o fato de sombreamentos indesejáveis reduzirem em até 40% a capacidade de geração de um módulo fotovoltaico (PINHO E GALDINO, 2014). Superaquecimento em células ou defeitos elétricos também prejudicam a geração de energia e conseqüentemente o desempenho do sistema fotovoltaico inteiro. Estes defeitos podem ser minimizados ou evitados em módulos e sistemas fotovoltaicos caso haja um sistema de monitoramento eficaz e contínuo em tempo real (VILLALVA, 2015).

Na literatura trabalhos baseados em termografia infravermelha (IRT, *Infrared Thermography*) estudam a aplicabilidade para resolução de defeitos elétricos em células (Jahn Ulrike et al, 2018). Câmeras de baixo custo mostram-se promissoras para estudos de defeitos em módulos fotovoltaicos (C. Bedin et al., 2018; MATOS, 2020). Embora estas técnicas tenham um bom desempenho, apresentam limitações em locais de difícil acesso e possuem limitações (em dias de chuvas e mau tempo) à certos períodos climáticos. Além disso, pelo fato de apresentar a necessidade de inspeção manual, essas técnicas dificultam sua empregabilidade em sistemas fotovoltaicos com vários módulos FVs, sendo necessário dias ou meses até uma inspeção ideal completa.

Tendo em vista estes problemas, este trabalho tem como objetivo principal propor uma técnica aplicada a um sistema solar de bombeamento de água que apresenta a potencialidade de sistemas sensores FBGs utilizado para a medição de temperatura em células de um módulo fotovoltaico.

Os sensores de fibra óptica de redes de Bragg (FBGs) atuam na medição de temperatura e deformação mecânica. Seu princípio de funcionamento se dá quando um feixe de luz de banda larga é lançada no interior do núcleo da fibra, devido a modulação de índice de refração há reflexão de parte deste feixe. Este feixe refletido possui um pico de ressonância denominado comprimento de onda de Bragg. Devido a variações de temperatura e deformações na fibra este feixe sofre mudanças que podem ser correlacionadas com as alterações de temperatura e deformações mecânicas. Uma de suas principais vantagens é a

capacidade de multiplexagem, ou seja, múltiplos sensores podem ser colocados em série um cordão de fibra óptica permitindo neste trabalho analisar diferentes células do módulo e fazer correlações com o comportamento de uma bomba de água em diferentes períodos de teste (HBM, 2021).

As redes de Bragg apresentam grande contribuição neste trabalho possibilitando o monitoramento da temperatura nas células do módulo em larga escala de tempo, objetivando verificar a relação entre o aquecimento no módulo e a capacidade de geração de energia (consequentemente a capacidade de bombeamento de água) além de outros benefícios decorrentes desta fonte renovável de energia, sua utilização na agricultura e outras aplicações.

O trabalho visa o estudo de um sistema de bombeamento de água acionado por um módulo fotovoltaico de forma direta, sem a utilização de inversores (CC – CA) e/ou banco de baterias para o armazenamento de energia, avaliando o desempenho da bomba de água em diferentes horários do dia, além do monitoramento do início e fim da operação do sistema, através da temperatura das células correlacionadas com medidas de grandezas climáticas.

## 1.1 OBJETIVOS

Apresentar um sistema de bombeamento de água por meio da energia solar fotovoltaica, utilizando sensores de temperatura à fibra óptica baseados em redes de Bragg para o monitoramento térmico de um módulo fotovoltaico. Por meio do mapeamento térmico do módulo verificar a temperatura de início e fim de operação do sistema em diferentes perfis de irradiância solar e o impacto destes gradientes de temperatura na eficiência do bombeamento de água.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Além do objetivo principal, este trabalho tem como objetivos específicos:

- Encapsular sensores FBGs para monitorar a temperatura em um módulo fotovoltaico, de modo que algumas células sejam monitoradas;
- Realizar a calibração das FBGs.;
- Medição de temperatura de células de um módulo FV utilizando FBGs;

- Verificar o comportamento de um sistema de bombeamento de água, composto por: sensores FBGs, módulo fotovoltaico, bomba de água e tanque de armazenamento de água.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão descritos alguns conceitos básicos referente à geração de energia, empregado neste trabalho a fim de transformar a energia solar em energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. Esses conceitos são de fundamental importância para uma melhor compreensão do princípio de funcionamento e das características do sistema fotovoltaico de bombeamento de água monitorado com as redes de Bragg.

### 2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O termo energia solar refere-se ao aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala humana de tempo, uma vez que o Sol fornece anualmente para a superfície terrestre cerca de  $885 \times 10^6$  TWh. O Sol possui alto potencial para gerar energia necessária ao desenvolvimento humano, onde além da luz visível possui diversos tipos de radiação, como a raios infravermelhos e raios ultravioletas que posteriormente são transformadas em outras formas de energia. Esta energia é utilizada em diferentes tecnologias, como por exemplo: termosolar, termoelétrica e energia solar fotovoltaica (IEA, 2010).

De acordo com a literatura em uma hora o Sol irradia sobre o planeta uma quantidade de energia superior ao consumo global de um ano inteiro. Esta por sua vez é uma energia renovável, não poluente e com a característica de ter abundante disponibilidade (DEMONT, 1998). A energia do Sol é propagada para o nosso planeta através do espaço em forma de radiação eletromagnética, formada de ondas que possuem frequências e comprimentos de ondas diferentes, conforme apresentado na Figura 1 (VILLALVA, 2015).

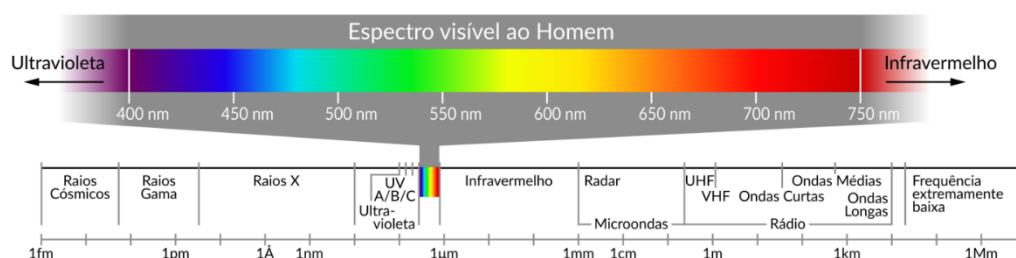


Figura 1 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível  
Fonte: Pereira (2017, p.13)

A radiação solar antes de chegar ao solo têm influência do ar atmosférico, de nuvens e da poluição. A Figura 2 representa como é composta a radiação global, que é a soma da radiação direta e da radiação difusa. A radiação difusa refere-se aos raios solares na atmosfera que advém da reflexão da luz na poeira, nuvens e também de outros objetos. A radiação direta condiz aos raios solares que incidem em linha reta sobre o plano horizontal com uma inclinação variável conforme o ângulo zenital do Sol (VILLALVA, 2015).

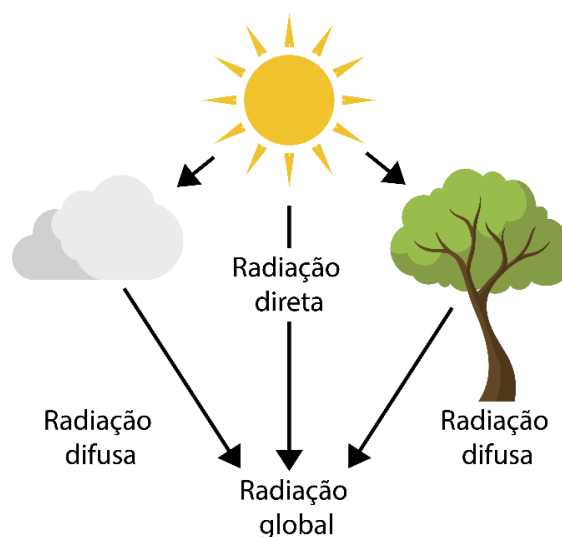


Figura 2 – Ilustração da radiação global, soma das radiações direta e difusa  
Fonte: Adaptado de Villalva (2015)

Por meio da utilização de um instrumento sensor denominado de piranômetro é possível medir a radiação global, uma vez que este fornece medidas de irradiância, que é a quantificação da potência recebida do Sol em uma determinada área de superfície plana. Este sensor recebe a luz de todas as direções e a absorve em um sensor de radiação solar instalado no seu interior (VILLALVA, 2015). Este instrumento é composto por uma redoma de vidro, ilustrado na Figura 3 por um modelo comercial SR20. O modelo utilizado na estação de pesquisa para este trabalho é semelhante e possui a mesma metodologia de funcionamento ao SR20.



Figura 3 – Piranômetro SR20  
Fonte: Adaptado de Villalva (2015)

## 2.2 ENERGIA SOLAR

Uma grandeza fundamental usada para quantificar a radiação solar é a irradiância, expressa na unidade de  $\text{W}/\text{m}^2$  (watt por metro quadrado) sendo uma unidade de potência por área. A grandeza física denominada potência expressa a energia que é transportada durante um intervalo de tempo, ou seja, quanto maior a potência da radiação solar mais energia é transportada em um período de tempo (VILLALVA, 2015).

De acordo com a literatura, na superfície terrestre a irradiância da luz solar é de aproximadamente  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ . Na distância média entre o sol e a terra, a irradiância é em torno de  $1353 \text{ W}/\text{m}^2$ . Na indústria fotovoltaica a irradiância adotada como padrão é de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ , sendo uma especificação para avaliação de células e módulos fotovoltaicos, uma vez que os fabricantes utilizam este valor com base em uma condição padrão de irradiância solar (VILLALVA, 2015). A norma IEC 61730 e IEC 61215 estabelece os critérios que os fabricantes de módulos fotovoltaicos devem atender para assegurar os padrões mínimos de segurança e qualidade necessários (RUTHER, 2004).

O módulo fotovoltaico sofre interferência direta de intempéries climáticas, como por exemplo a temperatura, que influencia na tensão e também na potência de operação dos terminais do módulo. Em temperaturas menores as tensões aumentam e quando o módulo opera em temperaturas elevadas as tensões são menores, conforme a Figura 4. É importante destacar que a corrente elétrica não varia de forma tão significativa com a temperatura (VILLALVA, 2015)

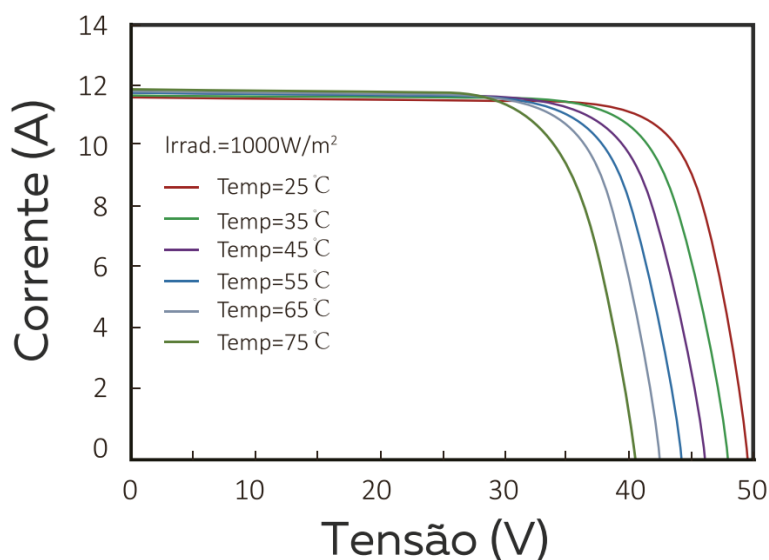


Figura 4 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico, irradiância constante a  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$   
Fonte: Adaptado de Villalva (2015)

A Figura 5 demonstra a curva característica I-V com o módulo em diferentes níveis de irradiância, com a temperatura constante em 25°C. O efeito do aumento da irradiância solar incidente em uma célula fotovoltaica demanda no aumento da corrente elétrica gerada, de modo que a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) aumenta de forma logarítmica, se mantida a temperatura constante. Esta curva encontra-se disponível na ficha técnica dos fabricantes e normalmente está relacionado com a temperatura ou com a irradiância solar.

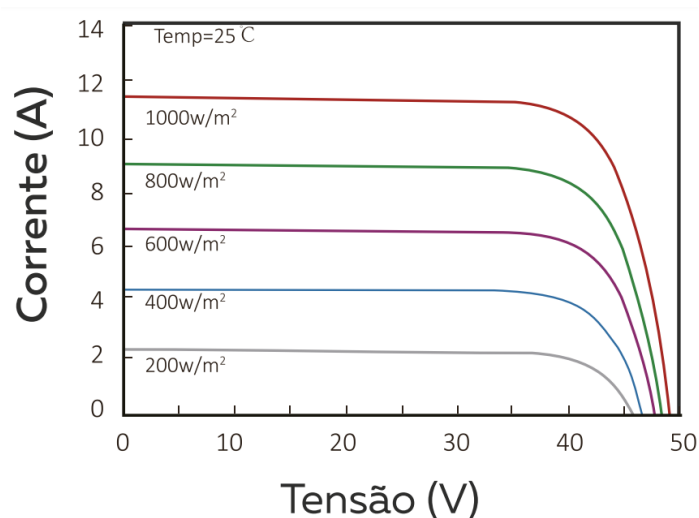


Figura 5 – Influência da intensidade da irradiância solar na operação de um módulo fotovoltaico em temperatura constante de 25° C

Fonte: Adaptado de Villalva (2015)

O Brasil é um país que possui potencial para utilizar a geração de energia elétrica a partir do Sol, uma vez que o país conta com um dos maiores índices de incidência solar do mundo. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o país recebe durante todo o ano mais de 3 mil horas de brilho do Sol, correspondendo a uma incidência solar diária que pode ir de 4.500 a 6.300 Wh/ $m^2$ . A região nordeste do Brasil é a que apresenta maior disponibilidade energética variando a irradiação solar entre 5.700 e 6.100 Wh/ $m^2$ , como apresenta a Tabela 1 (CRESESB, 2012).

Tabela 1– Potência anual médio de energia solar, segundo unidade padrão da ABNT

Região	Irradiação Global Média (kWh/ $m^2$ )
Nordeste	5,9
Centro-Oeste	5,7
Sudeste	5,6
Norte	5,5
Sul	5,0

Fonte: CRESESB (2012)

Através da utilização de sensores, como por exemplo o piranômetro e um sistema de armazenamento de dados é possível medir a irradiância em um certo local ao longo de um período, sendo possível calcular a quantidade de energia recebida do Sol por uma determinada área naquele dia, semana, mês e ano. Desta maneira, quantifica-se a energia diária recebida do Sol. Na Figura 6 apresenta-se o perfil ideal da irradiância diária ao longo do tempo em um dia ensolarado.

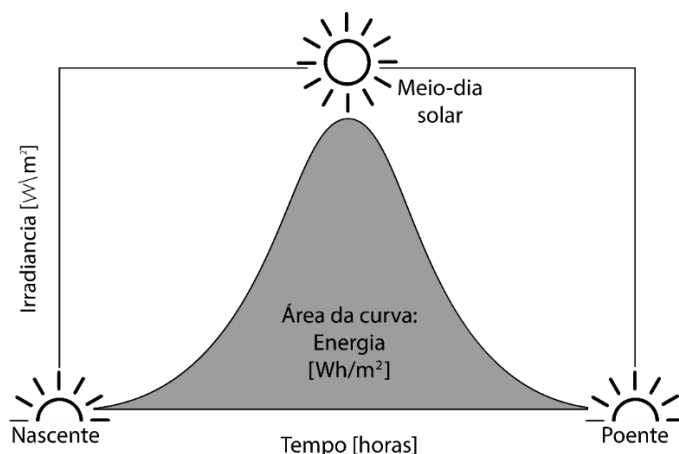


Figura 6 – Perfil de irradiância solar ao longo de um dia  
Fonte: Adaptado de Villalva (2015)

O aproveitamento da energia solar para o projeto (sistemas fotovoltaicos, coletores solares, dentre outros) só se torna viável após o levantamento de informações solarimétricas da região no qual o sistema será instalado. Uma vez conhecido o perfil da irradiância no local do sistema de geração solar é possível analisar a viabilidade do sistema, juntamente com outras variáveis que variam conforme a necessidade do cliente, modelo de sistema e perfil de projeto (VILLALVA, 2015). Atualmente *softwares* com licenças pagas (exemplos SolarEdge e Solergo) conseguem dimensionar sistemas fotovoltaicos conforme a realidade normativa e fiscal brasileira, permitindo analisar sombreamentos e possíveis ajustes para uma geração muito próxima à demanda de energia em que o cliente irá necessitar realmente (INTELBRAS, 2022).

### 2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Historicamente foi Edmond Becquerel no ano de 1839 que constatou a partir da absorção de luz uma célula eletroquímica que esta apresentava uma diferença de potencial (d.d.p.) em seus terminais, dando início ao que se chamou na época de efeito fotovoltaico (RUTHER, 2004).



Com o passar dos anos buscou-se cada vez mais utilizar-se de energias alternativas para suprir a crescente demanda de energia elétrica da humanidade. Uma possível solução para o uso de energias alternativas é a utilização da energia solar fotovoltaica. Este modelo de energia apresenta baixos índices de poluição ambiental, se comparado às fontes de energias mais utilizadas no Brasil concentradas em hidrelétricas e termelétricas. Outra vantagem é que os módulos fotovoltaicos podem ser instalados em áreas de difícil acesso onde fontes primárias (petróleo, gás natural, etc) tornam-se inviáveis de serem instaladas ou não possuem rede elétrica disponível neste local, utilizando-se de sistemas sem a conexão com a rede elétrica (RUTHER, 2004).

Em um sistema fotovoltaico os módulos normalmente são constituídos por células de silício, que convertem a luz do sol diretamente em eletricidade (efeito fotovoltaico). O número de células fotovoltaicas que compõem os módulos varia dependendo a necessidade de tensão e corrente da carga que irá alimentar. De modo geral, um módulo fotovoltaico é constituído de 33 até 72 células. A Figura 7 apresenta os três tipos de configurações de células fotovoltaicas.

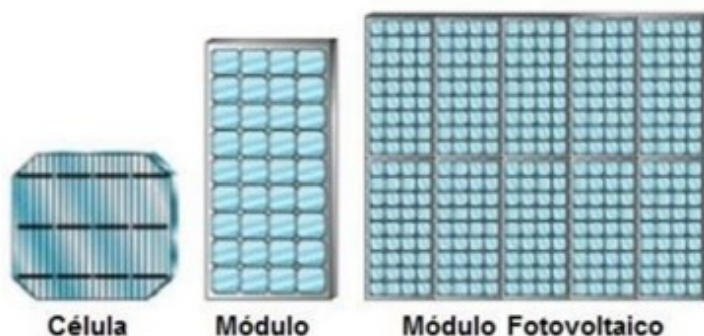


Figura 7 – Composição de módulos fotovoltaicos  
Fonte: Adaptado de Vicentin (2014)

Os módulos solares fotovoltaicos caracterizam-se por conter um conjunto de células solares que convertem a energia solar em energia elétrica. Para compor o módulo as células fotovoltaicas são interconectadas em série e/ou paralelo dependendo da tensão, corrente e potência desejados decorrentes do tipo de aplicação necessária, protegidas do exterior por uma estrutura composta basicamente por um vidro e uma estrutura rígida, demonstrada na Figura 8.

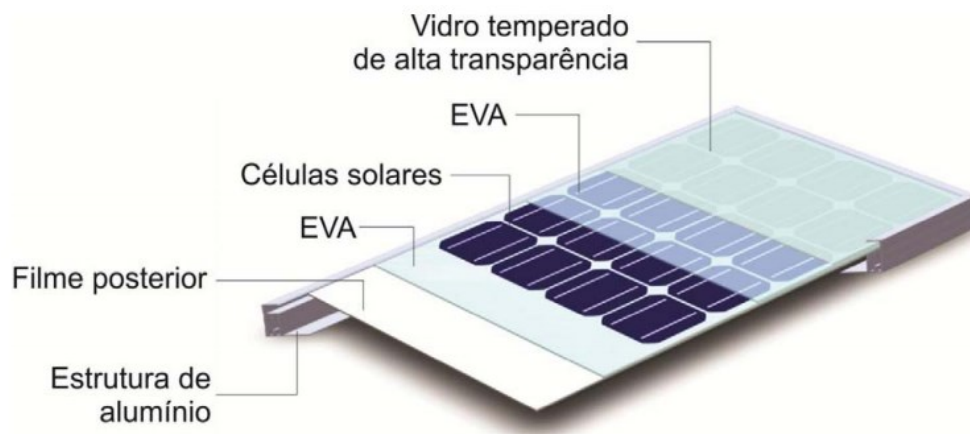


Figura 8 – Componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino

Fonte: Pinho e Galdino (2014, p.56)

As células fotovoltaicas são produzidas a partir de material semicondutor, a mais comumente utilizada de silício cristalino (c-Si). Devido as propriedades do silício as células são capazes de captar e transformar a irradiância solar em energia elétrica, porém estas fornecem aproximadamente 0,4 V no ponto de máxima potência e densidade de corrente da ordem de 30 mA/cm<sup>2</sup>, sendo necessário a associação de células para um nível de tensão e corrente desejados ao sistema (CRESESB, 2004).

Depois de instalado, diferentes parâmetros associados afetam direta ou indiretamente o rendimento do conjunto de módulos fotovoltaicos. O fator principal é a localização geográfica em que se encontram os módulos, uma vez que a irradiância incidente sobre o módulo é dependente desta orientação. Da mesma forma, há alguns elementos críticos que podem comprometer negativamente o desempenho gerado por este tipo de energia, como: sombreamento parcial, aquecimento excessivo da célula e até mesmo o estado de limpeza do módulo (RUTHER, 2004).

Outro fator a ser considerado é de que em um módulo fotovoltaico novo ou pouco utilizado, as células normalmente possuem características semelhantes em relação à conversão energética, ao aquecimento e ao resfriamento (TRINURUK et al., 2009, FUENTES et al., 2007). Com o passar do tempo, a eficiência inicialmente considerada uniforme entre as células sofre redução acentuada devido a influência dos ciclos de temperatura, deteriorando gradativamente as conexões, terminais, trilhas e as próprias células (HERRMANN, 2010).

### 2.3.1 EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Para ser possível avaliar a qualidade de um módulo fotovoltaico, é necessário analisar seu rendimento ou eficiência de conversão ( $\eta$ ), um parâmetro decisivo a ser levado em consideração durante a aquisição de um ou mais módulos. Porém, é de extrema importância que se analise este dentro de um contexto global, considerando outras variáveis do sistema em conjunto. A eficiência ( $\eta$ ) de um módulo define-se pela relação entre a quantidade de energia elétrica que é produzida no ponto de máxima potência ( $P_m$ ) expressa em W e a área do módulo fotovoltaico ( $A_{mf}$ ) em metros quadrados. A intensidade da irradiância solar ( $R_s$ ) corresponde a taxa padronizada de 1000 W/m<sup>2</sup> em STC, apresentado na Equação (1) (VILLALVA, 2015)

$$\eta = \frac{P_m}{A_{mf} \times R_s} \quad (1)$$

De acordo com a norma IEC 60904-3 é possível através do rendimento comparar diferentes tipos de módulos fotovoltaicos em Condições de Teste Padrão (STC - *Standart Test Conditions*), uma vez que estes são diretamente influenciados pela temperatura e níveis de irradiância solar (IEC, 1998). As dimensões dos módulos, quantidade de células e potência pode variar de acordo com cada fabricante. Geralmente os módulos de 72 células têm dimensões próximas a 1000 mm de largura e 1960 mm de comprimento e podem alcançar potências próximas a 590 W (INTELBRAS, 2021).

Pode-se classificar as células fotovoltaicas de acordo com seu processo de fabricação, em três tipos (CASTAÑEDA, 2011; INTELBRAS, 2021; ELGIN, 2021):

1. Silício Monocristalino: Sua eficiência de conversão é superior a 13%. Atualmente módulos compostos por este material podem atingir eficiência de até 22,5%.
2. Silício Policristalino: São células fabricadas a partir de blocos de silício puro em moldes especiais. Nesse processo formam-se estruturas policristalinas com separação dos cristais. Sua eficiência é um pouco inferior ao silício monocristalino.
3. Filmes finos: Seu processo de fabricação se dá por meio da deposição de finas camadas de materiais semicondutores, sob um substrato de custo baixo, como vidro, aço ou plástico. Sua eficiência é baixa e não ultrapassa 8%.

A eficiência apresentada pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos é medida em condições de laboratório, sendo os critérios padronizados pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) o qual atesta a classe de eficiência dos módulos para toda a indústria. Ao utilizar um conjunto fixo de condições, todos os módulos podem ser comparados e avaliados de forma mais precisa. São três as condições padrão de teste:

1. Temperatura da Célula: A temperatura da célula solar em si em 25°C, que é diferente da temperatura do ambiente (O módulo FV todo durante o teste deve estar em 25°C).
2. Irradiância solar: A medida de 1000 Watts por m<sup>2</sup>.
3. Massa de Ar: Este número é difícil de mensurar, uma vez que se refere à quantidade de luz que tem que passar pela atmosfera terrestre antes que possa atingir a superfície da Terra, relacionado ao ângulo do sol em relação a um ponto de referência sobre a terra. O valor em condições padrão de teste é de 1,5.

Os testes de padrão de eficiência da indústria de módulos FV são realizados para atender ao requisito de que ao longo de 25 anos sua produção de energia decaia apenas 20%, mantendo ao longo do tempo 80% de eficiência da sua produção original. Para os inversores fotovoltaicos a garantia atualmente em média é de 10 anos e devem atender as normas NBR 16149 e NBR 16150, que estabelecem os parâmetros e ensaios dos inversores para conexão à rede. Os testes são exigidos aos fabricantes de equipamentos de energia solar a fim de obter o selo do Inmetro e estarem legalmente aptos a comercializarem seus produtos no Brasil, garantindo que a empresa estabelecida seja legalmente responsável pelo produto e atinja os parâmetros de desempenho citados acima (ELGIN, 2021; INTELBRAS 2021).

### 2.3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos são classificados pela forma em que é realizada a geração ou entrega da energia elétrica. A energia solar fotovoltaica divide-se basicamente em: sistemas isolados (*off-grid*), sistemas interligados à rede elétrica (*on-grid*) e sistemas híbridos (CRESESB, 2012). A Figura 9 exibe um fluxograma dos sistemas fotovoltaicos,

demonstrando apenas a subdivisão dos sistemas isolados e conectados à rede, sendo neste trabalho utilizado um sistema fotovoltaico isolado por meio de bomba sem armazenamento de energia elétrica.

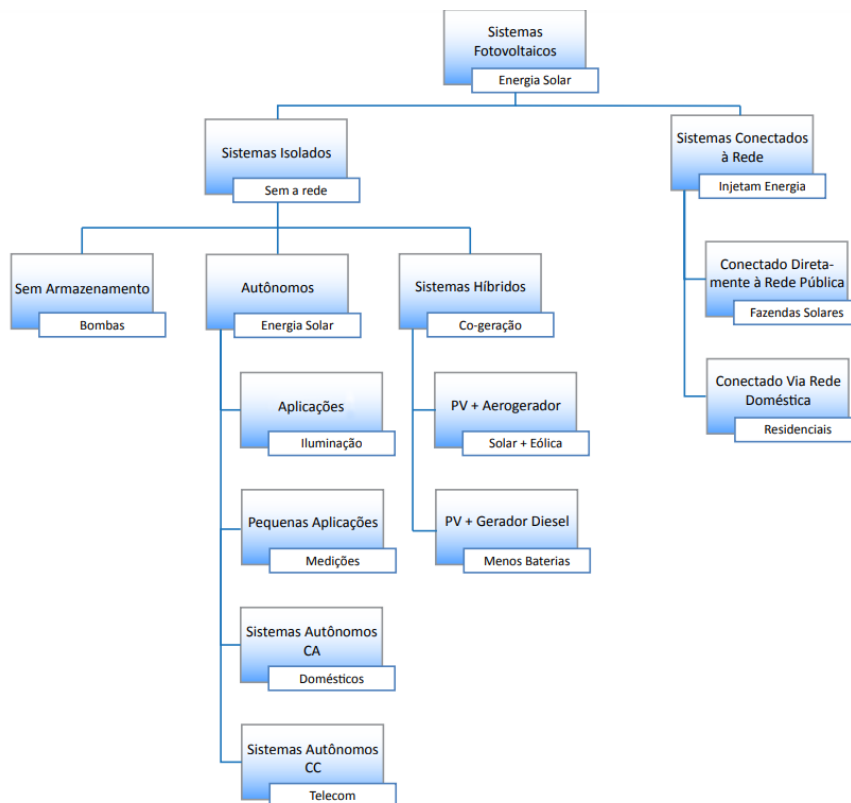


Figura 9 – Tipos de sistemas fotovoltaicos  
Fonte: Adaptado de Asolar (2019)

Os sistemas fotovoltaicos aumentaram consideravelmente seu desempenho na última década e conseqüentemente o número de instalações dos mesmos. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2017) entre junho de 2013 e junho de 2018, as conexões de micro geração de energia solar fotovoltaica saltaram de 24.000 para 30.900, sendo previsto até 2024 mais de 886 mil sistemas instalados. Desde 2013 a GD (geração distribuída) fotovoltaica cresceu a uma taxa média de 230% ao ano no Brasil (ANEEL, 2019).

### 2.3.2.1 SISTEMAS ISOLADOS

Os sistemas fotovoltaicos isolados (*off-grid*) são aqueles que não possuem ligação com a rede de distribuição de eletricidade das concessionárias. Possuem a característica de normalmente serem direcionados para o armazenamento de energia, comumente o

armazenamento é feito em baterias, garantindo a autonomia do sistema. Pelo fato de ser autônomo e independente da rede, não há regulamentação específica para seu uso (PINHO E GALDINO, 2014). Ideal para áreas rurais, estes sistemas podem funcionar sem armazenar energia, sendo um exemplo a irrigação de agricultura onde toda a água que é bombeada é consumida ou armazenada em reservatórios.

É uma alternativa aos locais onde não há acesso à rede de distribuição elétrica convencional ou o acesso torna-se difícil ou inviável. Este modelo de sistema fotovoltaico é comumente utilizado em áreas rurais desguarnecidas de rede de distribuição elétrica convencional, uma vez que não estão conectados à rede pública, apresentado na Figura 10. Uma de suas desvantagens é o fato de o uso de baterias elevar consideravelmente o custo do sistema (PINHO E GALDINO, 2014).



Figura 10 – Exemplo de um sistema isolado (*off-grid*)  
Fonte: Adaptado de Sebrae (2020)

Sistemas que não possuem ligação com a rede elétrica podem ser muito bem utilizados com bombeamento de água ou irrigação. Os módulos fotovoltaicos alimentam diretamente a bomba d'água por meio da energia captada através do Sol, desta maneira não é necessário o uso de energia ou de baterias.

Em um sistema de bombeamento de água solar *off-grid* os módulos fotovoltaicos captam os raios solares em momentos de incidência de irradiância solar e produzem energia elétrica alimentando a bomba d'água. A bomba representada na Figura 11 acionada por meio da energia módulo fotovoltaico realiza o trabalho de captar água de um poço e bombear para um local desejado, podendo ser uma residência ou para fins de agricultura (BOMBETEC, 2021).

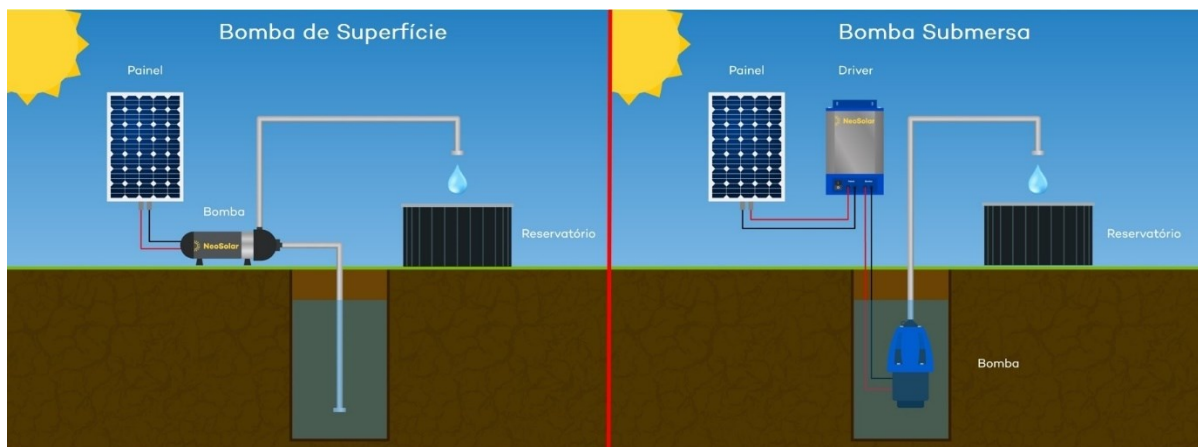


Figura 11 – Exemplo de um sistema de bombeamento de água com energia solar *off-grid*  
 Fonte: Adaptado de Bombetec (2021)

### 2.3.2.2 Sistemas conectados à rede

Os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil foram instalados no final dos anos 90 em concessionárias de energia elétrica, universidades e centros de desenvolvimento e pesquisa (PINHO E GALDINO, 2014). Atualmente, segundo mapeamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2019) o Brasil possui hoje 49.177 sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede, números que crescem a cada dia no país.

A partir da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012, correspondente à micro e mini geração distribuída, que regulamenta sistema fotovoltaicos conectados à rede de distribuição (correspondendo potências iguais ou inferiores a 75 kWp, e superiores a 75 kWp até 5 MWp) houve um aumento considerável no número de empresas que oferecem a venda destes serviços e de consumidores interessados em reduzir seus custos referente à energia elétrica, pelo fato desta resolução autorizar a compensação de energia elétrica (PINHO E GALDINO, 2014; ANEEL, 2019).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (*on-grid*) caracterizam-se por atuar como uma fonte de energia adicional ao sistema elétrico ao qual está conectado, uma vez que não utilizam armazenamento de energia, injetando diretamente a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos na rede elétrica (MIRANDA, 2013). A energia gerada pelos módulos solares em corrente contínua (CC) é enviada ao inversor fotovoltaico que converte esta energia em energia elétrica de corrente alternada (CA), com os parâmetros e formas de onda adequados conforme exigido pela distribuidora local.

A Figura 12 apresenta a energia gerada pelo conjunto de módulos fotovoltaicos e é convertida pelo inversor e utiliza a rede da concessionária como forma de compensação de energia, ou seja, os aparelhos da residência ou indústria que estão ligados consomem parte da energia funcionando como uma carga e, caso a potência no período seja maior que a potência da carga que estejam ligados ao mesmo tempo o excedente é enviada para a rede da concessionária, que conta essa energia como energia elétrica injetada (ABSOLAR, 2019).

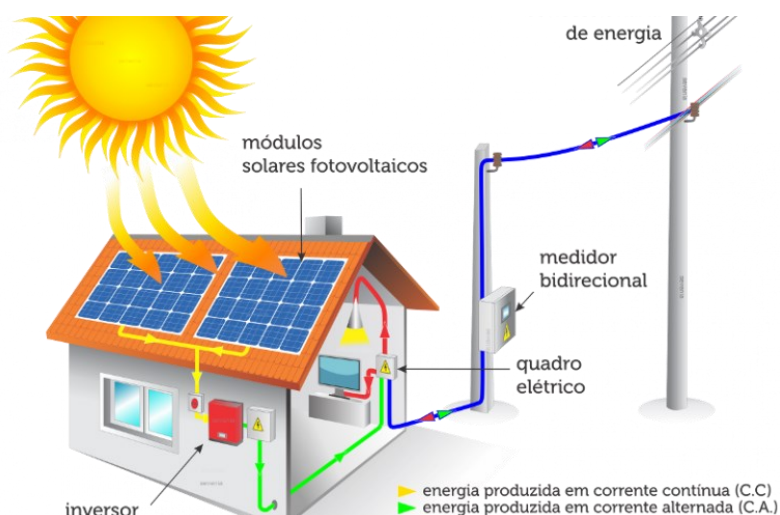


Figura 12 – Exemplo de um sistema conectado à rede (*on-grid*)  
 Fonte: Adaptado de Sebrae (2020)

Basicamente o sistema funciona com os seguintes passos (NEOSOLAR, 2019):

1. O funcionamento se dá por meio dos módulos fotovoltaicos (corretamente conhecidas como módulos fotovoltaicos) que costumam ser instaladas sobre os telhados para a livre captação da luz do sol e sua conversão em energia elétrica. Também podem ser instaladas em solo;
2. Toda a energia é enviada ao inversor fotovoltaico, principal equipamento do sistema e o qual converte essa energia para as características da rede elétrica;
3. A energia é convertida de corrente contínua para alternada pelo inversor é distribuída pela residência e alimenta qualquer equipamento elétrico conectado ao quadro de distribuição da unidade consumidora;
4. Caso não haja consumo no momento em que a energia foi gerada, ela então passa pelo quadro de força da residência e é injetada na rede elétrica da distribuidora;
5. A rede elétrica atua na forma de uma compensação de energia, armazenando a energia excedente que não é consumida pela carga e também fornecendo energia



nos momentos em que o sistema não está gerando energia suficiente, ou seja, à noite ou em períodos de baixa geração pelo sistema solar.

Os consumidores atendidos em baixa tensão do grupo B (residências, pequenos comércios, edifícios) se enquadram nas faturas chamadas de monômias, pois a única cobrança feita é sobre o consumo ativo de energia em kWh (quilowatt-hora). Como não há armazenamento de energia, e devido à forma como os inversores devem se comportar no caso de falta de energia na rede, em caso de apagão, por exemplo, a unidade consumidora (o imóvel) que possui um gerador solar fotovoltaico *on-grid* ficará sem energia visando a segurança elétrica do local. O custo e tempo de retorno (comumente utilizado em sistemas fotovoltaicos como *payback*) varia conforme o enquadramento, grupos rurais ou comerciais e devem ser analisados de forma minuciosa pela empresa que irá vender ao cliente (ELGIN, 2021; INTELBRAS, 2021).

### 2.3.3 SISTEMAS HÍBRIDOS

Os sistemas híbridos caracterizam-se pelo fato de utilizar-se de duas ou mais fontes para a produção de energia no sistema. Estes sistemas são escolhidos em função da disponibilidade local, operando em conjunto para atender a demanda de um consumidor comum (CRESESB, 2012).

Uma das vantagens dos sistemas híbridos é a utilização e aproveitamento das duas ou mais fontes disponíveis de forma inteligente, garantindo níveis de qualidade e confiabilidade para atender certa demanda energia elétrica, podendo ser de um consumidor comum ou até mesmo uma indústria (MUNIZ, 2015).

Os sistemas híbridos são projetados para utilizar-se de fontes renováveis que produzem mínimo impacto ambiental. Porém, às vezes estes sistemas necessitam de complementação de grupos geradores a combustão (diesel, gasolina, gás e biocombustíveis) de modo a atender a carga instalada. Com o uso dos recursos energéticos disponíveis é possível fazer a configuração para o desempenho ideal de sistemas no local da instalação do sistema (MUNIZ, 2015).

## 2.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Em pequenas comunidades que encontram-se distante da rede elétrica, ou até mesmo na agricultura, é de grande importância a utilização de meios para o bombeamento de água utilizando uma fonte de energia renovável e gratuita (neste caso a irradiância solar) e com baixos custos, sendo uma opção que apresentam benefícios de longo prazo os sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água. Para determinação dos sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água é necessário obter parâmetros de referência, como a demanda diária de água ( $m^3/dia$ ), a disponibilidade da irradiação solar local ( $kWh/m^2$ ), e a altura manométrica total (mca) (VAN PELT et al, 2012). Estes sistemas não necessitam diretamente de baterias eletrolíticas, sendo uma opção utilizar-se de reservatórios de água que, se bem dimensionados, suprem as necessidades em condições de baixa irradiância durante determinado período (FEDRIZZI, 2003). Uma possível solução para o abastecimento de água é a implantação dos sistemas de bombeamento que utilizam módulos fotovoltaicos.

Atualmente a tecnologia para o uso dos sistemas de bombeamento com módulos fotovoltaicos já é uma realidade e vêm sendo aperfeiçoada a cada ano. Sua principal vantagem advém do fato de que o recurso solar incide sobre toda a superfície terrestre, sendo sua viabilidade de utilização analisada através do dimensionamento. Outros fatores positivos estão aliados em sua baixa manutenção, apenas é necessária a limpeza periódica dos módulos fotovoltaicos e não emissão de ruídos ou gases poluentes por não apresentar motor a diesel, à gasolina e peças sobressalentes (RUTHER, 2004).

O modelo de bomba de água necessário ao sistema varia conforme a aplicação e característica do projeto, dependendo do local o qual o sistema será instalado e a distância entre a bomba e o reservatório, a profundidade do local onde a água será retirada e da capacidade necessária de bombeamento. Existem atualmente disponíveis no mercado diferentes tipos de bombas, como por exemplo, bombas centrífugas ou de deslocamento positivo, ser de localização superficial ou submersa e variando o motor com corrente alternada ou contínua. A Figura 13 exhibe níveis de escolha de bombas, sendo possíveis escolhas em função da altura total e da exigência diária por demanda de água (RZR, 2021).

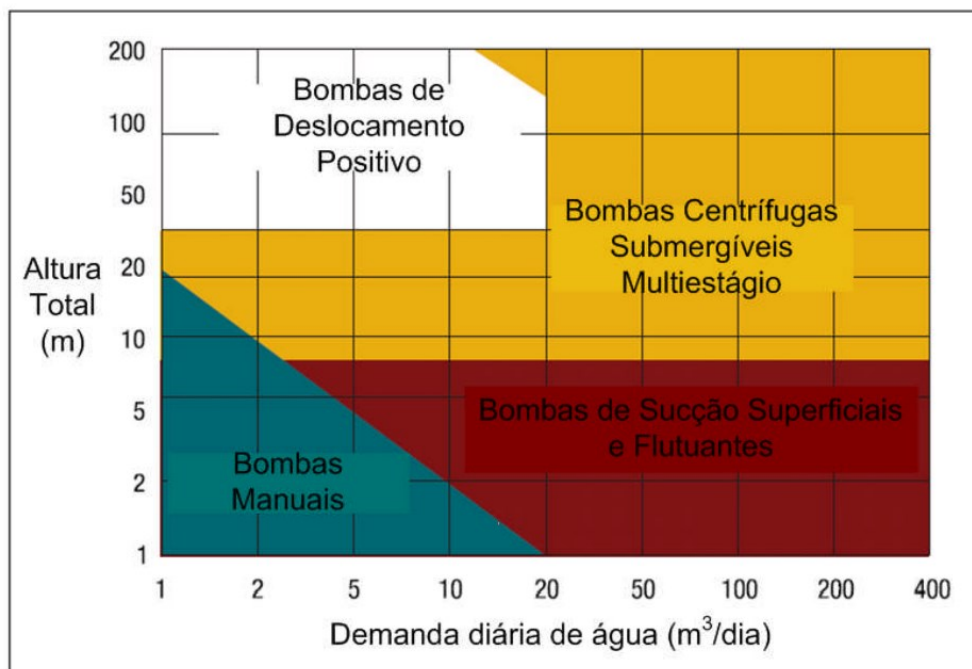


Figura 13 – Níveis de seleção do tipo de bomba para diferentes alturas e vazões  
 Fonte: Adaptado de Barlow (1993)

Bombas de deslocamento positivo (BDP) são consideradas bastante eficientes pelo fato de bombear praticamente qualquer fluido, podendo ser utilizadas em uma ampla gama de viscosidades. O deslocamento constante de líquidos é feito pelas engrenagens, lóbulos, palhetas e parafusos da bomba que trabalham de forma a dispersar volumes e fazer com que o líquido entre pela bomba. O fluxo da BDP não é afetado de forma significativa pelo diferencial de pressão, é contínuo e sem pulsações. Internamente este tipo de bomba possui folgas internas bastante apertadas, minimizando a concentração de líquido que circula dentro da bomba aumentando o tempo de vida útil da mesma (RZR, 2021).

As bombas centrífugas (BC) possuem inúmeras aplicações domésticas e variam até processos envolvendo bombeamento a altas vazões no ramo industrial. Por suas características dependem da energia cinética para movimentar o líquido e por impulsores a bomba transfere energia centrífuga ao fluido, criando certa pressão de sucção que realiza o fluxo de bombeamento em altas velocidades. De acordo com fabricantes deve-se utilizar bombas centrífugas em produtos pouco viscosos ou em serviços com baixas pressões de descarga (RZR, 2021; BOMBETEC, 2021).

As bombas de sucção superficiais possuem vantagens por serem versáteis e com poucas peças internas, leves e de fácil manuseio, sendo desnecessário o uso de baterias e geradores. São recomendadas para serem utilizadas com a energia solar fotovoltaica, alguns

modelos permitem a conexão direta ao módulo FV sem um regulador de tensão, sendo uma opção interessante do ponto de vista econômico, gerando economia na instalação e praticidade em seu uso (BOMBETEC, 2021). A maioria das bombas de sucção previnem o fluxo reverso do líquido, bloqueando o retorno do fluido, sem causar danos à bomba ou prejudicar o bombeamento de água. Sua manutenção e reparo se dá no próprio local de instalação, sem a necessidade de interromper o sistema por longos períodos de tempo (NEOSOLAR, 2019).

## 2.5 FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas convencionais são guias de ondas formadas por materiais dielétricos e sua seção transversal apresenta um núcleo cilíndrico de sílica envolvido por uma casca, também de sílica, porém com índice de refração menor do que a do núcleo. Esta diferença no índice de refração permite que a luz possa ser direcionada ao longo da fibra, por longas distâncias e com perdas mínimas de intensidade (HECHT, 2001).

A Figura 14 exemplifica a estrutura de uma fibra óptica, composta por uma capa protetora, casca e núcleo. O fenômeno físico que permite a utilização das fibras ópticas é a reflexão interna total da luz, conforme a Lei de Snell-descartes da óptica geométrica onde a luz incidente percorre a extensão da fibra por meio de reflexões totais (HECHT, 2001).

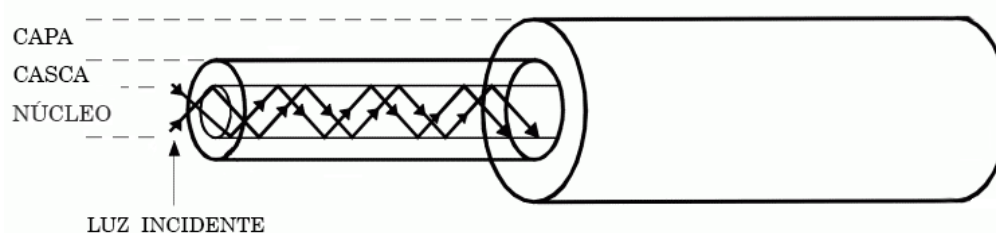


Figura 14 – Visão geral de um feixe de luz que incide em um cordão de fibra óptica e seus componentes  
Fonte: Autoria própria

Há também uma segunda camada, conhecida como revestimento ou capa, com a função de proteger a fibra, isolando o núcleo e a casca do exterior, provendo resistência mecânica à fibra óptica (YIN et al., 2008 apud SANTOLIN, 2016). O material mais comum para a construção das fibras ópticas é a sílica pura, nome popular do óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ).

Porém de acordo com a aplicação desejada, outros materiais podem ser empregados em sua construção, como vidros derivados do flúor e alguns elementos da família dos calcogênios, como o enxofre. De acordo com os fabricantes sabe-se que fibras fabricadas a partir de sílica pura ou dopada apresentam melhores características de transmissão, e por este motivo são as mais utilizadas no ramo de telecomunicações. Já as fibras produzidas a partir do vidro (composto ou plástico) não possuem boas características de transmissão (alta atenuação e baixa largura de banda) sendo indicadas para sistemas de baixa capacidade, com pequenas distâncias e sistemas de iluminação (FIBRACEM, 2018).

## 2.6 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia das fibras ópticas, permitiu-se que, além de ser empregadas como meio de transmissão de dados, por meio de suas características e versatilidade, seja possível utilizá-las também como sensores de fibra óptica. Estes sensores aparecem hoje em inúmeras aplicações na engenharia, devido aos estudos na década de 60 nas áreas de otimização de lasers e fabricação de fibras ópticas com altas taxas de transmissão (GRATTAN; SUM, 2000). Diferentes usos para este tipo de sensores também têm vindo a assimilar cada vez mais as vantagens desta tecnologia, desde o ramo industrial até o setor de telecomunicações. Sendo impulsionado principalmente pelo avanço da optoeletrônica nas últimas décadas houve um aumento considerável no estudo de novas aplicações das FBGs como elemento sensores.

Nos anos 70 através da descoberta da fotossensibilidade nas fibras ópticas, houve grande avanço científico para aplicações reais no campo do sensoriamento óptico. A partir de pesquisas nesta área em 1978 Ken Hill e colaboradores constataram as Redes de Bragg em fibras ópticas (FBGs, do inglês *Fiber Bragg Gratings*) que possuem a capacidade de reflexão do núcleo de uma fibra óptica dopada com um elemento químico (OTHONOS, 1997; HILL et. al., 1978).

Em diversas aplicações a tecnologia dos sensores FBGs possuem vantagens em aplicações sobre os sensores eletromecânicos convencionais. O tamanho e peso reduzidos permitem o monitoramento de características, como por exemplo a inserção de sensores sob a face frontal de um módulo fotovoltaico sem que ocorra sombreamento sobre as células do módulo (NOGUEIRA, 2005). Outra vantagem que motivam o presente estudo é a capacidade de multiplexação em comprimento de onda, possibilitando o uso de diversos sensores em um

único cordão de fibra. É importante ressaltar que atuando como elemento sensor as redes de Bragg em fibra óptica são imunes a interferências eletromagnéticas.

Redes de Bragg em fibras são elementos periódicos de modulação do índice de refração no núcleo da fibra óptica, através do seu eixo de propagação, como pode ser visto na Figura 15 (KASHIAP, 1994). O comprimento de uma rede de Bragg pode variar entre poucos milímetros a vários centímetros de comprimento. A amplitude de modulação do índice de refração,  $\Delta n$ , geralmente não ultrapassa valores na ordem de  $10^{-2}$ , sendo os valores típicos da ordem  $\Delta n \approx 10^{-4}$ . Para fibras de núcleo de sílica dopada com germânio, os comprimentos de onda de Bragg de índice médio 1500 nm, usual nas comunicações ópticas, a periodicidade da modulação típica é  $\Lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$  (OTHONOS, 1997; HILL et. al., 1978). Na Figura 15 as dimensões do período em relação às da fibra foram intencionalmente exageradas para ajudar a visualização, sendo que  $\eta_{eff}$  representa o índice de refração da fibra e  $\Delta n$  corresponde a amplitude de modulação.

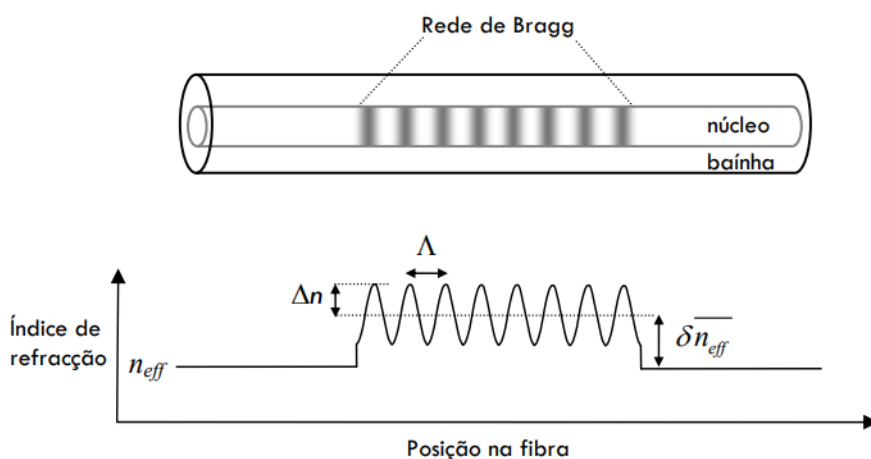


Figura 15 – Modelo de uma FBG, modulação local e periódica do índice de refração em relação ao núcleo da fibra.

Fonte: Adaptado do Nogueira (2005, p.27)

A rede de Bragg atua como um filtro espectral reflexivo de comprimento de onda com o pico de refletividade em  $\lambda_B$ , determinado pela Equação (2). Onde  $\lambda_B$  expressa o comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ),  $\eta_{eff}$  expressa o índice de refração efetivo do núcleo e  $\Lambda$  indica o período espacial da modulação do índice de refração.

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda \quad (2)$$

Pelo seu princípio de funcionamento quando uma rede de Bragg é iluminada por uma fonte de luz de banda larga, uma faixa estreita do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg, é refletida, e o restante do espectro é transmitido. Na Figura 16 encontra-se um desenho esquemático estrutural e os espectros transmitidos e refletidos de uma rede de Bragg. Na rede ilustrada as respectivas propriedades espaciais mantêm-se constantes ao longo da extensão longitudinal. Este tipo de redes designa-se por redes de Bragg uniformes e o respectivo espectro de reflexão é similar ao representado na Figura 16 (NOGUEIRA, 2005).

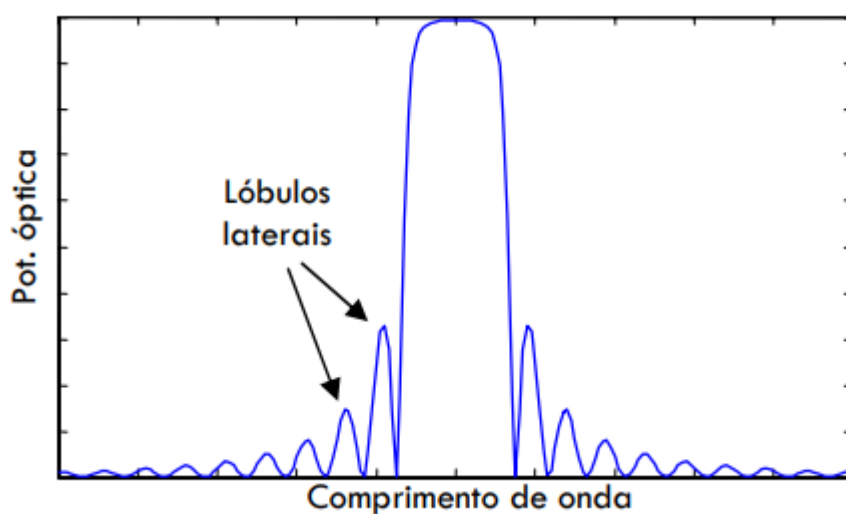


Figura 16 – Ilustração de um possível espectro de reflexão de uma rede de Bragg uniforme  
Fonte: Nogueira (2005, p.36)

De acordo com a literatura as redes de Bragg apresentam vantagens por ser possível controlar sua refletividade e a largura de banda através do controle da amplitude de modulação e do comprimento da rede. Outra grande vantagem deste tipo de redes está na sua simplicidade de gravação. Entretanto, uma de suas desvantagens é de o espectro de reflexão apresentar lóbulos laterais com amplitudes elevadas (NOGUEIRA, 2005).

### 2.6.1 REDES DE BRAGG ATUANDO COMO ELEMENTO SENSOR

Uma das principais características atuando como redes de Bragg em fibra óptica é a elevada sensibilidade a perturbações externas como compressão, tração, vibração, pressão ou variações de temperatura que alteram o comprimento de onda de Bragg refletido pela rede.

Devido as propriedades da sílica, quando as redes de Bragg são expostas a esforços mecânicos longitudinais ou variações na temperatura, alteram-se os valores do índice de refração efetivo,  $\eta_{eff}$ , e da periodicidade espacial,  $\Lambda$ , acarretando numa mudança do comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) (OTHONOS, 1997; HILL et. al., 1978).

A Equação (3) descreve a variação do comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), onde o primeiro termo, que está multiplicado por  $\Delta L$  do lado direito, representa o efeito da deformação e o segundo termo do segundo membro o efeito da temperatura (KERSEY, 1997). As alterações no comprimento de onda de Bragg são influenciados tanto pela deformação ( $\Delta L$ ) como por variações de temperatura ( $\Delta T$ ). Pelo fato de não ser possível distinguir a origem destas duas perturbações, em razão de uma variação em ao menos um desses parâmetros provocar uma variação no comprimento de onda de Bragg, este efeito implica uma limitação da FBG e este efeito é conhecido como sensibilidade cruzada (OTHONOS, 1997).

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial l} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right) \Delta L + 2\left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial T} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T \quad (3)$$

A Equação (3) evidencia que alterações na periodicidade espacial de  $\Lambda$  ou  $\eta$  influenciam em uma mudança em  $\lambda_B$ , ou seja, qualquer deformação mecânica ou mudança do índice de refração devido à temperatura induzem a uma mudança na posição espectral da reflexão da rede de Bragg (NOGUEIRA, 2005). Entretanto, segundo Hill *et al* a equação simplificada do efeito produzido pelo fator foto elástico é dada por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z \quad (4)$$

onde  $\varepsilon_z$  é a componente de deformação de tensão aplicada,  $p_e$  é o coeficiente óptico da deformação efetiva dada pela Equação (5):

$$p_e = \frac{\eta_{eff}^2}{2} [ p_{12} - \nu (p_{11} + p_{12}) ] \quad (5)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $p_{11}$  e  $p_{12}$  representam os coeficientes ópticos. O segundo termo da Equação (5) representa a contribuição para a variação do comprimento de onda de



Bragg devido ao deslocamento pela expansão térmica, acarretando em uma mudança do índice de refração da rede dada por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha_\Lambda - \alpha_n) \Delta T \quad (6)$$

onde o coeficiente de expansão térmica da fibra é expresso pela Equação (7), sendo:

$$\alpha_\Lambda = \left(\frac{1}{\Lambda}\right) \left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right) \quad (7)$$

já o coeficiente de expansão termo-óptico da fibra é expresso pela Equação (8):

$$\xi = \left(\frac{1}{\eta_{eff}}\right) \left(\frac{\partial\eta_{eff}}{\partial T}\right) \quad (8)$$

Os efeitos foto-elástico e termo-óptico, permitem o funcionamento das redes de Bragg em fibras ópticas como elementos sensores, por estarem presentes na estrutura da fibra devido à gravação (NOGUEIRA, 2005). Em particular neste trabalho, a única variável de interesse é a temperatura, sendo fundamental adotar uma técnica que elimine ou ao menos reduzir a limitação de sensibilidade cruzada provocada pela deformação mecânica. O método empregado neste trabalho foi de encapsular a rede de Bragg com um material rígido com baixo coeficiente de expansão térmica ou com valor de coeficiente semelhante ao da fibra (SOUSA, 2011).

Em muitas aplicações os sensores de redes de Bragg sempre relacionam as grandezas medidas como uma função do espectro refletido pela rede, que depende da variação do seu período espacial e do índice de refração efetivo da fibra. A variação do comprimento de onda do sinal que retorna da rede de Bragg não está relacionado com a potência de luz detectada podendo até ter perdas na transmissão ao longo da fibra sem gerar erros na medida (MELTZ, MOREY, GLENN, 1989).

As razões para a crescente utilização decorrem das vantagens que os sensores FBGs apresentam, dentre elas seu tamanho e peso reduzido, possibilidade de multiplexação, resposta com comportamento linear, alta precisão e sensibilidade e imunidade à Interferência Eletromagnética (EMI) (YIN et al., 2008). A tecnologia das FBGs é empregada desde o ramo de telecomunicações, monitoramento dinâmico de estruturas na área de engenharia civil e

também em aplicações no estudo da deformação mecânica decorrente das etapas de secagem de tintas (LOURENÇO JUNIOR, 2011). Em contrapartida, os altos custos dos interrogadores e decodificadores são uma das dificuldades para o investimento expressivo neste tipo de aplicações (SANTOLIN, 2016).

## 2.6.2 TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO PARA OS SENSORES FBGS

Devido o interesse em atuar com medições de temperatura utilizando um módulo fotovoltaico em ambiente aberto fez-se necessário a importância de adotar uma técnica de encapsulamento para proteger os sensores FBGs e não deixar os mesmos expostos as diferentes variações climáticas. Durante o processo de fabricação de uma FBG há um enfraquecimento da fibra ótica no ponto em que a rede é gravada devido à incidência do laser ultravioleta, além da retirada do revestimento de acrilato, que tem por função fornecer maior resistência mecânica à fibra (OTHONOS, 1997; SOUSA, 2016). É importante ressaltar que a gravação da rede só ocorre depois da retirada do acrilato, material polimerizado que reveste a fibra ótica (OLIVEIRA, 2012).

Além do baixo custo o fator determinante para escolher o método de encapsulamento aqui empregado foi que se conseguisse por meio desta técnica uma proteção à intempéries climáticas, estudando procedimentos relacionados que se encaixassem a este tipo de aplicação. Diferentes técnicas presentes na literatura foram analisadas e dentre as que foram estudadas destaca-se o encapsulamento fabricado com tubo de aço manganês com melhoramento de contato térmico utilizado por Song e Yu (2010) e fazendo uso de um tubo de aço inox de tamanho reduzido, apresentado por Bortolotti et al. (2014) e Sousa et al. (2014).

Por apresentar um estudo relacionado na área e compreendendo faixas de temperaturas de trabalho similares, a melhor metodologia visando a viabilidade técnica e econômica para o encapsulamento adotado foi o de Santolin (2016), proposto anteriormente por Bortolotti et al. (2014) e Sousa et al. (2014). De acordo com os autores citados, deve-se fazer o uso de um tubo de metal para arranjar o mesmo com o sensor em seu interior, de modo que as extremidades desse tubo são coladas na fibra, como pode ser visto na Figura 17.

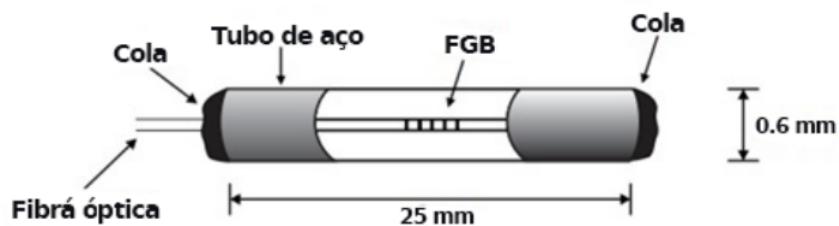


Figura 17 – Técnica de encapsulamento para os sensores FBGs  
 Fonte: Adaptado de Bortolotti et. al. (2014)

O procedimento de encapsulamento permitiu aos sensores mais resistência à esforços mecânicos e às intempéries climáticas. A técnica de encapsulamento utilizada auxiliou de forma significativa neste trabalho facilitando a aplicação direta no monitoramento da temperatura protegendo os sensores e facilitando o manuseio dos cordões da fibra sem que ficassem tão susceptíveis à quebra.

A Figura 18 representa um sensor encapsulado, de modo que em cada extremidade da agulha de seringa descartável foi utilizada cola pastosa à base de resina epóxi a prova d'água. De acordo com o fabricante, possui alto poder de adesão para diversas superfícies, incluindo o vidro (material que compõe o módulo solar) além de baixo poder de escorrimento permitindo aplicações em superfícies verticais, ideal para esta função.

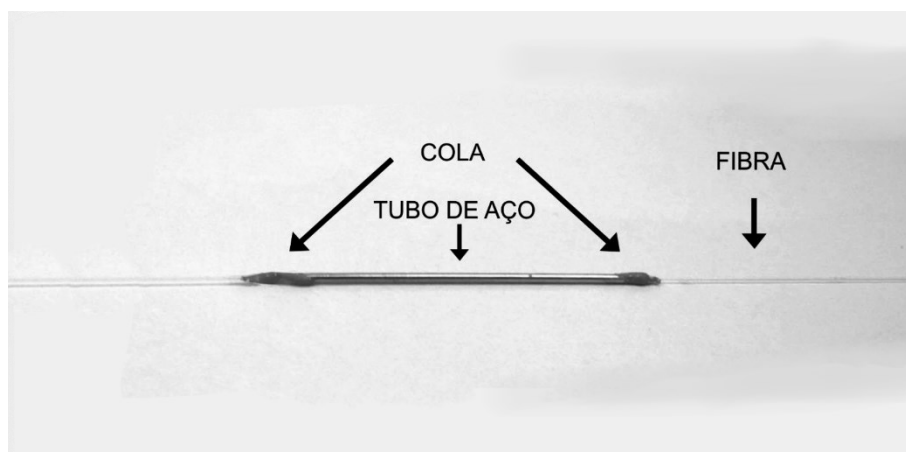


Figura 18 – Fibra óptica após a técnica de encapsulamento ser empregada  
 Fonte: Autoria própria

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o sistema de bombeamento fotovoltaico de água, com os experimentos realizados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco (latitude: 26°13'43" S, longitude: 52°40'14" W e altitude: 761 metros).

Para o sistema de medição de temperatura no módulo FV são utilizados 16 sensores ópticos multiplexados em três cordões de fibra óptica dispostos sob a face frontal de um módulo fotovoltaico.

No trabalho apresentado será utilizado a tecnologia dos sensores à fibra óptica, foco deste trabalho, que permitirão verificar o comportamento térmico de células do módulo fotovoltaico e monitorá-las em determinados perfis de operação e verificar o rendimento do sistema de bombeamento de água.

Para obter-se de dados meteorológicos foi utilizada a Estação de Pesquisa em Energia Solar EPESOL Pato Branco. O sistema de aquisição de dados fez-se de grande importância para o monitoramento das variáveis climáticas (intensidade da irradiância solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura local) durante a realização de todos os ensaios.

#### 3.1 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS

Por já ter sido utilizado em trabalhos anteriores, preferiu-se trabalhar com um sistema completo que realizasse de forma automática a calibração dos sensores ópticos. O início do processo se dá com as fibras ópticas dispostas em um tubo de cobre oco com aproximadamente 4,0 mm de diâmetro interno e 6,0 mm de diâmetro externo, que permite a passagem de água destilada em um fluxo contínuo, dentro da faixa de temperatura dos ensaios realizados. O processo se repetiu para cada um dos três cordões, de forma isolada para que não houvesse chance de quebra na hora da disposição no tubo.

Fez-se o controle da temperatura através de um circulador térmico de imersão (também conhecido como banho térmico) da marca Polyscience e modelo 9002A11B, com precisão de 0,25 °C, estabilidade térmica de  $\pm 0,01$  °C com faixa de temperatura de trabalho de -20,0 °C a 200,0 °C (POLYSCIENCE, 2015). A temperatura do laboratório, foi controlada via ar condicionado a 22,0 °C durante todos os ensaios. O sistema completo é apresentado na Figura 19, onde o cordão de fibra óptica está imerso no tubo de cobre e com o auxílio do *software*

“Sistema para Calibração e Aquisição de Temperatura de Sensores à Fibra Óptica” foi possível iniciar o processo de caracterização dos sensores.

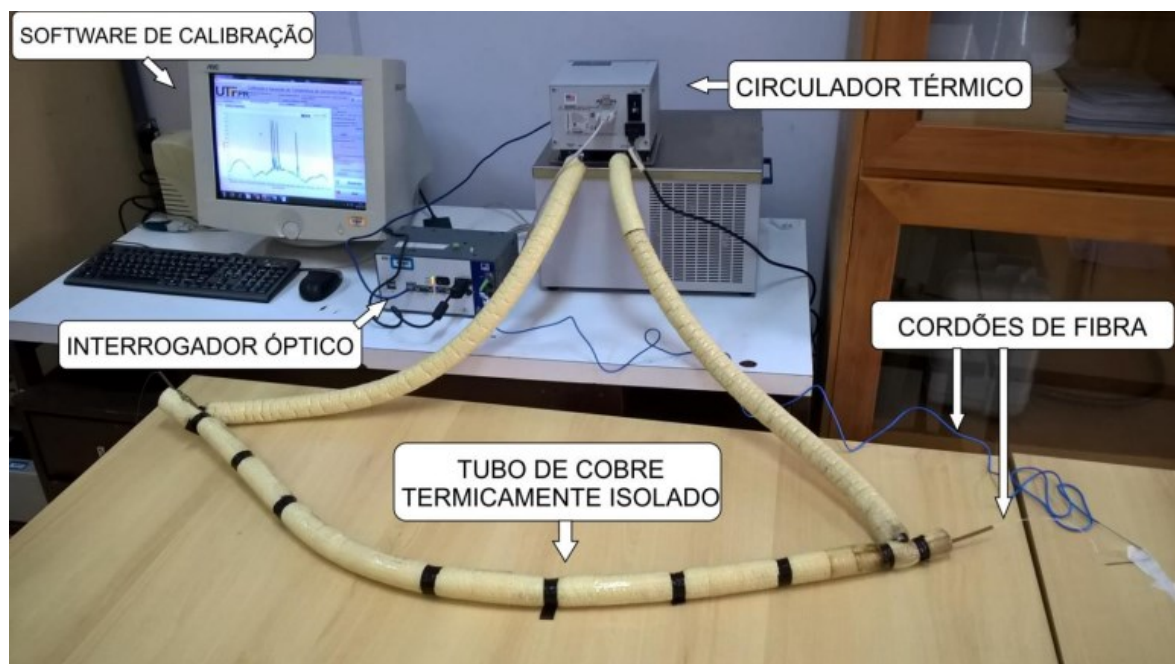


Figura 19 – Sistema utilizado para caracterização de fibras ópticas com circulador térmico  
Fonte: Autoria própria

O sistema de calibração e aquisição de temperatura de sensores ópticos utilizado apresenta em tempo real o espectro e o comprimento de onda exato para cada um dos dezesseis sensores em estudo, auxiliando na visualização correta do valor do comprimento de pico ( $\lambda_B$ ) dos sensores. No canal 1 do interrogador foi conectado um cordão de fibra com sete sensores (Tabela 2), no canal 2 outro cordão com quatro sensores (Tabela 3) e no canal 3 conectados cinco sensores em um cordão de fibra (Tabela 4).

Tabela 2 – Valores de comprimento de onda apresentados para o cordão 1 com sete sensores

Canal 1	Comprimento de onda (nm)	Nomenclatura Utilizada
Sensor 1	1530,93	C1_S1
Sensor 2	1539,16	C1_S2
Sensor 3	1540,74	C1_S3
Sensor 4	1543,15	C1_S4
Sensor 5	1544,41	C1_S5
Sensor 6	1546,74	C1_S6
Sensor 7	1556,49	C1_S7

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Valores de comprimento de onda apresentados para o cordão 2 com quatro sensores

<b>Canal 2</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>	<b>Nomenclatura Utilizada</b>
Sensor 1	1543,03	C2_S1
Sensor 2	1544,30	C2_S2
Sensor 3	1545,94	C2_S3
Sensor 4	1555,55	C2_S4

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Valores de comprimento de onda apresentados para o cordão 3 com cinco sensores

<b>Canal 3</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>	<b>Nomenclatura Utilizada</b>
Sensor 1	1540,33	C3_S1
Sensor 2	1543,20	C3_S2
Sensor 3	1544,33	C3_S3
Sensor 4	1546,43	C3_S4
Sensor 5	1555,84	C3_S5

Fonte: Autoria própria.

Utilizando o *software* Excel e os dados fornecidos pelo programa de calibração fez-se a regressão linear de modo a obter a equação da reta correspondente para o sensor 4 do segundo cordão de fibra (C2\_S4) por meio do método dos mínimos quadrados, sendo o processo análogo aos demais. Na Figura 20, identifica-se também a faixa de temperatura em que o sensor foi calibrado, de 10,0 °C até 60,0 °C que é a faixa de temperatura em que se trabalhou durante as medições e de interesse neste trabalho.

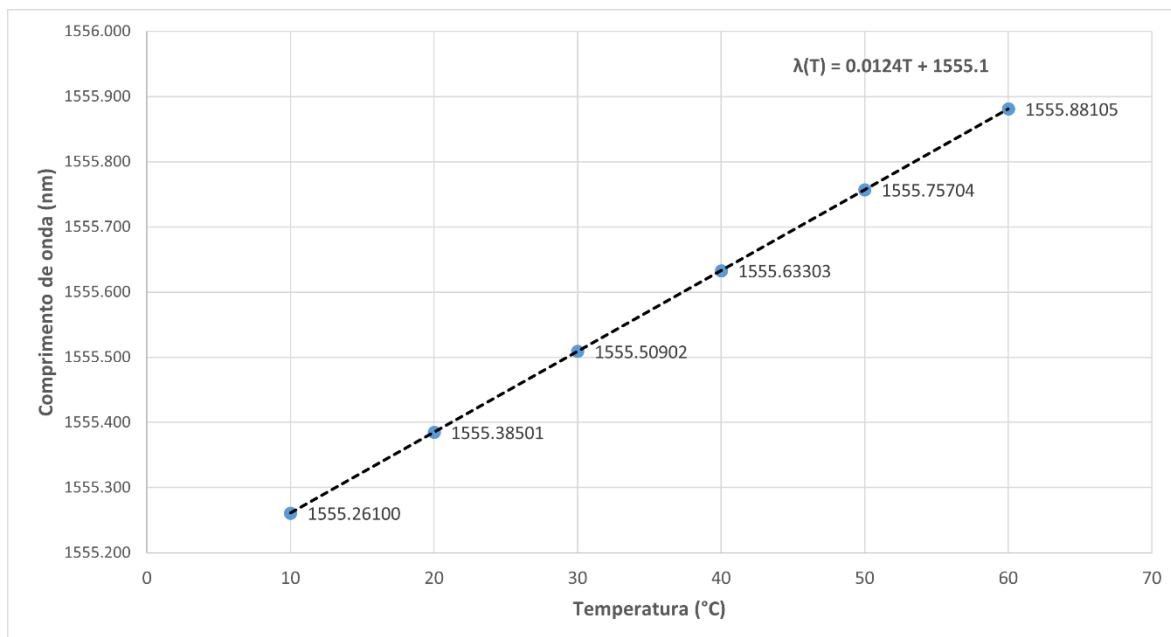


Figura 20 – Regressão linear para o sensor 4 do cordão 2 (S4\_C2)  
Fonte: Autoria própria

Por meio do *software* Catman Easy foi possível também identificar o pico de cada um dos dezesseis sensores FBGs inscritos nos três cordões de fibra óptica, sendo calculadas as devidas regressões lineares. Por fim, após a calibração concluída para os dezesseis sensores utilizados neste trabalho, os mesmos estavam aptos a serem utilizados na determinação da temperatura das células e do módulo FV.

### 3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

No estudo e monitoramento das células do módulo fotovoltaico utilizando redes de Bragg em ambiente aberto é de grande importância monitorar os elementos climáticos que acarretam no aquecimento e resfriamento do módulo e conseqüentemente na variação da vazão da bomba d'água. Estes elementos podem ser de origem ambiental (variações na incidência solar, variações na velocidade do vento e temperatura ambiente) ou resultante da geração de energia (fluxo da corrente elétrica fotogerada no interior das células) entre outros.

Por meio do sistema de aquisição de dados apresentado na Figura 21 (A) foi possível o monitoramento de grandezas climáticas e em 6 (B) obtiveram-se as medidas de temperatura frontal do módulo com o uso dos sensores ópticos posicionados sobre as células, onde o sistema registrou as medidas de temperatura dos sensores FBGs.

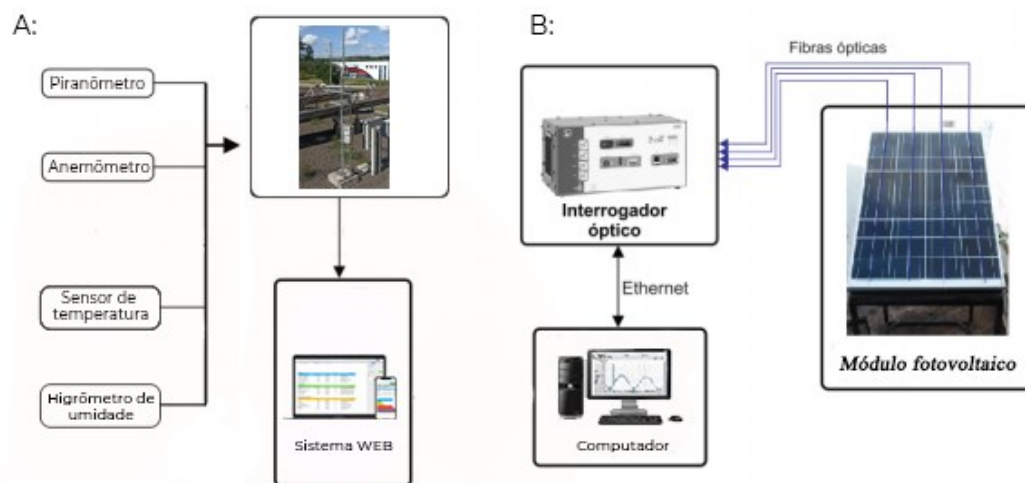


Figura 21 – Montagem do sistema de aquisição de grandezas climáticas (a) e (b) de dados da fibra óptica dos sensores FBGs

Fonte: Autoria própria.

Para a concepção e desenvolvimento do sistema de bombeamento de água serão necessários os seguintes equipamentos:

- Um módulo fotovoltaico, capaz de alimentar a bomba de água.;
- Uma bomba de água, marca Shurflo modelo 8000-443-136.;
- Um reservatório para o armazenamento de água bombeada;
- Sensores FBGs.;
- Câmera Térmica modelo TI-25 Fluke.;
- Sistema de armazenamento de dados de irradiância solar, vento, dentre outros.;
- Dois multímetros digitais com armazenamento de dados de tensão e corrente.

### 3.3 BOMBA SHURFLO

A bomba de água utilizada é da marca Shurflo modelo 8000-443-136 de motor de corrente contínua, para uso em sistema de energia solar e possui uma válvula de segurança de fluxo reverso, sendo seus principais parâmetros apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais parâmetros bomba modelo Shurflo 8000-443-136

Parâmetro	Valor
-----------	-------



---

Altura máxima	42,25 m
Vazão Diária	Até 2.450 L/dia
Potência Máxima	100 W
Tensão de alimentação	12 V
Corrente Nominal	4.2 A – 7.2A
Dimensões	21,5 x 11,4 x 10,4 cm
Sucção vertical	3,66 m
Peso Líquido	1 Kg
Temperatura máxima do líquido	77°C

---

Fonte: NEOSOLAR (2019)

Segundo o fabricante este modelo de bomba de superfície, Figura 23, é ideal para bombear água de cisternas e reservatórios. Sua instalação pode ser feita em ambientes externos, sem limitações quanto a locais remotos ou de difícil acesso. Suas principais utilizações são: caixa d'água – uso doméstico, bebedouro de animais, pequenas irrigações e transferência de fluidos à alta pressão (superior a 4,6 litros/minuto) (NEOSOLAR, 2019).



Figura 22 - Bomba Shurflo 8000-443-136 Solar 12V  
 Fonte: Adaptado de Neosolar (2019)

Pelo fato do modelo do sistema de bombeamento de água em estudo não utilizar-se de baterias, optou-se por este modelo pois esta pode ser acionada diretamente por um módulo solar fotovoltaico, simulando locais onde a rede elétrica não está presente, sem o uso de equipamentos adicionais (neste caso, baterias).

### 3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS DA UTFPR

Através da Estação de Pesquisa em Energia Solar (EPESOL Pato Branco) foi possível adquirir dados meteorológicos como irradiância, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do vento. O projeto que deu origem à estação meteorológica tem seu foco específico na “Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior”, por isso foram instaladas estações solarimétricas em seis campus da Universidade Tecnológica. Coordenado pelo Laboratório de Energia Solar (Labens) da UTFPR, esta ação tem como objetivo comparar o comportamento dos módulos solares e a eficiência da geração solar sob diferentes condições climáticas (EPESOL, 2022). A Figura 22 apresenta o projeto que é uma parceria entre a Universidade Tecnológica e a estatal de energia elétrica do Paraná - COPEL.



Figura 23 – Estação de dados meteorológicos do câmpus UTFPR de Pato Branco - EPESOL  
Fonte: Epesol (2022)

Pelo fato de a estação de pesquisa ser muito próximo ao local de ensaio de dados e medidas com o módulo solar utilizado (aproximadamente cinco metros) fez-se como referência os dados adquiridos e fornecidos pela UTFPR via banco de dados. Com os dados

fornecidos permitiu-se fazer comparações entre a irradiância instantânea e o seu efeito nas variações de temperatura do módulo solar em análise e de grandezas elétricas.

### 3.5 MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

Para esta aplicação, foi utilizado um módulo solar fotovoltaico modelo KC85TS fabricado pela empresa Kyocera, composto por 36 células de silício policristalino, com potência de 87 W e dimensões de 100,70 cm de comprimento, 65,20 cm de largura e 5,80 cm de profundidade (KYOCERA, 2015). Segundo o fabricante o módulo apresenta as especificações elétricas sob condições em ambiente controlado, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações elétricas do módulo fotovoltaico utilizado de modelo KC85TS. Desempenho elétrico sob condições de teste de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25 °C

Parâmetro	Valor
Potência máxima (P <sub>M</sub> )	87 W (+10 % / -5 %)
Tensão de potência máxima (V <sub>M</sub> )	17,4 V
Corrente de potência máxima (I <sub>M</sub> )	5,02 A
Tensão de circuito aberto (V <sub>oc</sub> )	21,7 V
Corrente de curto-circuito (I <sub>sc</sub> )	5,34 A
Coefficiente térmico de V <sub>oc</sub>	-82,1 mV/°C
Coefficiente térmico de I <sub>sc</sub>	2,12 mA/°C

Fonte: Kyocera (2015)

O módulo é indicado pela empresa que fabrica a bomba d'água sendo parte integrante de um kit para o melhor desempenho dos equipamentos em conjunto, uma vez que a bomba permite a conexão com módulos FV de até 180 W. Se o módulo solar estiver conectado à bomba d'água, o sistema possui vazão estimada de 1700 – 245 litros/dia dependendo do recalque, funcionando mesmo em períodos de baixa irradiância solar (NEOSOLAR, 2019). O módulo utilizado neste trabalho está com aproximadamente quatorze anos de fabricação.

O módulo fotovoltaico utilizado está fixado em uma estrutura de metal com uma inclinação de ajuste de ângulo de 35° com a horizontal, apresentado na Figura 24. A bomba foi acoplada atrás do mesmo, para contribuir em sua proteção de chuvas e intempéries climáticas. Buscou-se situar o módulo em uma orientação geográfica que não houvesse sombras oriundas de obstáculos externos durante o horário referente às medições, maximizando a incidência solar nos horários de trabalho.



Figura 24 – Módulo fotovoltaico instalado  
Fonte: Autoria própria

Para estes ensaios foram instalados 16 sensores FBGs sob a superfície frontal do módulo FV, conforme a Figura 25. Desta maneira foi possível monitorar as variações de temperaturas ocasionadas pela incidência solar, ventos e temperatura ambiente. O primeiro cordão de fibra com 7 sensores, o segundo com 4 e o terceiro com 5.

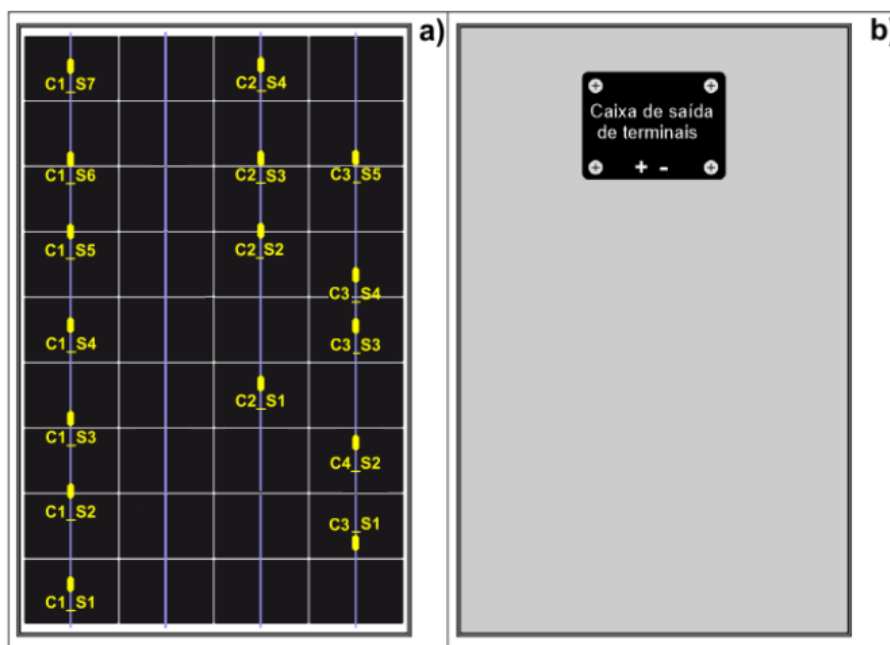


Figura 25 - Disposição dos 16 sensores FBGs na (a) face frontal do módulo e da caixa de saída de terminais (b) face de trás do módulo  
Fonte: Autoria própria

O desenho esquemático que pode ser observado na Figura 26 representa um dos dezesseis sensores instalados apresentando o comportamento ideal que se buscou atingir por meio da pasta térmica com a técnica de fixação das fibras, buscando não deixar os excessos de cola que ficaram para não causar sombreamento ou efeitos negativos nas medições. É importante ressaltar que para o bom contato térmico toda a área da fibra óptica deve estar sempre em contato com o vidro.

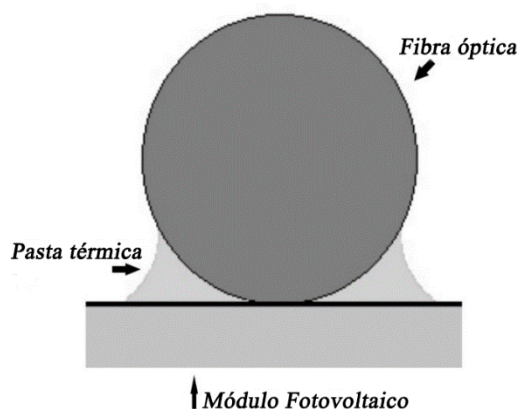


Figura 26 - Representação de corte na secção transversal por meio da técnica de fixação do cordão de fibra óptica

Fonte: Autoria própria

Depois de uma inspeção visual apresentado na Figura 27, comparou-se a temperatura dos sensores com os valores de uma câmera térmica modelo TI-25 Fluke, de modo a verificar a qualidade do contato térmico com a superfície do módulo FV em cada um dos cinco sensores. Os valores apresentados da câmera térmica em comparação com os sensores FBGs serão descritos no capítulo 5.1.

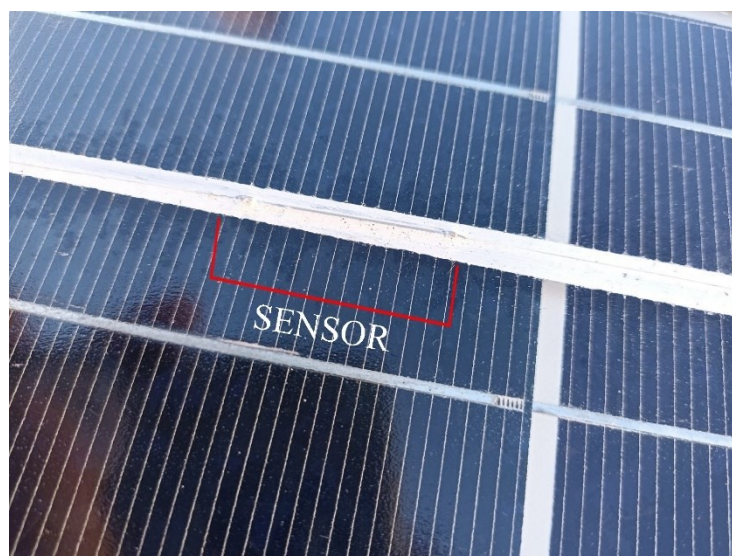


Figura 27 – Sensor fixado na superfície frontal do módulo fotovoltaico

Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos testes experimentais com a bomba d'água realizados no campus da UTFPR – Pato Branco com os sensores FBGs para monitoração de temperatura e leituras de grandezas elétricas utilizando multímetros digitais. O desempenho do sistema sem o uso das FBGs foi observado durante o intervalo das 9h 00min às 15h 00min para observar o desempenho do sistema e vazão da bomba com intervalos de medições diários a cada 30 minutos. Fazendo o uso dos sensores FBGs observou-se o desempenho das 8h 00min até as 18h 00 min.

### 4.1 TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA

Inicialmente fez-se o teste com a bomba d'água por meio da utilização de uma fonte de tensão e de corrente, simulando o papel de um módulo fotovoltaico, para acionamento da bomba d'água. A Tabela 7 apresenta os resultados do primeiro ensaio realizado. Com o auxílio de um béquer e um cronômetro permitiu-se fazer uma leitura aproximada da vazão. Um amperímetro também foi usado para medir a corrente fornecida à bomba.

Tabela 7 – Parâmetros do teste realizado com a bomba d'água

<b>Tensão (Volts)</b>	<b>Corrente Elétrica (Ampére)</b>	<b>Vazão (Litros/Segundo)</b>	<b>Altura (Metros)</b>
12,0	3,4	12,14	1,0
12,0	3,48	11,94	2,0
12,0	3,31	12,08	3,5

Fonte: Autoria própria

Em relação à tensão de alimentação, a mesma foi ajustada em 12 volts na fonte de tensão para este ensaio, tendo sua limitação de tensão em 3,5 amperes. Pelo fato de a bomba possuir recalque de até 42 m, conforme fabricante, não houve grandes variações na corrente elétrica necessária para alimentar a bomba. O teste repetiu-se em mais cinco ocasiões, uma vez que os parâmetros sofreram pequenas variações. A Figura 28 ilustra o experimento realizado e a conexão do sistema.



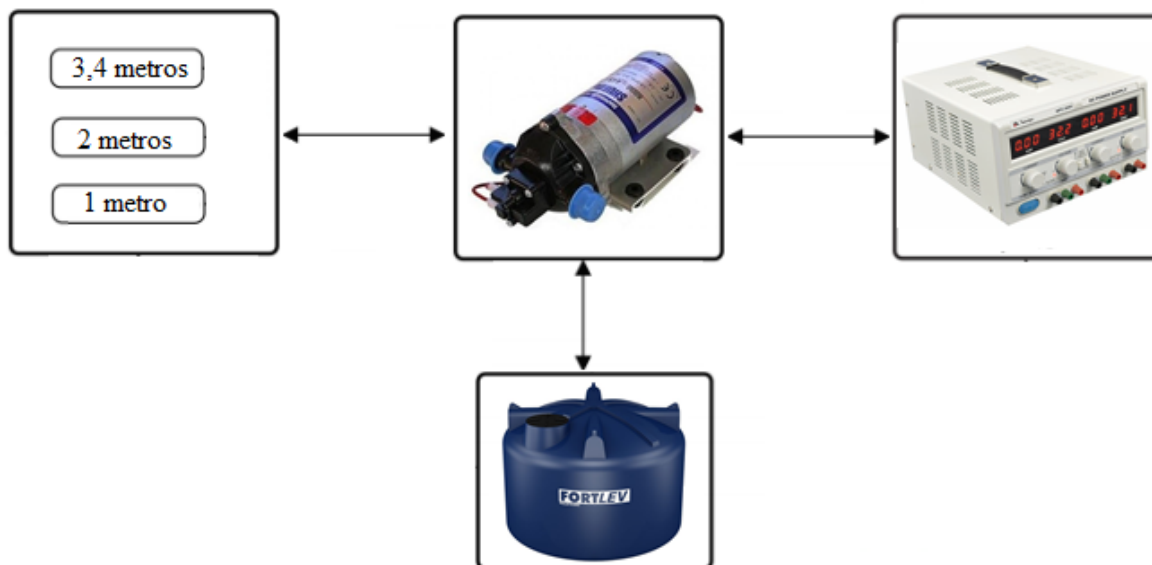


Figura 28 - Montagem do sistema de bombeamento de água utilizando uma fonte  
Fonte: Autoria própria

Estes ensaios foram necessários para verificar a capacidade de operação da bomba. Após este ensaio confirmou-se as características apresentadas pelo fabricante da conforme manual da Shurflo para o modelo Solar 12V 8000. Na próxima etapa será adicionado um módulo fotovoltaico para a substituição da fonte de alimentação e as alturas da coluna de água também serão aumentadas, visando observar o comportamento da tensão elétrica fornecida pelo módulo e o funcionamento da bomba de água. Posteriormente também será observado a temperatura das células do módulo e o funcionamento da bomba de água.

#### 4.2 TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA E MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

Os testes com o módulo fotovoltaico tiveram o auxílio de dois multímetros digitais para serem possíveis as aquisições de dados de tensão e corrente do módulo, sendo os dados gravados em sua memória interna, em intervalos programados de 1 em 1 segundo. Foram utilizados dois multímetros pelo fato de um conseguir fazer leituras referente à tensão (V) e um referente à corrente (A). Os multímetros através de uma bateria interna permitem fazer as medidas durante as seis horas consecutivas de trabalho, sem interrupção entre as leituras.

Para adotar um padrão de medida utilizou-se um recipiente de 13 l de água, juntamente com um cronômetro para medir o tempo que a bomba levou para preencher completamente o mesmo. Como a topografia do local das medições possui certo declive, foi utilizado um teodolito a fim de verificar o desnível e a distância em relação do sistema FV com a bomba

de água. É importante ressaltar que o desnível foi medido considerando a altura do solo e a bomba estava na altura da mesa do módulo a aproximadamente 0,3 m do solo. A distância em metros compreende do ponto onde está situado a bomba e o módulo até a caixa d'água.

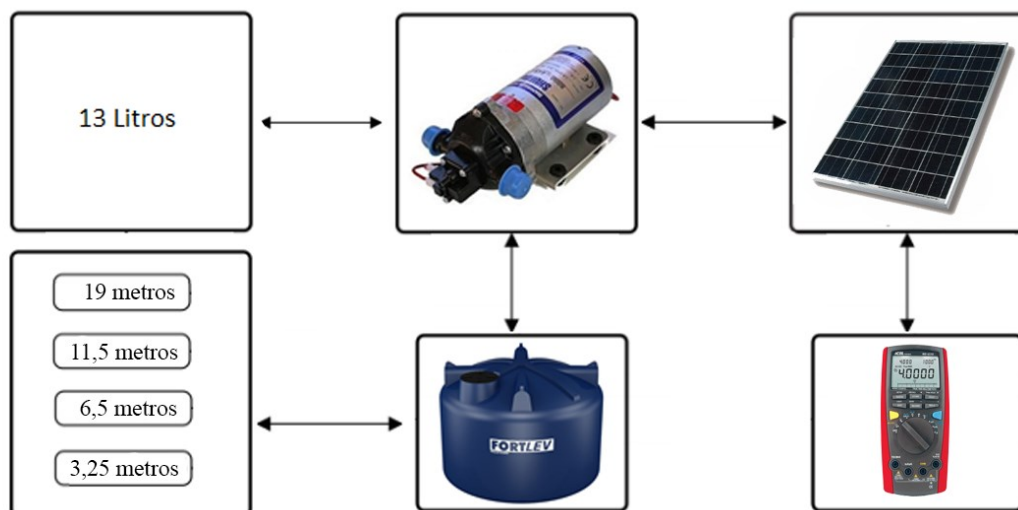


Figura 29 - Montagem do sistema de bombeamento de água utilizando o módulo fotovoltaico  
Fonte: Autoria própria

No dia 22 de outubro de 2020 fez-se o primeiro teste das 09h 00 min até as 15h 00 min, período que compreende a maior irradiância solar do dia, ou seja, maiores horas de pico do Sol. A fim de verificar o comportamento da bomba d'água utilizou-se a caixa d'água em quatro posições distintas. O primeiro ponto de medição (P1) compreendia a distância da bomba d'água até o tanque de armazenamento situado a uma distância de 3,25 m e com desnível de -1,220 m. A segunda posição (P2) compreendia a distância da bomba ao tanque de armazenamento por 6,5 m e desnível de -1,965. O terceiro ponto de medição (P3) estava a 11,5 metros e com desnível de -2,645 e o último ponto (P4) possuía distância de 19 m e desnível de -3,040.

Foram realizados os ensaios com a caixa d'água em quatro posições diferentes, conforme os pontos e desníveis apresentados na Figura 30, com o intuito de verificar o desempenho com a bomba em desnível e seu desempenho em superfícies não planas.



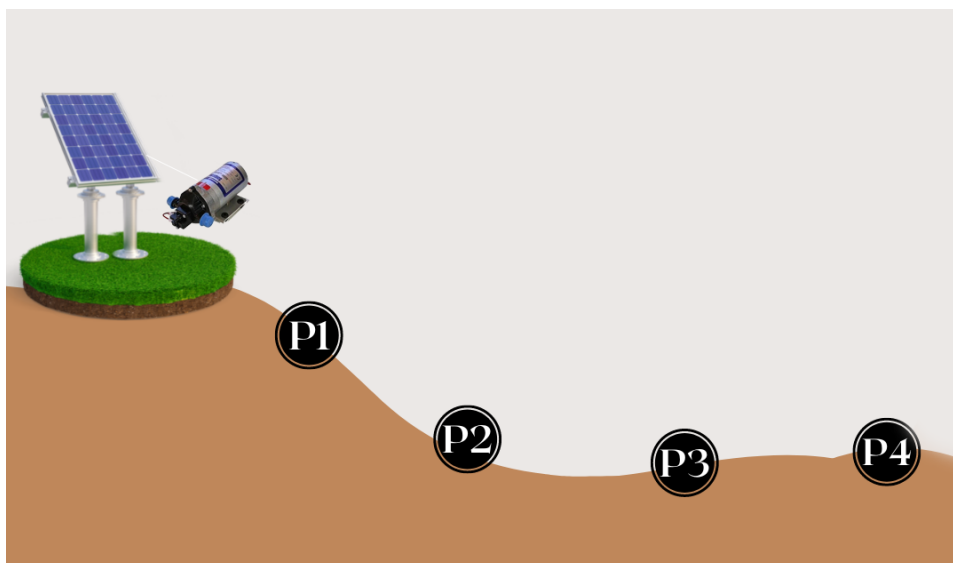


Figura 30 – Ilustração dos diferentes pontos utilizados com a caixa d'água e com diferentes declives  
Fonte: Autoria própria

Utilizou-se de um cronômetro para marcar o tempo que a bomba demorou para preencher o volume fixo 13 l conforme apresentado pela Tabela 8, com as principais variáveis de interesse referente ao primeiro experimento.

Tabela 8 – Desempenho do sistema de bombeamento de água em um dia ensolarado

Horário (hh:mm)	Distância (m)	Desnível (m)		Tempo (min:seg)	Temperatura (°C)	Irradiância Solar (W/m <sup>2</sup> )	Condição Meteorológica
09:00	3,25	P1	-1,220	4:48	20,5	484,2	Ensolarado
09:30	3,25	P1	-1,220	3:59	21,1	558,1	Ensolarado
10:00	3,25	P1	-1,220	3:35	22,5	650,0	Ensolarado
10:30	3,25	P1	-1,220	3:01	24,9	793,6	Ensolarado
11:00	6,5	P2	-1,965	2:27	26,9	869,2	Ensolarado
11:30	6,5	P2	-1,965	1:50	27,4	947,5	Ensolarado
12:00	6,5	P2	-1,965	1:46	28,8	1050,0	Ensolarado
12:30	6,5	P2	-1,965	1:59	30,0	925,2	Nuvens esparsas
13:00	11,5	P3	-2,645	1:45	29,9	1080,1	Ensolarado
13:30	11,5	P3	-2,645	1:43	30,7	1111,2	Ensolarado
14:00	11,5	P3	-2,645	1:47	30,4	1018,5	Ensolarado
14:30	19	P4	-3,040	1:48	30,1	1011,1	Ensolarado
15:00	19	P4	-3,040	2:38	28,2	885,1	Ensolarado

Neste dia de trabalho não houve nenhum grande sombreamento devido à nuvens que interferiu significativamente no tempo de vazão pela bomba em observação, apenas no

período das 12h 30 min houve nuvens esparsas, como mostra a Figura 31. Durante as seis horas de monitoramento constatou-se que à medida que a irradiância solar aumentava ao longo do tempo e mesmo com a distância em relação à bomba e o desnível aumentando, o tempo para preencher os 13 litros do recipiente foi decaindo até o horário das 12h 00 e se mantendo estável.

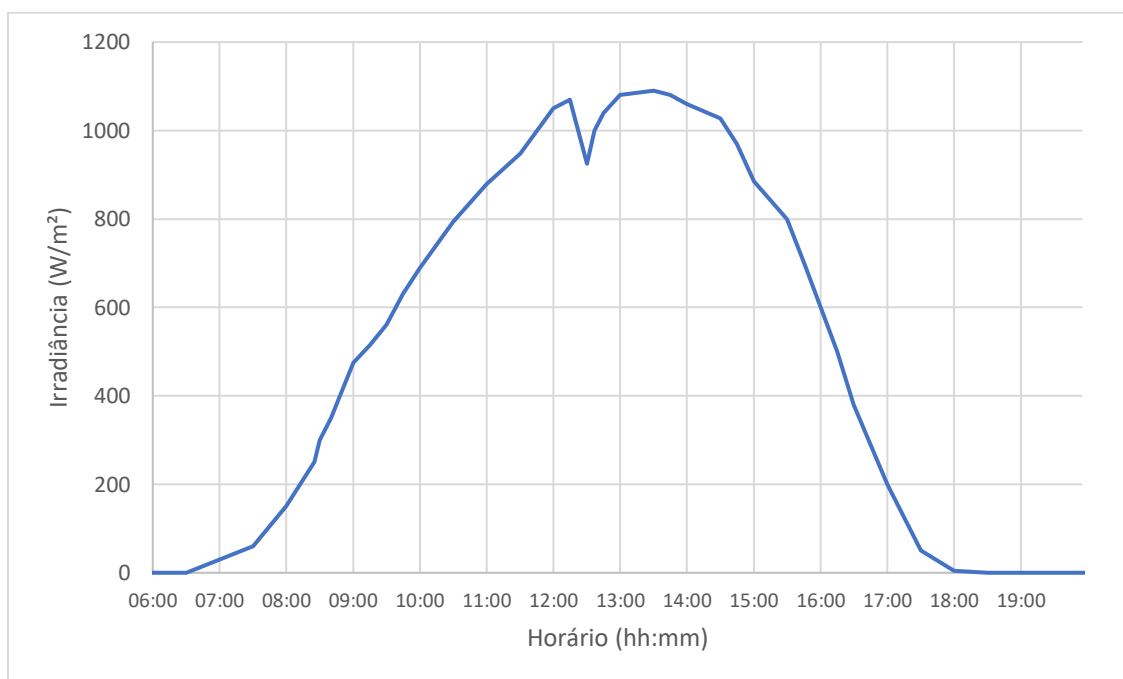


Figura 31 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 22 outubro de 2020  
Fonte: Autoria própria

Neste primeiro ensaio durante os diferentes desníveis e distâncias a bomba permaneceu, em todos os momentos, preencher o volume de água fixo de 13 l em funcionamento, conforme apresentado na Figura 32. A bomba d'água mesmo com o aumento da distância da caixa de água do primeiro ponto (P1) até o último local (P4), que chegou a 19 m e o declive a -3,040 m, e diminuiu constantemente o tempo para preencher o recipiente e após certo período se manteve praticamente estável.

Através dos valores coletados de corrente e tensão do módulo com o uso dos multímetros, foi possível traçar o gráfico da potência instantânea ao longo do tempo através da equação da Lei de Ohm, conforme demonstra a Figura 32. A partir das 11h 30min o tempo para preencher os 13 l se manteve com poucas variações pelo fato da irradiância solar e a temperatura ambiente se manter perto dos 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura ambiente próxima aos 30,0° C, sendo que o declive e a distância aumentaram neste período em relação aos primeiros

pontos (P1 e P2). Caso o declive e o desnível não fossem alterados, a bomba diminuiria o tempo para preencher o recipiente uma vez que os valores de potência instantânea aumentaram em relação ao horário das 11h 00min, exceto no período das 12h 30 min onde houve uma nuvem esparsa interferindo na irradiância solar e às 15h 00 min e a irradiância solar diminuiu e consequentemente aumentou o tempo para preencher o recipiente.

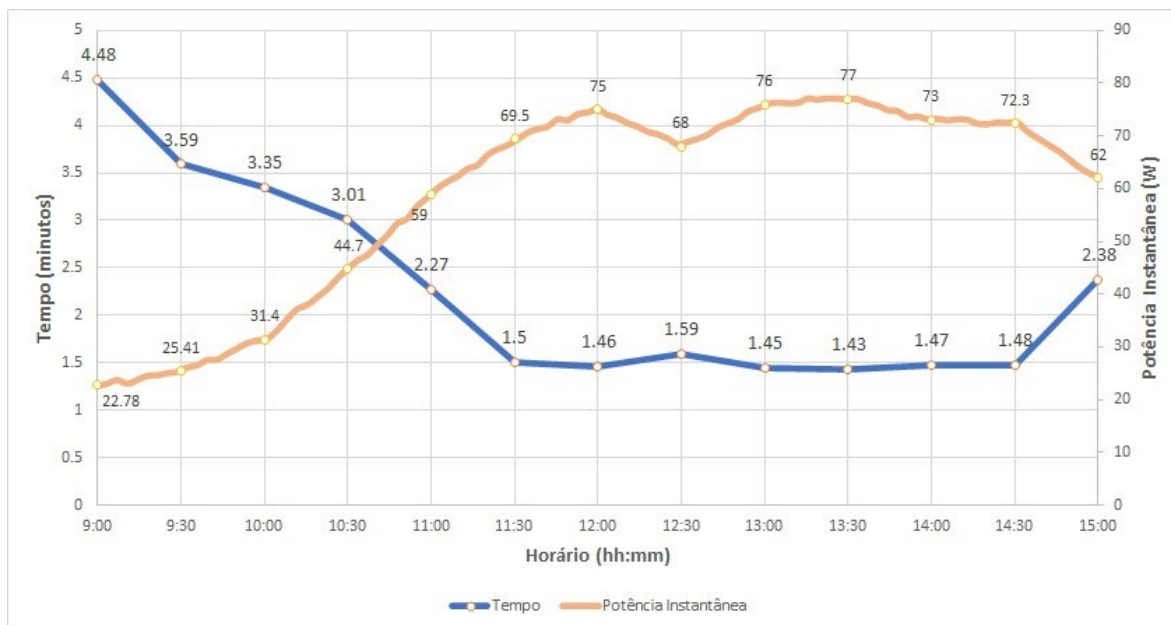


Figura 32 – Tempo e potência instantânea para a bomba preencher o volume fixo de 13 litros para um dia ensolarado

Fonte: Autoria própria

Na Figura 32 o valor de Potência máxima ( $P_m$ ) apresentado pelo módulo FV foi de 77 W, abaixo da potência máxima indicado pelo fabricante. Um possível motivo da queda de vida útil do módulo é devido ao seu tempo prolongado de uso, exposição ao sol e intempéries climáticas que acarretam em perdas, além do módulo não estar em condições de irradiância solar e temperatura em que são realizados os valores de  $P_m$ . Tanto a Kyocera, fabricante deste módulo utilizado quanto outros fabricantes informam perdas de aproximadamente 1% ao ano e que após os 25 anos de operação decorra uma possível diminuição da eficiência do produto e que o módulo solar produza de 20% a 25% menos energia.

Outro teste foi realizado no dia 25 de outubro de 2020 compreendendo o mesmo horário de medições, entre o período das 09:00 horas da manhã até as 15:00 horas da tarde. Neste dia diferente do primeiro teste houve alternância entre períodos ensolarados, nuvens esparsas e nublados conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Desempenho do sistema de bombeamento de água em um dia parcialmente nublado

Horário (hh:mm)	Distância (m)	Desnível (m)		Tempo (min:seg)	Temperatura (°C)	Irradiância Solar (W/m <sup>2</sup> )	Condição Meteorológica
09:00	3,25	P1	-1,220	5:35	17,2	393,2	Nuvens esparsas
09:30	3,25	P1	-1,220	4:50	18,4	508,9	Ensolarado
10:00	3,25	P1	-1,220	3:45	20,1	610,0	Ensolarado
10:30	3,25	P1	-1,220	3:28	22,2	673,6	Ensolarado
11:00	6,5	P2	-1,965	4:21	22,1	609,2	Nublado
11:30	6,5	P2	-1,965	3:07	25,0	747,5	Nuvens esparsas
12:00	6,5	P2	-1,965	4:43	24,5	522,2	Nublado
12:30	6,5	P2	-1,965	2:44	26,0	847,5	Nuvens esparsas
13:00	11,5	P3	-2,645	2:27	28,5	966,2	Ensolarado
13:30	11,5	P3	-2,645	2:24	27,3	972,2	Ensolarado
14:00	11,5	P3	-2,645	2:54	27,1	802,3	Nublado
14:30	19	P4	-3,040	2:50	26,8	822,0	Nublado
15:00	19	P4	-3,040	2:40	28,1	868,5	Ensolarado

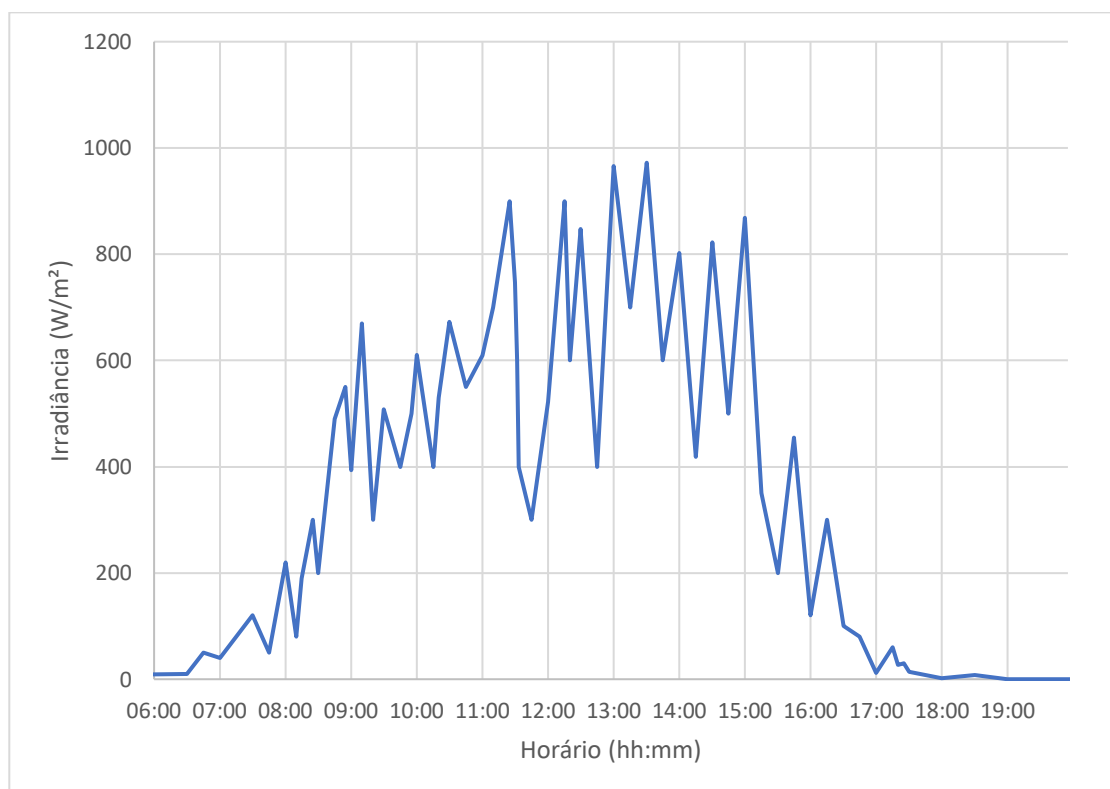


Figura 33 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 25 outubro de 2020

Fonte: Autoria própria

Neste dia foi possível observar bruscas variações da irradiância solar acarretando em um maior tempo para a bomba preencher o volume fixo de água, aumentando o tempo em diversos períodos em relação ao primeiro teste. Foi possível constatar que em comparação ao primeiro teste onde o dia se manteve ensolarado em boa parte do tempo avaliado, neste segundo teste a bomba aumentou os tempos para preencher o volume de 13 litros quando a distância e o declive aumentaram, pelo fato dos índices de irradiância solar e temperatura se manterem abaixo dos  $1000 \text{ W/m}^2$  em praticamente todo o teste e a temperatura ambiente não ultrapassar a faixa dos  $30,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A potência instantânea para o segundo teste alternou em diferentes períodos do dia, chegando a no máximo  $66 \text{ W}$  as 13h 30 min, onde diferentemente do primeiro teste chegou a marcar valores próximos a  $77 \text{ W}$ . Observa-se neste teste a influência dos períodos nublados na conversão energética do módulo e consequentemente na eficiência do sistema, como por exemplo no horário das 12h 00 min que é um período considerado de pico de irradiação e com altos índices de irradiância solar pela época do ano, neste teste seu valor estava apenas em  $522,2 \text{ W/m}^2$ , fazendo com que a potência da bomba ficasse em apenas  $23,4 \text{ W}$  e desta forma a mesma levou o tempo de 4 min e 43 segundos para preencher o recipiente.

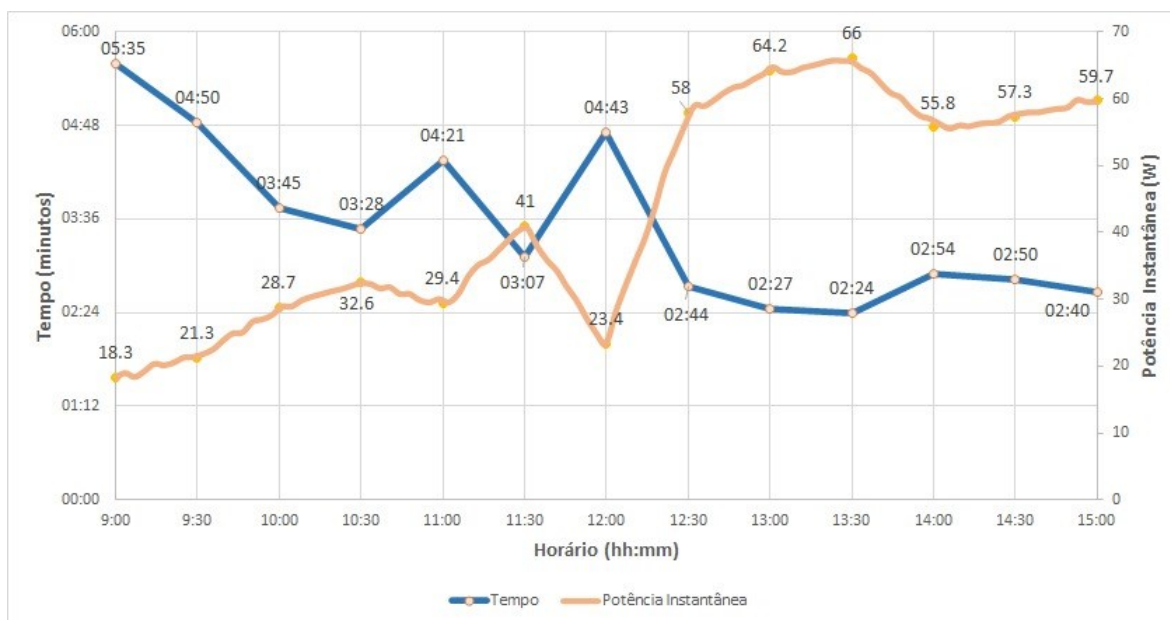


Figura 34 – Tempo e potência instantânea para a bomba preencher o volume fixo de 13 litros para um dia parcialmente nublado  
Fonte: Autoria própria

Na etapa seguinte do trabalho fez-se os testes com a bomba d'água e módulo FV utilizando-se as redes de Bragg. É importante ressaltar também que em outros períodos do

dia a bomba foi testada, apenas com maiores valores para preencher o volume fixo e em potências menores, porém preferiu-se por apresentar apenas os horários de maior relevância dentro do experimento.

### 5.1 TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA E MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM UM DIA ENSOLARADO

No dia 02 de novembro de 2020 fez-se o experimento com o uso das redes de Bragg sendo possível verificar a temperatura do módulo em regime de trabalho no início e fim de operação do sistema. Neste teste o período do sistema foi analisado no horário compreendido das 8h 00min até as 18h 00 min. Alterou-se o desnível compreendendo os mesmos horários dos testes sem os sensores FBGs, exceto antes das 09h 00 min que o sistema ficou no declive P1 e após as 15h 00 min retornou ao declive P1.

Durante este experimento em seis horários comparou-se a temperatura dos sensores apresentados no *software* de sistema e aquisição de dados dos sensores FBGs em confronto com o *software* SmartView 4.4 do fabricante da câmera térmica, pois este possibilita a determinação da temperatura em cada pixel da imagem. A diferença máxima de temperatura dos sensores FBGs e da câmera térmica foi de 2,6 °C referente ao sensor C3\_S4 no horário das 10h 00 min, uma vez que o valor medido pela FBG foi de 42,9 °C e da câmera de 40,3 °C, demonstrado nas Tabela 10 e 11. Com isto comprovou-se um bom contato entre o vidro do módulo fotovoltaico e a fibra, não ocasionando sombra no local onde estavam instalados os sensores FBGs.

Tabela 10 – Valores de temperatura medidos pelos sensores FBGs

Horário (hh:mm)	Temperatura dos sensores (°C)															
	Cordão 1						Cordão 2				Cordão 3					
	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S4	S3	S2	S1	S5	S4	S3	S2	S1
08:00	16,6	19,0	17,4	17,2	16,0	17,5	18,9	18,9	19,2	18,6	18,4	18,8	16,5	17,1	17,5	16,1
10:00	39,5	43,3	40,2	40,5	40,9	41,5	40,3	44,4	45,9	42,3	44,0	43,1	42,9	42,8	40,8	39,8
12:30	52,2	54,9	53,3	53,5	52,4	53,0	52,7	54,3	55,4	55,2	54,3	56,2	53,9	52,6	54,8	52,0
14:00	55,2	58,3	54,0	53,4	53,0	54,5	52,8	56,0	58,3	57,9	52,5	58,2	53,8	54,7	54,6	52,9
16:00	35,8	39,2	35,8	41,0	37,9	38,3	36,9	40,3	40,6	38,6	35,1	39,0	38,5	37,7	37,2	35,2
18:00	14,4	17,3	15,5	16,5	15,7	15,2	15,3	16,8	18,1	17,8	16,1	16,4	15,6	14,9	16,4	14,9

Tabela 11 – Valores de temperatura medidos pela Câmera IR

Horário (hh:mm)	Temperatura medida pela câmera IR no local dos sensores (°C)															
	Cordão 1							Cordão 2				Cordão 3				
	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S4	S3	S2	S1	S5	S4	S3	S2	S1
08:00	16,1	18,6	17,1	17,5	17,0	18,3	18,0	17,4	18,8	16,1	16,8	18,8	16,6	15,4	16,9	15,8
10:00	37,9	43,0	40,1	38,9	41,3	41,2	40,3	45,3	46,1	41,7	43,8	41,6	40,3	41,1	38,9	39,3
12:30	51,7	52,7	52,3	53,7	53,6	54,1	51,6	51,9	55,2	56,5	54,2	56,7	54,8	51,9	54,2	54,3
14:00	54,1	57,5	52,6	53,6	51,0	52,2	53,0	55,2	56,2	57,8	52,6	57,0	52,9	55,1	53,9	53,4
16:00	34,9	38,1	35,0	42,3	38,7	39,6	37,1	40,2	40,9	37,0	33,1	42,0	40,0	38,2	39,6	34,1
18:00	14,7	18,0	14,1	14,6	14,9	15,9	14,8	16,4	16,8	18,0	15,5	16,0	16,2	14,0	15,8	14,2

Um ponto positivo dos sensores FBGs e que se destacam na medição multiponto em módulos FV é o fato de através de um *software* ser possível monitorar em tempo real a temperatura de diversas células. Com o uso da câmera IR, técnica mais utilizada atualmente, exige-se que um operador monitore o módulo FV sendo exposto à diversas intempéries climáticas, acarretando em uma dificuldade em dias de tempestade, chuvosos ou de ventos fortes no caso em que o sistema apresente alguma falha, como, por exemplo desconexão de módulos, incêndio no local do sistema ou sombreamentos indesejáveis. Com o uso do monitoramento das células em sistemas de bombeamento de água e também em sistemas de compensação de créditos (*on-grid* ou *off-grid*) seria possível evitar perdas financeiras significativas, através de um acompanhamento da temperatura das células aumentando a vida útil do sistema.

Pelo motivo da data da pesquisa ser em uma estação do ano próximo ao verão, ou seja, períodos do ano de maior irradiância solar, faz com que o módulo FV produza mais energia e consequentemente o sistema de bombeamento de água inicie seu funcionamento mais cedo, em relação ao inverno. Durante este ensaio de aproximadamente dez horas o módulo fotovoltaico foi exposto às variações térmicas provocadas principalmente pela incidência solar (Figura 35), temperatura ambiente e velocidade dos ventos sendo analisadas em conjunto com a temperatura dos sensores FBGs, pois estas intempéries climáticas interferem diretamente na produção de energia do sistema solar de bombeamento de água (HICKEL, 2017).

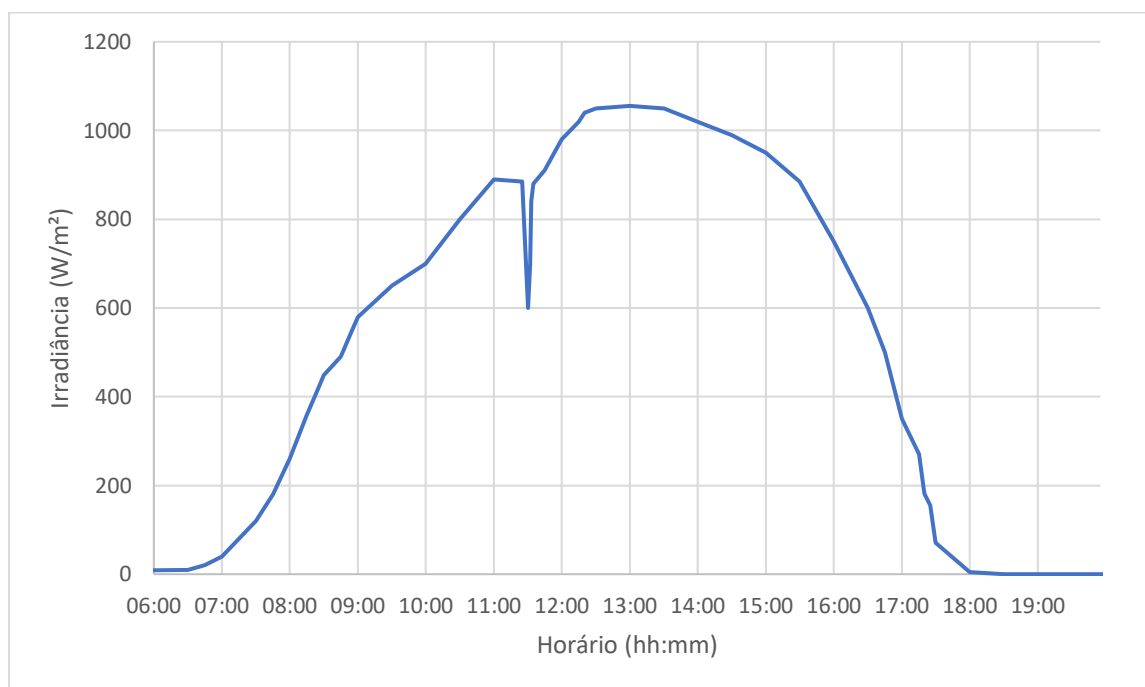


Figura 35 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 02 de novembro de 2020  
Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 36 foi possível verificar o início da operação do bombeamento de água aproximadamente às 8h 15 min com o sistema operando em uma irradiância solar na ordem de 358,24 W/m<sup>2</sup>, potência instantânea de 10,92 W e temperatura ambiente em 17,0 °C. No início do sistema, às 8h 15 min foi calculado a média de temperatura de todos os sensores FBGs que ficou em aproximadamente 22,58 °C, com uma temperatura máxima de 23,93 °C identificada pelo sensor C2\_S3 e mínima de 21,37 °C referente ao sensor C3\_S1, compreendendo uma variação de 2,56 °C entre todos os sensores. O valor da irradiância solar as 09h 00 min obteve o valor de 587,3 W/m<sup>2</sup>, elevando a potência do sistema para 23,3 W. Desde o início das medições, a irradiância solar foi elevando seus valores e consequentemente a potência do sistema, exceto em um período de nuvens das 11h 00min às 11h 30 min, sendo que ao meio-dia solar atingiu seu valor máximo de irradiância em 1055,5 W/m<sup>2</sup>.



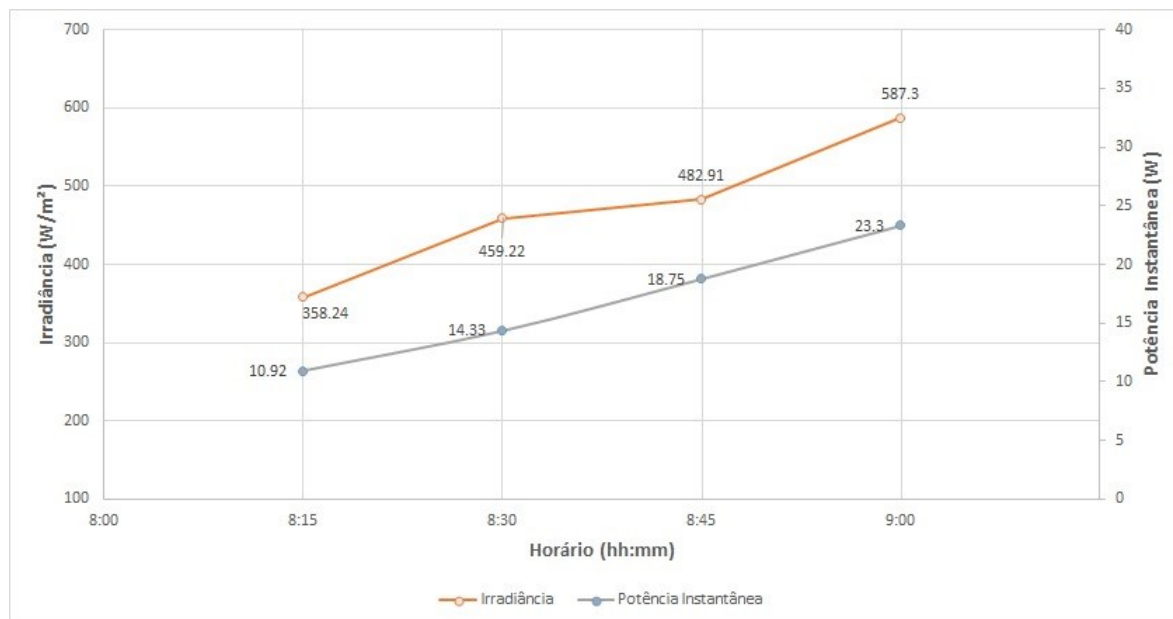


Figura 36 – Potência instantânea e irradiância solar no início de operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.

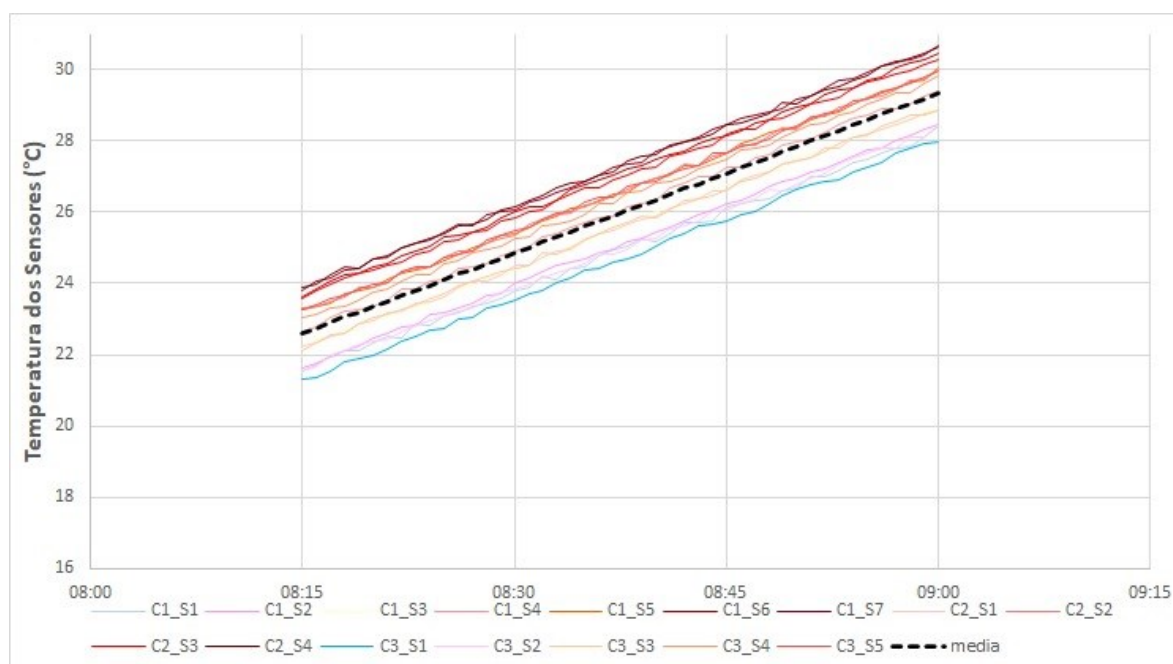


Figura 37 – Temperatura dos sensores FBGs no início de operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 37, observou-se que quando a temperatura medida pelos sensores FBGs sobre as células estavam na faixa de temperatura compreendida entre 21,38 °C e 23,88 °C o sistema entrou em operação, ou seja, o módulo FV permitiu através de uma potência instantânea de 10,92 W fazer com que a bomba d'água inicie sua operação.

Em relação a temperatura das células do módulo fotovoltaico foi possível constatar a partir da Figura 37 que os sensores que apresentaram as temperaturas mais altas (C2\_S3, C2\_S2, C2\_S4, C1\_S6, C3\_S5) estavam localizados na área superior central do módulo. Os sensores que apresentaram as menores temperaturas estavam localizados nas laterais do módulo e na parte inferior (C1\_S1, C1\_S3, C1\_S7, C3\_S1), uma vez que os sensores que estiverem perto das bordas, próximos das estruturas de alumínio, funcionarão como dissipadores de calor.

Realizou-se a leitura da vazão no sistema as 9h 00 min e o mesmo marcou o tempo de 4 min e 55 s para preencher os 13 l, valores próximos aos compreendidos no teste anterior sem a FBG, evidenciando que as fibras não ocasionaram sombras e não interferiram na produção de energia do módulo. As condições ambientais observadas durante o período compreendido do ensaio no primeiro dia são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Condições ambientais observadas durante a realização do experimento I com sensores FBGs

Variável ambiental	Mínimo	Máximo	Médio
Temperatura ambiente (°C)	15,7	32,1	22,3
Irradiância solar (W/m <sup>2</sup> )	125,8	1055,5	666,3
Velocidade do vento (m/s)	1,3	22,0	4,5

Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 apresenta o gráfico da média da temperatura dos sensores FBGs instalados sob a superfície do módulo fotovoltaico no horário das 11h 00 min até 11h 40 min, sendo o único período de variação significativa da irradiância solar às 11h 30 min neste dia indo de 835,2 W/m<sup>2</sup> a 600 W/m<sup>2</sup> devido à nuvens, uma vez que a média da temperatura dos sensores sofreu variação significativa.

A vazão do sistema no horário 11h 00 min situado na posição P2 levou o tempo de 2 min 43 seg para preencher o recipiente e as 11h 30 min caiu consideravelmente seu desempenho, pela influência da irradiância decair sendo que no horário das 11h 30 min com o tempo de 3 min 48 seg para o mesmo declive. A potência instantânea foi de 69,6 W às 11h 00 min e 26,5 W às 11h 30 min.

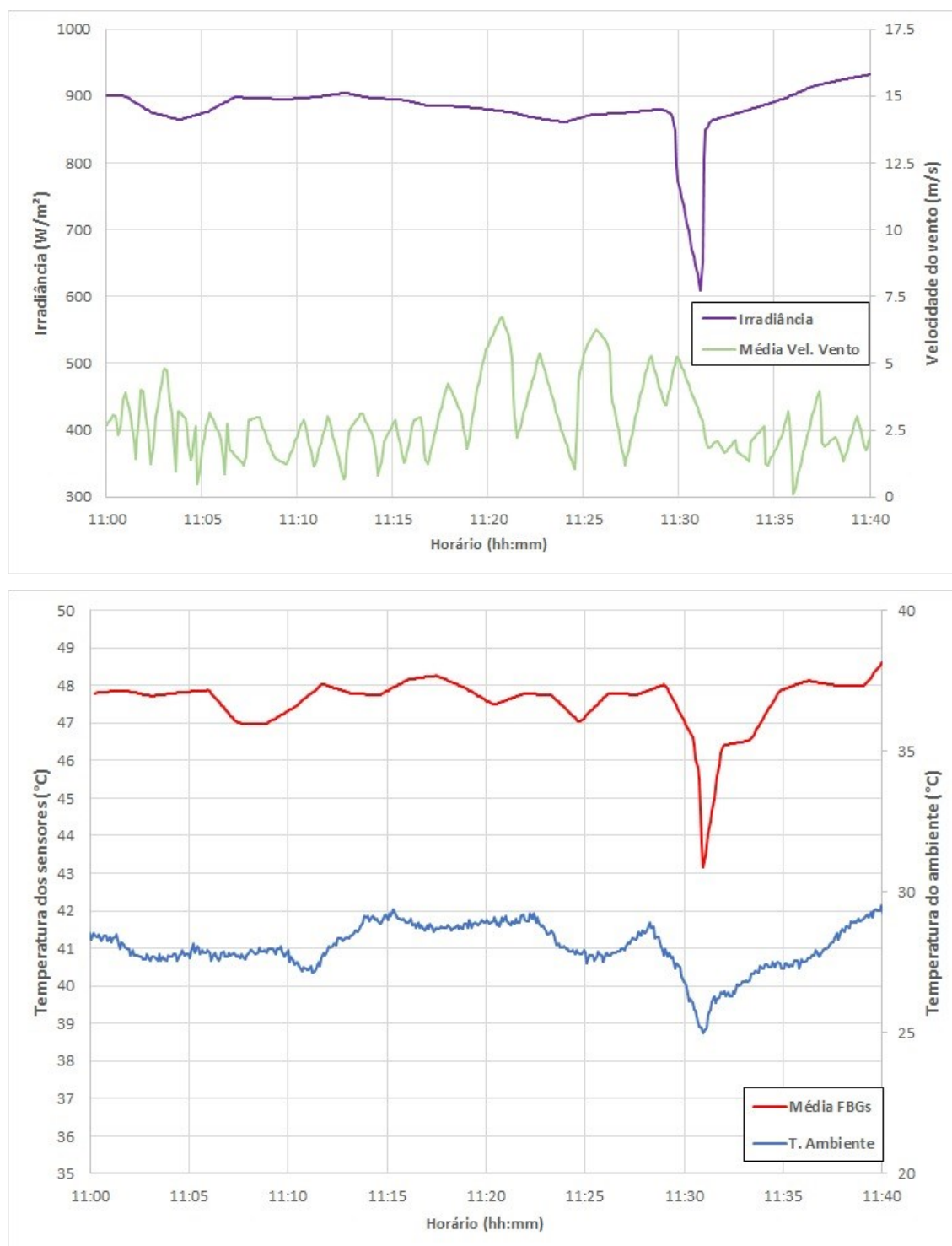


Figura 38 – Influência da intensidade da irradiância solar nas FBGs  
Fonte: Autoria própria.

Fez-se a análise do sistema ao final do dia para verificar o horário de desligamento da bomba, em conjunto com a potência do sistema e irradiância solar que decaiu conforme o horário passava de forma linear. Após o período das 17h 15 min a bomba cessou o seu funcionamento, onde estava situada no ponto P1.

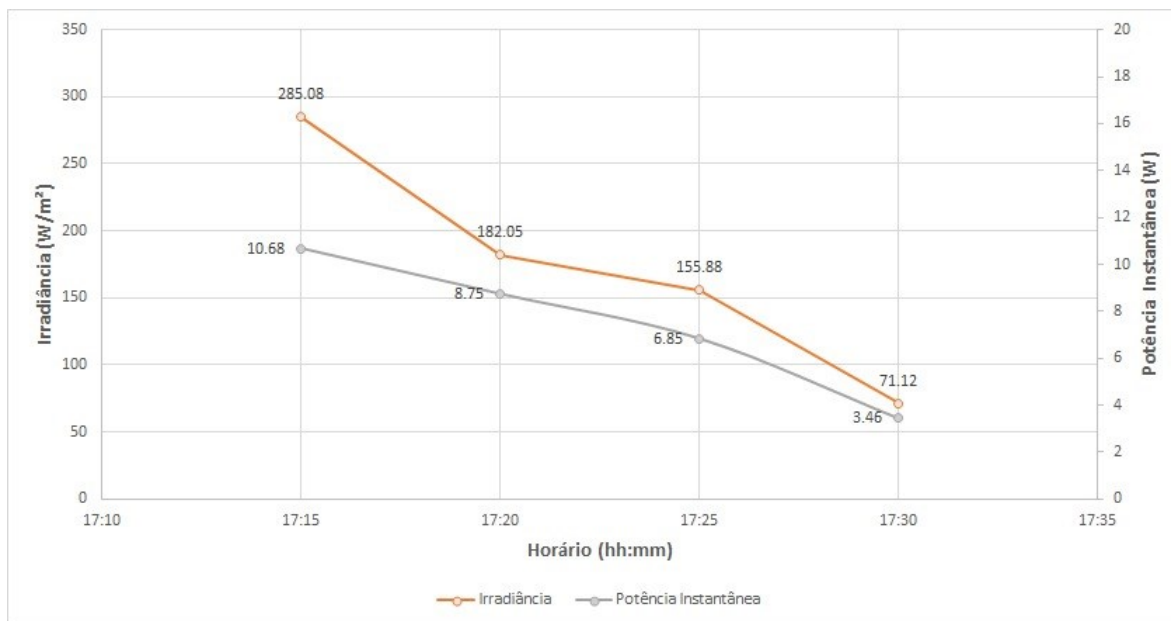


Figura 39 – Potência instantânea e irradiância solar no fim de operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.

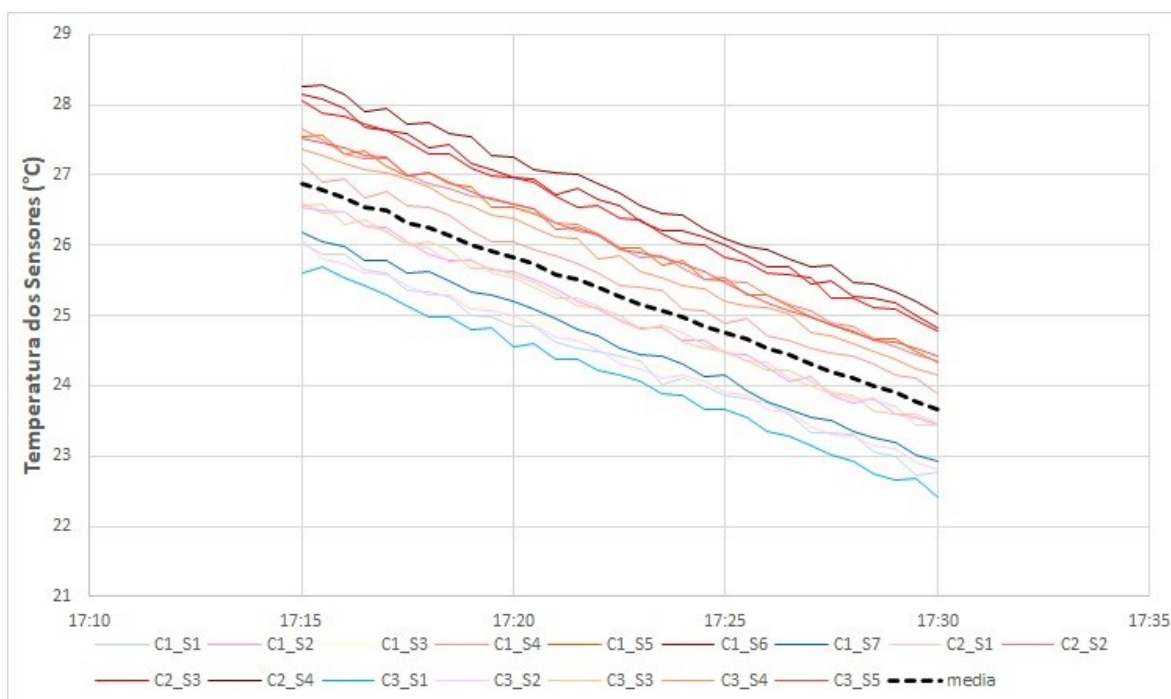


Figura 40 – Temperatura dos sensores FBGs no fim de operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.

A partir das 17h 15 min o sistema de bombeamento de água cessou o seu funcionamento, uma vez que a faixa de temperatura medida pelos sensores ficou entre  $25,75^{\circ}C$  a  $28,39^{\circ}C$ , sendo que a média da temperatura dos sensores FBGs neste horário ficou em  $26,88^{\circ}C$ . A partir do decaimento da potência instantânea para 10,68 W o módulo solar não foi capaz de

fornecer energia suficiente para a bomba, sendo que o valor da irradiância solar a partir deste horário decaiu de forma acentuada.

## 5.2 TESTES COM A BOMBA D'ÁGUA E MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM UM DIA PARCIALMENTE NUBLADO

Foi realizado um segundo ensaio no dia 05 de novembro de 2020 com os cordões FBGs a fim de verificar o comportamento do sistema em um dia com muitas nuvens e chuva no período da tarde, apresentando o gráfico da irradiância solar na Figura 41. Diferente do primeiro teste onde a irradiância esteve com poucas variações em seu valor, neste teste houve alternância significativa e o início e fim da operação estiveram em um período de menos de 4 h de trabalho.

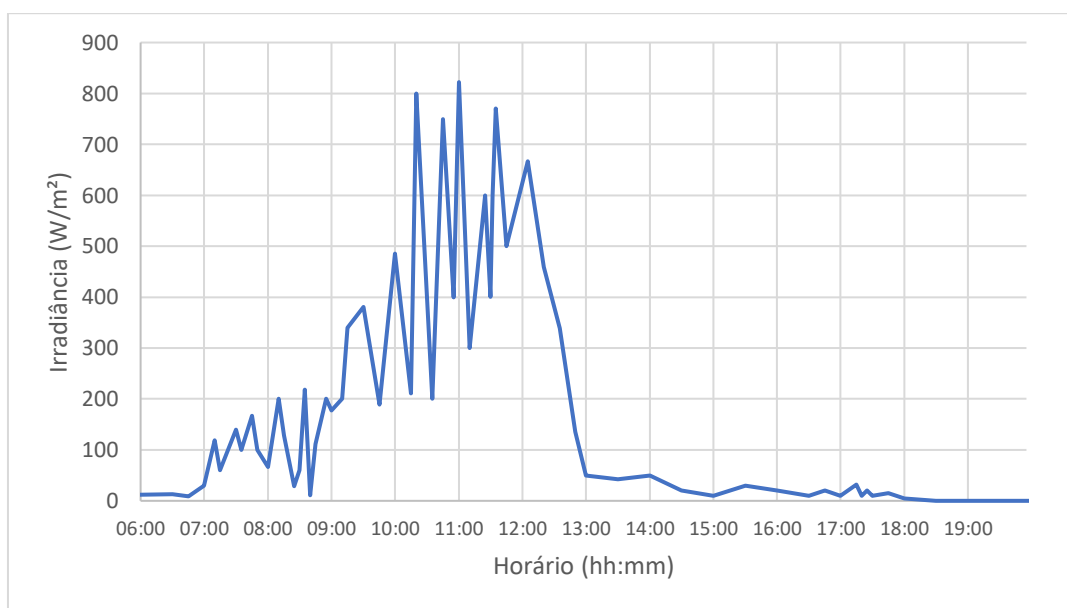


Figura 41 – Irradiância solar global medida na estação de pesquisa EPESOL, em 05 de novembro de 2020  
Fonte: Autoria própria

As condições ambientais observadas durante o período compreendido do ensaio no primeiro dia são apresentadas na Tabela 13. Observa-se que a irradiância solar não ultrapassou os 822,3 W/m<sup>2</sup>, sendo que no primeiro experimento atingiu valores superiores a faixa de 1000 W/m<sup>2</sup>. Após o horário das 13h 00 min a irradiância decaiu seus valores pelo fato de iniciar um período chuvoso, sendo que o tempo permaneceu assim até o fim do dia, fazendo com que os valores de irradiância não ultrapassassem os valores de 50W/m<sup>2</sup>.

Tabela 13 – Condições ambientais observadas durante a realização do experimento II com sensores FBGs

Variável ambiental	Mínimo	Máximo	Médio
Temperatura ambiente (°C)	12,4	29,3	23,5
Irradiância solar (W/m <sup>2</sup> )	30,0	822,3	426,15
Velocidade do vento (m/s)	1,91	27,08	6,5

Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 demonstra o funcionamento do sistema que iniciou o bombeamento de água somente as 9h 15 min, pois com o período nublado o sistema recebeu baixos valores da irradiância solar. Antes do horário das 9h 15 min o valor da irradiância sempre apresentou valores abaixo de 340,0 W/m<sup>2</sup> que impossibilitou o início de funcionamento da bomba. No horário das 9h 45 min o sistema pela baixa irradiância (passagem de nuvens) e potência instantânea se desligou retornando ao funcionamento somente as 10h 00min onde o valor da irradiância foi a 485,12 W/m<sup>2</sup>. O tempo para preencher o recipiente na inicialização do sistema foi de 5 min e 52 seg. No horário das 09h 30 min o sistema ficou sem funcionamento as retornando as 10h com a vazão de 4 min 55 seg.

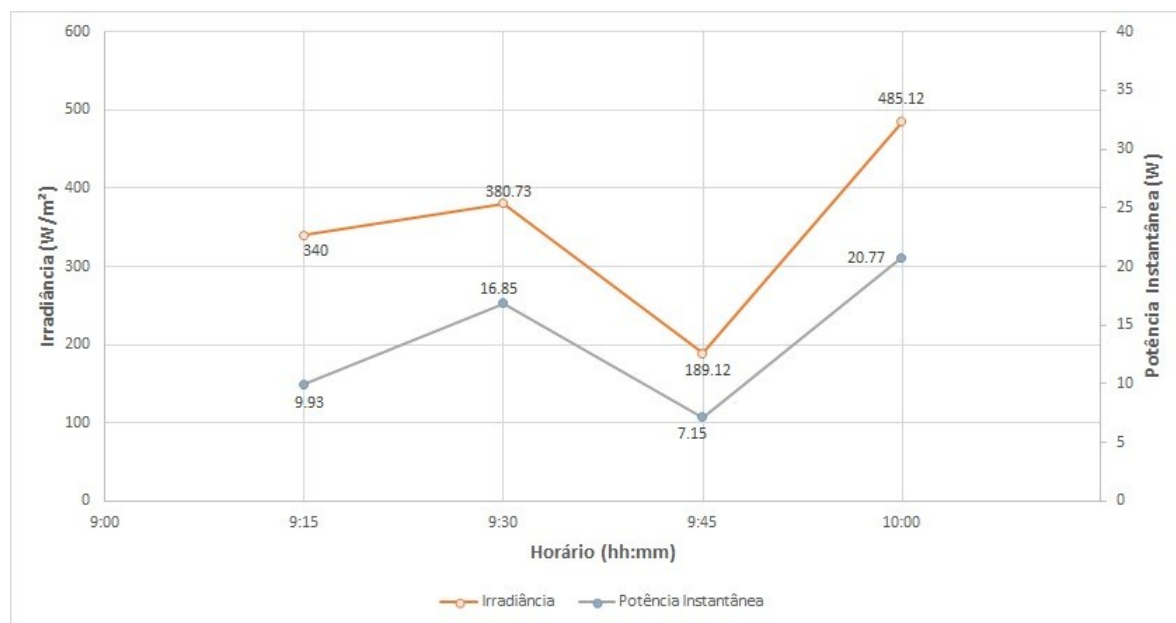


Figura 42 – Potência instantânea e irradiância solar no início de operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 demonstra a temperatura medida pelos sensores FBGs no início de operação do sistema de bombeamento de água, às 09h 15 min, sendo que apresentaram uma média de 22,68 °C. Quando o módulo FV, no início da operação do sistema, foi capaz de fornecer

energia necessária para a bomba d'água entrar em funcionamento, a temperatura dos sensores estava na faixa de 21,27 °C a 24,16 °C.

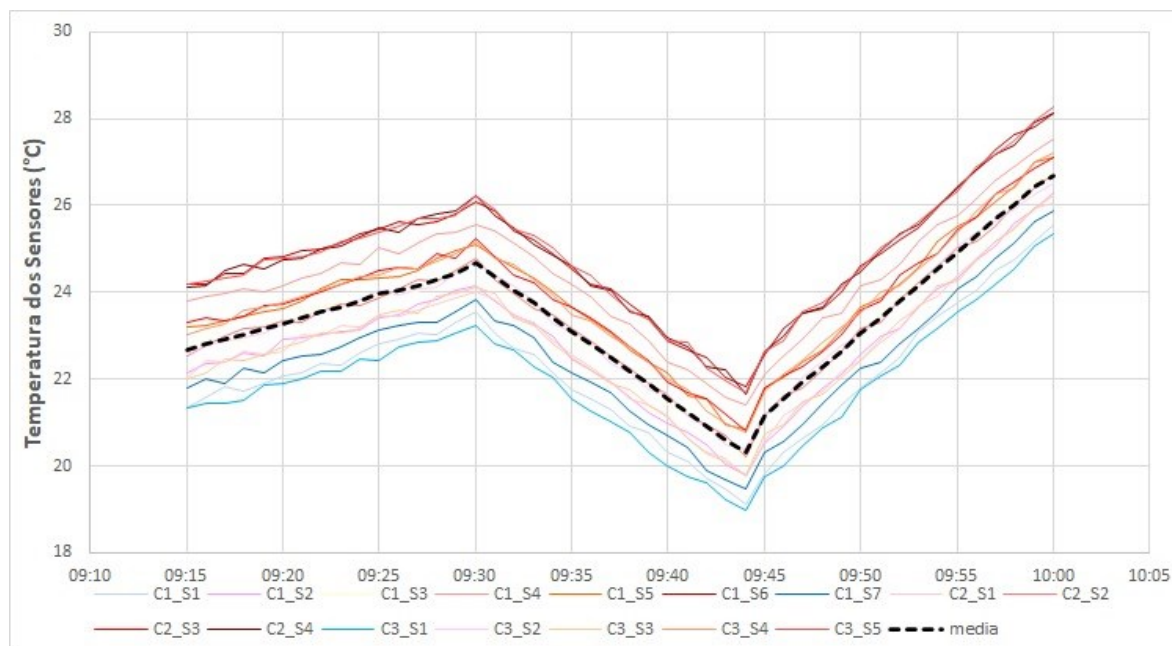


Figura 43 – Temperatura dos sensores FBGs no início de operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.

Neste experimento, Figura 44, analisou-se o final da operação que ocorreu as 12h 50 min pelo fato de a radiação solar incidente decair de 666,99 W/m<sup>2</sup> para 135,34 W/m<sup>2</sup> em um curto período de tempo de aproximadamente 45 min. Isto se deu pelo fato de fortes ventos (acima de 15 m/s) e uma leve garoa iniciar a partir das 12h 35 min. Após o horário das 12h 50 a potência instantânea estava em 6,9 W/m<sup>2</sup> sendo que a bomba não iniciou seu funcionamento, pois os valores de irradiância solar não ultrapassaram os 50,00 W/m<sup>2</sup> e desta forma o módulo fotovoltaico não possuía energia suficiente para alimentar a bomba d'água.

Com o fim da operação do sistema as 12h 50 min a média da temperatura dos sensores ficou em 24,84 °C. Neste horário a faixa de temperatura medida pelos sensores FBGs ficou entre 22,58 °C a 27,11 °C. Com o intuito de demonstrar os efeitos do resfriamento das áreas laterais do módulo, optou-se por escolher cores mais claras (tons de azul) para as menores temperaturas e mais fortes (tons de vermelho), evidenciando a contribuição de cada um para a determinação da temperatura média do módulo FV.

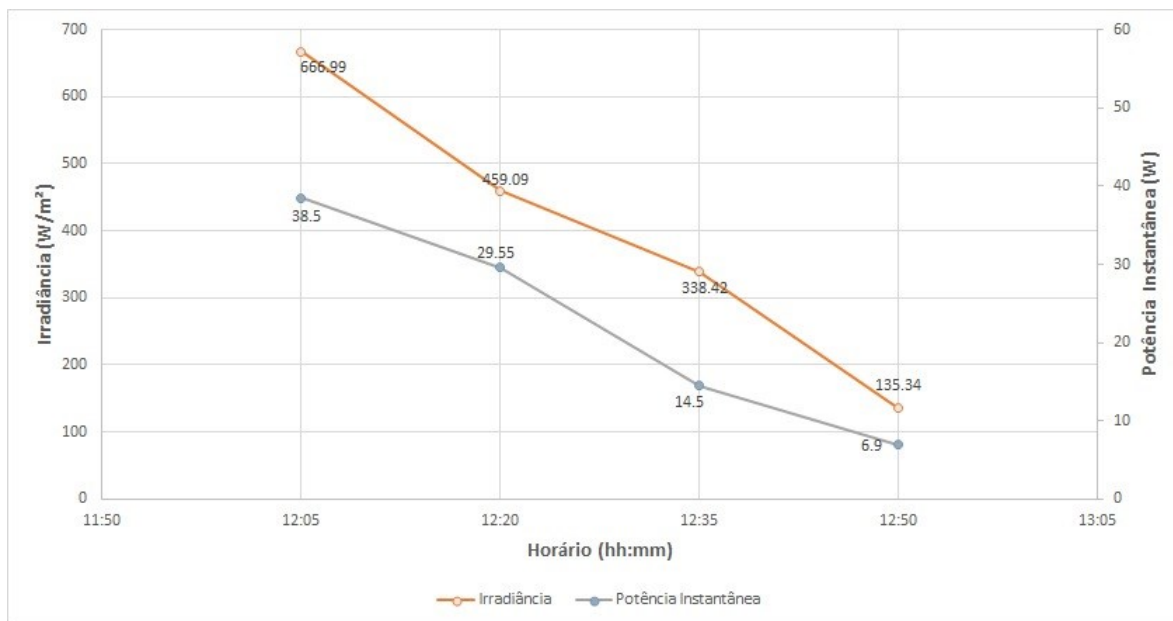


Figura 44 – Potência instantânea e irradiância solar no final da operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.

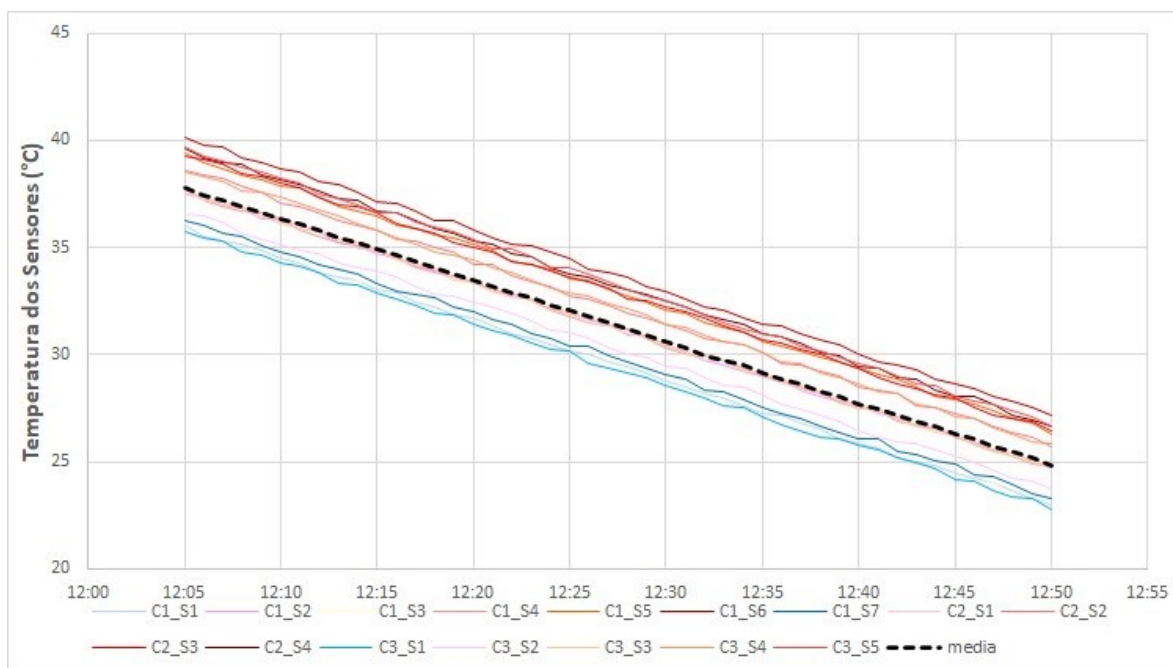


Figura 45 – Temperatura dos sensores FBGs no fim de operação do sistema de bombeamento de água  
Fonte: Autoria própria.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos experimentos e ensaios, é possível constatar a relação direta de variáveis climáticas (irradiância solar, velocidade do vento, temperatura ambiente) com a temperatura do módulo e dos sensores e a vazão da bomba d'água. Durante as medidas foi possível com o uso das FBGs monitorar a temperatura das células durante o início e fim de operação do sistema de bombeamento de água, em diferentes dias e condições climáticas, principalmente com índices de irradiância solar distintas. A temperatura medida pelos sensores FBGs para o início de operação do sistema permaneceu em uma faixa compreendida de 21,27 °C a 24,16 °C. Em relação ao final da operação do sistema, a faixa de temperatura dos sensores ficou entre 22,58 °C a 28,39 °C.

Na comparação ao longo dos testes a temperatura das células medidas pela câmera térmica e os sensores FBGs apresentaram uma diferença máxima de 2,6 °C, comprovando um bom contato térmico utilizando o método de encapsulamento e a técnica de fixação dos sensores FBGs com a pasta térmica sobre o módulo fotovoltaico.

Atualmente os sistemas solares fotovoltaicos possuem o monitoramento apenas da energia injetada e possuem grandes dificuldades em relação ao monitoramento individual de módulos fotovoltaicos, sendo possível interpretar apenas erros no sistema como um todo e não em um local exato. Através do *software* de monitoramento dos sensores FBGs foi possível visualizar que uma modificação na irradiância solar implica em uma rápida variação dos sensores, sendo uma grande vantagem em relação aos métodos de monitoramento utilizados atualmente. Além dessa aplicação, os sensores ópticos conseguem atender a vários requisitos que os sensores convencionais não se encaixam, sendo um deles o monitoramento contínuo aqui apresentado, juntamente com um tempo de leitura rápida verificado principalmente em oscilações de irradiância de temperatura pelos sensores FBGs. Outro ponto positivo é que devido as suas dimensões, é possível colocar os sensores muito próximo das células, em comparação aos sensores tradicionais.

Em grandes sistemas de geração e de bombeamento de água o sistema com o uso das FBGs mostra-se ser útil e capaz de monitorar a temperatura dos módulos fotovoltaicos em tempo real e com tempo de resposta rápido, detectando falhas que podem ser corrigidas de forma rápida, não acarretando em perdas de vazão de água. Em locais onde há certa altura de instalação de sistema fotovoltaico (coberturas de empresas, edifícios com vários andares) os sensores FBGs se destacam pois mesmo com o uso de EPIs e normas de segurança vigentes

a única técnica que se demonstrou eficiente atualmente é o uso de uma câmera IR para mapeamento térmico do módulo, sempre associado ao elevado risco de queda.

Em aplicações onde torna-se necessário monitorar um conjunto de painéis os sensores FBGs se destacam, pois com um cabo de fibra seria possível monitorar diversos painéis instalados no conjunto. Com isto, se traria uma grande vantagem em relação à manutenção (feita atualmente com câmeras térmicas) de vários painéis instalados para produção de energia elétrica ou em sistemas de irrigação, para se conhecer eventuais problemas (células afetadas ou com defeito, com trincas) uma vez que em alguns locais o acesso torna-se difícil, pela técnica empregada atualmente.

Outra possibilidade, com foco na célula fotovoltaica, fazendo uso das FBGs é que a partir do monitoramento individual das células seria possível evidenciar pontos quentes (*hot spots*), que são áreas de temperatura elevada que podem afetar de forma significativa a eficiência do módulo solar durante a geração de energia. Dentre as vantagens de um sistema de monitoramento de células com o uso das FBGs em um sistema de bombeamento de água composto por mais de um módulo, é que através da temperatura dos sensores em certa célula em particular (que apresente uma temperatura muito baixa ou elevada) pode-se ter uma aproximação de qual módulo está defeituoso e detectar um erro de forma precisa e rápida.

Para trabalhos futuros pode-se utilizar de uma segunda configuração do sistema de bombeamento de água para ser possível o armazenamento de energia, em baterias, sendo necessário um controlador de carga. Neste arranjo com bateria o tanque de armazenamento pode ser abastecido com água tanto à noite como em períodos de baixa irradiação solar. A bateria assegura a irrigação em dias que a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos não seja suficiente para suprir a demanda de carga. Desta maneira, a irrigação mantém-se garantida independente da condição climática momentânea. Seria possível também aprimorar a determinação da temperatura média dos sensores FBGs em relação ao início e fim de operação do sistema, relacionado com a potência do módulo estendendo as medições em períodos de tempo superiores a alguns meses.

## REFERÊNCIAS

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. **Brasil ocupa 4º lugar em ranking de tributos na conta de luz.** Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/brasil-ocupa-4-lugar-em-ranking-de-tributos-na-conta-de-luz/>>. Acesso em 02 Dez 2021.

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Energia solar fotovoltaica atinge marca histórica de 500 MW em microgeração e minigeração distribuída no Brasil.** Disponível em:<<http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-atinge-marca-historica-de-500-mw-em-microgeracao-e-minigeracao-distribuid.html>>. Acesso em: 05 Jun 2019.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <[www.absolar.org.br/noticia/mais-de-95-das-cidades-paranaenses-ja-possuem-sistemas-de-energia-solar](http://www.absolar.org.br/noticia/mais-de-95-das-cidades-paranaenses-ja-possuem-sistemas-de-energia-solar)>. Acesso em 15 Ago 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Revisão das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída.** – Resolução Normativa nº 482/2012 Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 0004/2018-SRD/SCG/SMA/ANEEL. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/documents/656877/18485189/6+Modelo+de+AIR+SRD+Gera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida.pdf/769daa1c-51af-65e8-e4cf-24eba4f965c1](http://www.aneel.gov.br/documents/656877/18485189/6+Modelo+de+AIR+SRD+Gera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida.pdf/769daa1c-51af-65e8-e4cf-24eba4f965c1)>. Acesso em 15 Jun 2019.

ASOLAR – Assesórios Solares. **Tipos de sistemas fotovoltaicos.** Disponível em:<<http://www.asolar.com.br/acessorios/sistemas-fotovoltaicos.php>>. Acesso em: 23 Mai 2019.

BAZZO, J. P. et al. **Digital control system using a thermoelectric cell for temperature electronic devices testing.** LASCAS, 2010.

BARLOW, R.; McNELIS, B.; DERRICK, A. **Solar pumping: An introduction and update on the technology, performance, costs, and economics.** World Bank Technical, v. 168, p.153, Washington, DC, USA, 1993.

BOMBETEC – BOMBAS QUÍMICAS LTDA. **Bombetec soluções em bombas químicas Brasil**. Disponível em: <<https://www.bombetec.com.br/bomba-flutuante.php>>. Acesso em 15 Out 2021.

CARVALHO, Marcos de Castro. **Redes de Bragg em fibras ópticas poliméricas (FOP)**. 2010.305f. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Doutorado em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, 2010.

CASTAÑEDA, César Eduardo Figueroa. **Desenvolvimento de um Rastreador Passivo por Transferência de Massa**. Curitiba, 2011.

C. Bedin et al., “**PID Detection in Crystalline Silicon Modules Using Low-Cost Electroluminescence Images in the Field**”, Asia Pacific Sol. Res. Conf., (Dezembro) 2018.

CRESESB. Centro de referência para energia solar e eólica Sergio de Salvo Brito. Tutorial sobre energia Solar. 2010. Disponível em:< <http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 15 Ago 2019.

DEMONT, Rogers. **Sistema de Co-Geração de Energia a partir de Painéis Fotovoltaicos. 1998**. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Inep - Instituto De Eletrônica De Potência, Universidade Federal De Santa Catarina, Santa Catarina, 1998.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2015 - 2024)**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), p. 90, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Projeção da matriz energética e elétrica. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 15 Out 2021.

EPESOL. **Estação de Pesquisa em Energia Solar EPESOL Pato Branco**. Disponível em: < <https://geracao.labens.ct.utfpr.edu.br/painelCampus/pb/>>. Acesso em 04 Mar 2022.

ELGIN. **Energia Solar e kits de energia para residência, casa ou empresa.** Disponível em: <<https://www.elgin.com.br/Produtos/energia-solar/painel-solar>>. Acesso em 05 Dez 2021.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão.** São Paulo, 2003. 174p. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Interunidades de Pósgraduação da Universidade de São Paulo.

FIBRACEM. **Fabricação de fibra óptica.** Disponível em: <<https://www.fibracem.com/como-e-feita-a-fabricacao-de-fibra-optica/>>. Acesso em 05 Dez 2021.

FUENTES, M.; NOFUENTES, G.; AGUILERA, J.; TALAVERA, D. L.; CASTRO, M. **Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates.** Solar Energy, vol. 81, Issue 11, pp. 1396-1408, November 2007. ISSN 0038-092X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008>.

HILL, K. O. et al. **Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication.** Applied Physics Letters, v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978. KASHYAP, R., “**Fiber Bragg Grating**”, San Diego, Academic Press, 1999.

HBM – Solução em medições. **Fiber Bragg Grating.** Disponível em:<<https://www.hbm.com/pt/4596/dicas-e-informacoes-o-que-e-sensor-fbg/>>. Acesso em: 12 Dez 2021.

HERRMANN, W.; **How temperature cycling degrades photovoltaic-module performance.** International society advancing an interdisciplinary approach to the science and application of light (SPIE) Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201007.003177, 2010. Disponível em: <<http://spie.org/x41305.xml>>. Acesso em: 10 Set 2019.

HECHT, E. **Optics.** 4th edition. Person education limited. EUA, 2001.

IEA – International Energy Agency. **Technology roadmap: Solar photovoltaic energy.** OECD/IEA, IEA Publications, Paris, 2010.

IEA – International Energy Agency. Technology roadmap: **Solar photovoltaic energy**. OECD/ IEA, IEA Publications, Paris, 2014. Disponível em <\_\_\_\_>: Acesso em: 09 Ago 2019.

INTELBRAS. **Produtos e soluções em módulos fotovoltaicos de alta eficiência**. Disponível em: < <https://www.intelbras.com/pt-br/energia-solar>>. Acesso em 05 Dez 2021.

Jahn Ulrike et al., “**Review on infrared (IR) and electroluminescence (EL) imaging for photovoltaic field applications**”, Report IEA PVPS T13-10, 51-70, 2018.

KUHNE, Jean Filipe. **Redes de bragg em fibras ópticas multimodo: análise numérica e experimental da sensibilidade ao índice de refração**. 2016.95f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. 2016.

KERSEY, Y. D. et al. **Progress towards the development of practical fiber Bragg grating instrumentation systems**. SPIE, p. 41–63, jun. 1996.

KASHYAP, A.; STEIN, J. Monetary Policy and Bank Lending. IN: MANKIWI, N. G. (Ed.). **Monetary Policy**. Chicago, IL: NBER e University of Chicago Press, 1994. 345 p.

Lucas de Matos; **Uso de imagens de eletroluminescência para detecção de danos mecânicos nos módulos fotovoltaicos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2020.

LOURENÇO JUNIOR, I.; **Monitoramento de propriedades mecânicas de polímeros com sensor à rede de Bragg**. 2011. 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

MIRANDA, Raul Figueiredo Carvalho. **Análise da Inserção de Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro**. 2013.309f. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE. 2013.

MICHELS, R. N., RICIERI, R., GNOATTO, E., SOUSA, S. N. M., SILVA, S. L., FISCHBORN, M. 2009. **Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos**. Revista Engenharia Agrícola. 29. 370 – 379.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. **Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method**, Optic Letters, vol. 14, 1989.

NEOSOLAR. **Manual da bomba shurflo**. Disponível em:<<https://www.neosolar.com.br/loja/index.php/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2Ffile-1366224807.pdf>>. Acesso em: 09 Jun 2019.

NOGUEIRA, Rogério Nunes. **Redes de Bragg em fibra óptica**. 2005.343f. Dissertação - Universidade de Aveiro. Programa de Dissertação de doutorado em física. 2005.

OTHONOS, A., **Fiber Bragg gratings, Review of Scientific Instruments**, vol. 68, 1997.

ONU-Água -Programa das Nações Unidas. **A ONU e a água**, 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/agua/>>. Acesso em: 22 Set 2019.

PEREIRA, Enio & Martins, Fernando & Costa, Rodrigo & Gonçalves, André & Lima, Francisco & Rüther, Ricardo & Abreu, Samuel & Tiepolo, Gerson & Pereira, Silvia & Souza, Jefferson. **Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª Edição**. (2017).

Pingel, S.; Frank, O.; Winkler, M.; Daryan, S.; Geipel, T.; Hoehne, H.; Berghold, J. Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, HI, USA, 2010, pp. 2817–2822.

Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. **Special focus on inequalities**. New York: United Nations Children’s Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019.

QUINTERO, Sully Milena Mjía. **Aplicações de Sensores a Rede de Bragg em Fibras Ópticas na Medição de pH e Deformação de Filmes Finos de Alta Dureza**. 2006.124f.

Dissertação – Pontífica Universidade Católica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, 2006.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

R. Van Pelt, C. Weiner e R. Waskom, **Solar-powered Groundwater Pumping Systems USA;\_Colorado,** 2012. Disponível em:<<http://www.ext.colostate.edu/pubs/natres/06705.html> >. Acesso em: 01 Jun 2019.

RZR - BOMBAS POSITIVAS. **Especialista em bombas de engrenagem**. Disponível em: <<https://www.rzrbombas.com.br/suporte/entenda-diferenca-entre-uma-bomba-centrifuga-e-uma-bomba-de-deslocamento-positivo/>>. Acesso em 15 Nov 2021.

Rafael Ninno Muniz; **Desafios e oportunidades para o acesso universal à energia elétrica na Amazônia**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SANTOLIN, Edson Antonio. **Aplicação de sensores à fibra óptica no monitoramento térmico de painel fotovoltaico**. 2016.105f. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. 2016.

SEBRAE. **Diferença entre os sistemas on-grid e off-grid**. Disponível em: <<https://respostas.sebrae.com.br/energia-solar-qual-a-diferenca-entre-sistemas-on-grid-e-off-grid/>>. Acesso em 05 Nov 2021.

Sousa, K. M.; U. J. Dreyer, C. Martelli and J. C. Cardozo da Silva, **Dynamic Eccentricity Induced in Induction Motor Detected by Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors**. IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 12, pp. 4786-4792, Junho, 2016. doi: 10.1109/JSEN.2016.2554885

SOUSA, Kleiton de Moraes. **Validação de modelo térmico e elétrico em motor de indução empregando redes de bragg em fibra ótica**. 2011.113f. Dissertação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de pós-graduação em engenharia elétrica.

TRINURUK, P.; SORAPIPATANA, C.; CHENVIDHYA, D. **Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand**. Renewable Energy, vol.34, Issue 11, 98 59



November 2009, p. 2515-2523, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.027>. Acesso em: 11 Jun 2019.

UPSOLAR. **Especificações técnicas Painel Solar Fotovoltaico 155 W**. Disponível em:<<https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custo m/upload/File-1561724605.pdf>>. Acesso em: 05 Jun 2019.

VICENTIN, Tiago Aparecido. **Acionamento de dois sistemas de bombeamento alimentados por uma central de microgeração fotovoltaica**. 2014.93f. Dissertação - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 2014.

VERMA, D.; MIDTGARD, O.-M.; SATRE, T. O. **Review of photovoltaic status in a European (EU) perspective**. In: 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). p. 3292-3297, 2011.

YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. **Fiber optic sensors**. 2nd ed, 494 p. CRC press. Taylor & Francis Grou, 2008. ISBN 978-1-4200-5365-4.