



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**PAMELA SILVA RABELO**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO  
DE SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COM OTIMIZADORES  
DE POTÊNCIA**

**FORTALEZA**

**2022**

PAMELA SILVA RABELO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO DE  
SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COM OTIMIZADORES DE  
POTÊNCIA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Estevão Rolim  
Fernandes

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

R114a Rabelo, Pamela Silva.

Análise da influência da temperatura na eficiência de geração de sistemas de energia solar fotovoltaica com otimizadores de potência / Pamela Silva Rabelo. – 2022.  
63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Estevão Rolim Fernandes.

1. Energia solar. 2. Temperatura. 3. Eficiência de geração. 4. Otimizadores de potência. I. Título.

CDD 621.042

---

PAMELA SILVA RABELO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO DE  
SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COM OTIMIZADORES DE  
POTÊNCIA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Carlos Estevão Rolim Fernandes (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Fabíola Leite Almeida  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natalia Maria Cordeiro Barroso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng.<sup>a</sup> Malenna Aguiar de Sá Cavalcante  
ERGOS Pae

Às minhas avós, Francisca e Lúcia, que sempre me cobriram de orações e bençãos. Aos meus pais, que sempre me apoiaram e me acolheram a todo momento. À Tia Solange, que me motivou e me fez rir até quando achei que não podia. À Géssica, minha irmã de coração, e Isabelly, minha afilhada amada. A vó Chico e vó Dedé, que acompanham minha caminhada do céu. A todos os meus amigos, que nunca me deixaram sentir só.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joscelia Silva e Silvanildo Rabelo, por todo acalento, apoio, preocupação e suporte que precisei por toda minha vida. Tudo sempre foi e sempre será por vocês.

Agradeço à vó Lúcia e vó Francisca, que contribuíram desde sempre para a minha criação e sempre dedicaram a mim muito amor e orações. As minhas tias Solange e Joselia, por todo apoio e fé na minha jornada, sempre com uma palavra de consolo nos momentos difíceis.

À minha prima Géssica, que mais é uma irmã para mim, por sempre estar presente independente da distância; e a sua filha, Isabelly, minha afilhada, que foi e é minha fonte de fé e alegria.

Aos meus amigos Krisna, Catarina, Giovanni e Bruno por terem se feito mais que presentes durante a elaboração desse trabalho, pesquisando e lendo comigo, fazendo correções e acompanhando de perto essa jornada final do curso. Esse trabalho não seria o mesmo sem vocês; e Mirella, Ana Beatriz, Pedro, Karim, João Victor, Jennifer e Amanda por me manterem confiante de que tudo daria certo, independente da dificuldade do momento. O apoio de vocês foi indispensável, serei eternamente grata por todo o acolhimento. Em especial, agradeço a minha amiga Lara por ter sido minha parceira em todo o curso, inclusive participando na escolha de tema para o TCC; por ter dividido as dores e alegrias da graduação e da vida durante esses anos. Obrigada por toda conexão e pela comunicação que é tão boa que as vezes nem precisa de palavras.

Ao professor Estevão, por ter sido tão prestativo e calmo durante todo o período de orientação, por ter me acolhido tão bem e por todos os conselhos. À Malenna, Fabíola e Natália, por aceitarem participar da banca examinadora. Às empresas que cederam seus dados para que eu pudesse fazer as análises, pois sem sua participação, este trabalho não seria possível.

A todos aquele que participaram da minha jornada acadêmica, profissional e pessoal; à toda minha família e todos aqueles que estiveram presentes durante o meu crescimento. Muito obrigada.

Vô chico e vô Dedé, grata pelo amor que me deram em vida e por todo cuidado que sei que têm comigo de onde estão. Vocês sempre estarão comigo, todos os dias.

“Você é o dono do agora mas o antes é mais importante que isso.”

Djonga – Bença

## RESUMO

Desde os primórdios a energia é algo indispensável para a manutenção da vida. Com os tempos modernos e o advento de novas tecnologias, a sociedade se tornou dependente da energia elétrica. Devido à alta demanda e aos altos níveis de poluição por combustíveis fósseis, tem crescido a busca por fontes de energias renováveis, sendo uma delas a energia solar fotovoltaica. Esta, por sua vez, possui algumas tecnologias presentes no mercado hoje, com destaque para inversores tradicionais e sistemas com otimizadores de potência. Sabendo que a energia gerada depende da incidência solar, que, quanto mais alta for pode estar associada a locais com maiores temperaturas, o presente trabalho visa analisar a influência da temperatura na eficiência de geração de sistemas de energia solar fotovoltaica com otimizadores de potência. Para tal, foram escolhidas duas usinas de locais diferentes do Brasil, uma no Nordeste e outra no Sul, com potências e equipamentos similares, que terão seus valores de geração e temperatura comparados. Foi observado através das análises que as perdas podem estar mais associadas a fatores climáticos, como chuva e dias nublados; e que, portanto, a temperatura não gera perdas significativas nos sistemas com otimizadores de potência.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica, temperatura, otimizadores de potência, eficiência de geração.



## ABSTRACT

Since the beginning of time, energy has been indispensable for the maintenance of life. With modern times and the advent of new technologies, society has become dependent on electrical energy. Due to the high demand and high levels of pollution from fossil fuels, the search for renewable energy sources has grown, one of them being photovoltaic solar energy. This, in turn, has some technologies present on the market today, with emphasis on traditional inverters and systems with power optimizers. Knowing that the generated energy depends on the solar incidence, which, the higher it may be associated with places with higher temperatures, the present work aims to analyze the influence of temperature on the generation efficiency of photovoltaic solar energy systems with power optimizers. To this end, two plants from different locations in Brazil were chosen, one in the Northeast and the other in the South, with similar powers and equipment, which will have their generation and temperature values compared. It was observed through the analysis that the losses may be more associated with climatic factors, such as rain and cloudy days; and that, therefore, the temperature does not generate significant losses in systems with power optimizers.

**Keywords:** Photovoltaic solar energy, temperature, power optimizers, generation efficiency.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FV	Fotovoltaico(a)
REN	Resolução Normativa
G	Radiação Global
m-Si	Silício Monocristalino
p-Si	Silício Policristalino
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
MLPE	Eletrônica de Potência em Nível de Módulo
PVOUT	Energia Fotovoltaica Específica de Saída
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas de temperatura dos meses de Janeiro a Abril de 2022 em Fortaleza (Usina A).....	46
Gráfico 2 – Curvas de temperatura dos meses de Janeiro a Abril de 2022 em Erechim (Usina B).....	48
Gráfico 3 – Curvas de geração dos meses de Janeiro a Abril de 2022 da Usina A.....	50
Gráfico 4 – Curvas de geração dos meses de Janeiro a Abril de 2022 da Usina B.....	51
Gráfico 5 – Curva de Temperatura X Geração de janeiro da Usina A.....	52
Gráfico 6 – Curva de Temperatura X Geração de fevereiro da Usina A.....	53
Gráfico 7 – Curva de Temperatura X Geração de março da Usina A.....	54
Gráfico 8 – Curva de Temperatura X Geração de abril da Usina A.....	54
Gráfico 9 – Curva de Temperatura X Geração de janeiro da Usina B.....	56
Gráfico 10 – Curva de Temperatura X Geração de fevereiro da Usina B.....	56
Gráfico 11 – Curva de Temperatura X Geração de março da Usina B.....	57
Gráfico 12 – Curva de Temperatura X Geração de abril da Usina B.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ranking Estadual da geração distribuída no Brasil .....	18
Tabela 2 – Dados da Usina A .....	43
Tabela 3 – Dados da Usina B .....	43

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Simulação de geração mensal da Usina A de acordo com cálculos do Global Atlas Solar.....	39
Quadro 2 – Simulação de geração mensal da Usina B de acordo com cálculos do Global Atlas Solar.....	42

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética mundial em 2019.....	15
Figura 2 – Mapa da distribuição da irradiância no Brasil .....	22
Figura 3 – Variação de G de acordo com os meses do ano .....	23
Figura 4 – Esquema de células solares comercializadas em 1954 .....	24
Figura 5 – Formação de painéis fotovoltaicos.....	26
Figura 6 – Esquema de organização de componentes de sistema fotovoltaico .....	27
Figura 7 – Diferenças entre sistemas com inversor string e com tecnologia MLPE.....	29
Figura 8 – Esquema simplificado de ligação em sistemas com otimizadores de potência .....	30
Figura 9 – Plataforma de monitoramento de sistemas com SolarEdge .....	33
Figura 10 – Diagrama de funcionamento do Global Atlas Solar. ....	34
Figura 11 – Potencial de geração médio do local de instalação da Usina A .....	38
Figura 12 – Simulação de layout de instalação da Usina A através do Designer SolarEdge...	38
Figura 13 – Diagrama de perdas da Usina A.....	40
Figura 14 – Potencial de geração médio do local de instalação da Usina B .....	41
Figura 15 – Diagrama de perdas da Usina B.....	42
Figura 16 – Mapa de calor da temperatura do local de instalação da Usina A .....	45
Figura 17 – Comparação entre as médias de temperaturas obtidas e as registradas pelo NOAA .....	46
Figura 18 – Mapa de calor da temperatura do local de instalação da Usina B.....	47
Figura 19 – Mapa de calor de geração da Usina A.....	49
Figura 20 – Mapa de calor de geração da Usina B.....	51

## SUMÁRIO

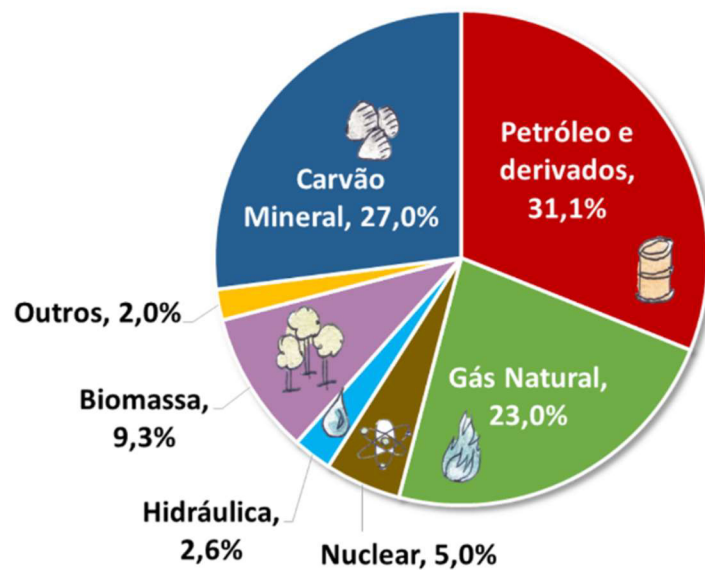
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Cenário da Energia Solar</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1.1</b>	<i>Energia Solar no Brasil</i> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Aplicações Socioambientais</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Definição de Radiação e Irradiação</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Energia Solar Fotovoltaica</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4.1</b>	<i>Células Fotovoltaicas</i> .....	<b>24</b>
<b>2.4.2</b>	<i>Demais Componentes do Sistema</i> .....	<b>27</b>
<b>2.5</b>	<b>Tecnologias</b> .....	<b>28</b>
<b>2.5.1</b>	<i>Tecnologia MLPE</i> .....	<b>28</b>
<b>2.6</b>	<b>Influência da Temperatura na Eficiência de Geração</b> .....	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Coleta de dados</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Global Atlas Solar</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Designer SolarEdge</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Apresentação das Usinas</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Usina A</i> .....	<b>37</b>
<b>3.4.2</b>	<i>Usina B</i> .....	<b>40</b>
<b>3.5</b>	<b>Tabulação de Dados em Planilhas Eletrônicas</b> .....	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Temperatura</b> .....	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Geração</b> .....	<b>49</b>
<b>4.3</b>	<b>Relação Entre Temperatura e Geração</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3.1</b>	<i>Usina A</i> .....	<b>52</b>
<b>4.3.2</b>	<i>Usina B</i> .....	<b>55</b>
<b>4.4</b>	<b>Influência da Irradiação</b> .....	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o período paleolítico, em que se deu a descoberta do fogo, o homem utiliza a energia para facilitar sua vida. Neste período, o Homo Erectus utilizava o fogo como forma de evitar o frio, para cozer alimentos e até mesmo para afugentar possíveis ameaças. Com a evolução, novas formas de energia foram descobertas e aprimoradas para continuar contribuindo com a vida humana.

Dentre as diversas formas de energia que estão presentes no cotidiano do homem moderno, destaca-se a energia elétrica, que pode ser definida como a capacidade de trabalho de uma corrente, que é baseada na produção de tensões entre dois pontos que permitem o estabelecimento de correntes elétricas. A geração de eletricidade pode se dar por diferentes fontes e, atualmente, a matriz energética mundial é composta em sua maioria por fontes de combustíveis fósseis, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Matriz energética mundial em 2019.



**Matriz Energética Mundial 2019** (IEA, 2021)

Fonte: Empresa de pesquisa energética (EPE) (2021).

No entanto, a poluição ambiental é uma das grandes desvantagens do uso de combustíveis fósseis. O dióxido de carbono, gás liberado durante a queima desse tipo de combustível, é o principal responsável pelo aquecimento global. Por isso, vem crescendo a busca por fontes alternativas de energia, que possam suprir a necessidade da sociedade sem causar tantos danos ao meio ambiente.



Dentre as fontes alternativas, podem ser mencionadas: energia solar (podendo ser fotovoltaica ou térmica), eólica, maremotriz, hídrica e geotérmica. Entre as fontes renováveis, destacam-se a solar e a eólica, principalmente devido à alta oferta dessas duas fontes. O uso da energia solar consiste em explorar a energia proveniente do Sol para a geração de eletricidade, seja a partir do calor provocado pelos raios solares (solar térmica) ou da luz emitida por eles (fotovoltaica).

O termo "fotovoltaica" vem do grego Phos, que significa "luz", e "volt", a unidade de força eletromotriz, que por sua vez vem do sobrenome do físico italiano Alessandro Volta, inventor da pilha. Como o próprio nome sugere, um fator determinante para a eficiência de um sistema fotovoltaico é a incidência de luz solar, visto que esta relaciona-se diretamente com a radiação. A localização, portanto, deve ser levada em consideração no processo decisório de instalação, já que a sua variação implica na variação da radiação.

O sistema fotovoltaico utiliza painéis solares de material semicondutor que coletam a radiação solar e, através do efeito fotovoltaico, convertem-na em energia elétrica. Parte da energia coletada é, no entanto, transformada em calor, fazendo com que a temperatura dos painéis possa ser de 20°C a 30°C maior que a temperatura ambiente, algo que pode prejudicar o desempenho do sistema, considerando que os painéis possuem uma temperatura ideal de operação. Fato este que pode ser observado em locais muito ensolarados, visto que estes normalmente possuem temperaturas mais elevadas.

Por conseguinte, sabendo da importância de analisar a temperatura ambiente do local de instalação com o objetivo de maximizar a produção sem comprometer os componentes do sistema, o presente trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos:

### **1.1 OBJETIVO GERAL**

- Analisar a influência da temperatura na eficiência de geração de energia elétrica de sistemas de energia solar fotovoltaica instalados com otimizadores de potência.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Comparar a influência da temperatura e irradiância local na eficiência de geração de sistemas de energia solar fotovoltaica;
- Comparar os dados reais obtidos com os dados previstos antes da instalação, durante a etapa de elaboração do projeto;
- Apresentar uma correlação direta entre temperatura, irradiância local e eficiência de geração.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Antes de apresentar a metodologia de pesquisa e os resultados encontrados sobre a influência da temperatura na eficiência de geração de sistemas de energia solar fotovoltaica com otimizadores de potência, o presente capítulo pretende apresentar definições, históricos breves e uma introdução sobre a problemática a ser abordada a fim de facilitar o entendimento acerca do tema.

### 2.1 Cenário da Energia Solar

As fontes de energias não renováveis, tais como o petróleo, não têm acompanhado o crescimento populacional e econômico devido ao seu custo e tempo para retornar à natureza. Como alternativa, as perspectivas de mercado apontam a energia solar como melhor opção, já que seu uso não é poluente e o custo de manutenção é baixo (SILVA; ARAUJO, 2022).

Além dos motivos apresentados, o Sol é a principal fonte de energia do planeta, visto que a superfície da Terra recebe atualmente uma quantidade de energia solar suficiente para suprir milhares de vezes as necessidades do planeta (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Segundo a International Energy Agency (IEA), o uso de energia solar pode chegar a 30% em 2022 em países com maior capacidade instalada de geração, como a China, Alemanha, Japão e Estados Unidos, onde este primeiro é o responsável por 25,8% da produção global, totalizando 78.100 MW de potência instalada.

Na China, há um compromisso de utilizar 35% de combustíveis não fósseis em sua matriz elétrica, com o objetivo de minimizar os impactos no meio ambiente. Para isso, o país conta com incentivos governamentais à adoção desse sistema. Estima-se que em 2030 a capacidade do país chegará aos 400 GW de capacidade instalada, representando 10% da energia primária produzida. Além disso, o país carrega o título de maior fabricante de painéis solares do mundo e consome mais de 50% da produção de painéis do mundo inteiro (PORTAL SOLAR, 2021).

Segundo dados da ABSOLAR (2022), em 2021 o Brasil encerrou o ano ocupando a 13ª posição do ranking mundial, com 13,60 GW de capacidade acumulada em energia solar fotovoltaica. A previsão é de que o país alcance o top 10 mundial nos próximos anos.

### 2.1.1 Energia Solar no Brasil

Segundo a Petrobrás (2006), as características de clima e irradiação solar ao longo do ano do Brasil o tornam um país favorável à utilização de energia solar, inclusive em larga escala.

Em 2012, com a criação da RN 482, Resolução Normativa N° 482, responsável por criar as regras da geração distribuída, houve o início do mercado da energia solar no Brasil. Essa Resolução foi importante por tornar a geração de energia solar viável no país, dando origem a sistemas on-grid (conectados à rede) e sistema de rateio (divisão de excedentes de energia gerada).

O recorde de crescimento de energia solar no Brasil ocorreu em 2019, quando o mercado teve um crescimento de 212%, alcançando a marca de 2,4 GW instalados, com mais de 110 mil sistemas fotovoltaicos de mini e microgeração, sendo classificados como microgeração sistemas de até 75 kW de potência e como minigeração sistemas de 75 kW a 3 MW (ANEEL, 2019).

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia, até o fim de 2030 a mini e microgeração distribuída devem totalizar 25 GW de potência instalada no Brasil, atingindo a marca de 4,6% da matriz elétrica do país.

Quanto à divisão da potência instalada por estados, temos Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul ocupando, respectivamente, os três primeiros lugares do ranking. O Ceará aparece em 10º lugar na lista, com 398,40 MW de potência instalada.

Na Tabela 1, os estados em ordem decrescente de potência instalada.

Tabela 1 - Ranking Estadual da geração distribuída no Brasil.

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - RANKING ESTADUAL		
ESTADO	POTÊNCIA INSTALADA (MW)	PORCENTAGEM
MINAS GERAIS	1.787,6	16,70%
SÃO PAULO	1.422,2	13,20%
RIO GRANDE DO SUL	1.249,1	11,60%
MATO GROSSO	716,0	6,60%
PARANÁ	522,1	4,80%
SANTA CATARINA	521,9	4,80%
GOIÁS	509,7	4,70%
RIO DE JANEIRO	435,1	4,10%
BAHIA	411,0	3,80%

CEARÁ	398,4	3,50%
MATO GROSSO DO SUL	358,4	3,30%
PERNAMBUCO	345,0	3,20%
PARÁ	322,1	3,00%
MARANHÃO	274,0	2,50%
RIO GRANDE DO NORTE	244,4	2,30%
PIAUI	225,6	2,10%
ESPÍRITO SANTO	206,0	1,90%
PARAÍBA	188,4	1,70%
TOCANTINS	156,7	1,40%
RONDÔNIA	114,6	1,10%
DISTRITO FEDERAL	112,0	1,00%
ALAGOAS	102,2	0,90%
SERGIPE	64,2	0,60%
AMAZONAS	64,1	0,60%
ACRE	31,5	0,30%
AMAPÁ	16,5	0,10%
RORAIMA	16,0	0,10%

Fonte: ABSOLAR (2022).

## 2.2 Aplicações Socioambientais

Além de aplicações comerciais com fins de economia, investimento a médio prazo ou até mesmo participação do livre mercado de energia, sistemas de energia solar fotovoltaica podem ser amplamente utilizados em aplicações socioambientais, cujo maior foco seriam contribuições sociais e/ou ambientais, ao invés de apenas monetárias.

Isso se deve ao fato de ser uma energia limpa e renovável, ou seja, não emite poluentes durante a geração e a sua fonte possui um ciclo de renovação em escala de tempo humana, estando sempre disponíveis para a utilização e não se esgotam, como as fontes eólicas, hídrica e, neste caso, solar.

Uma aplicação proposta por Júnior (2022), por exemplo, é a utilização de áreas cearenses suscetíveis à desertificação para geração de energia. O fenômeno da desertificação foi definido como a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e sub-úmidas secas, resultantes de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas (BRASIL, 1998 *apud* JÚNIOR, 2022).

Por apresentarem alta irradiação direta e baixa nebulosidade, as áreas suscetíveis à desertificação apresentam um bom potencial de geração, que pode ser destinado a beneficiar dezenas de milhares de famílias em todo o estado, através do processo de autoconsumo remoto, descrito na Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, que institui o marco legal da micro e minigeração distribuída; como sendo uma

modalidade caracterizada por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma pessoa jurídica, incluídas matriz e filial, ou pessoa física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, com atendimento de todas as unidades consumidoras pela mesma distribuidora.

Além no benefício energético, a instalação de painéis fotovoltaicos também pode ser útil para auxiliar o monitoramento e uso de técnicas intensivas ao solo, permitindo uma maior produtividade e um maior ciclo de exploração do solo, com intuito final de conseguir um reflorestamento e revitalização do semiárido (SILVA, et al; 2017).

As aplicações da energia solar podem, portanto, abranger maiores objetivos do apenas àqueles ligados a investimentos de médio-longo prazo, representando uma excelente alternativa de investimento dos poderes públicos para proporcionar melhores condições de vida para famílias carentes, além de poder auxiliar na recuperação de áreas comprometidas, entre outros benefícios.

No entanto, apesar de ser uma fonte de energia renovável com níveis de poluição durante a operação quase nulos, a energia solar fotovoltaica possui impactos ambientais que devem ser levados em consideração.

Em usinas de grande porte, com potências elevadas e maior quantidade de painéis, o espaço ocupado pode ser de vários hectares de Terra, causando, segundo o Portal Solar, danos aos ecossistemas presentes na área. As vegetações podem ser comprometidas devido a terraplanagem feita previamente a instalação, além do sombreamento gerado após a instalação. Os animais que se alimentam dessas vegetações também serão prejudicados, além de estarem em risco durante o processo de construção.

O descarte dos equipamentos também pode gerar um impacto ambiental considerável se feito de maneira incorreta. É recomendado que, no fim da sua vida útil, os equipamentos sejam reaproveitados pelo consumidor ou que o seu descarte seja feito seguindo o método adequado recomendado pela regulamentação de cada país.

### 2.3 Definição de Radiação e Irradiação

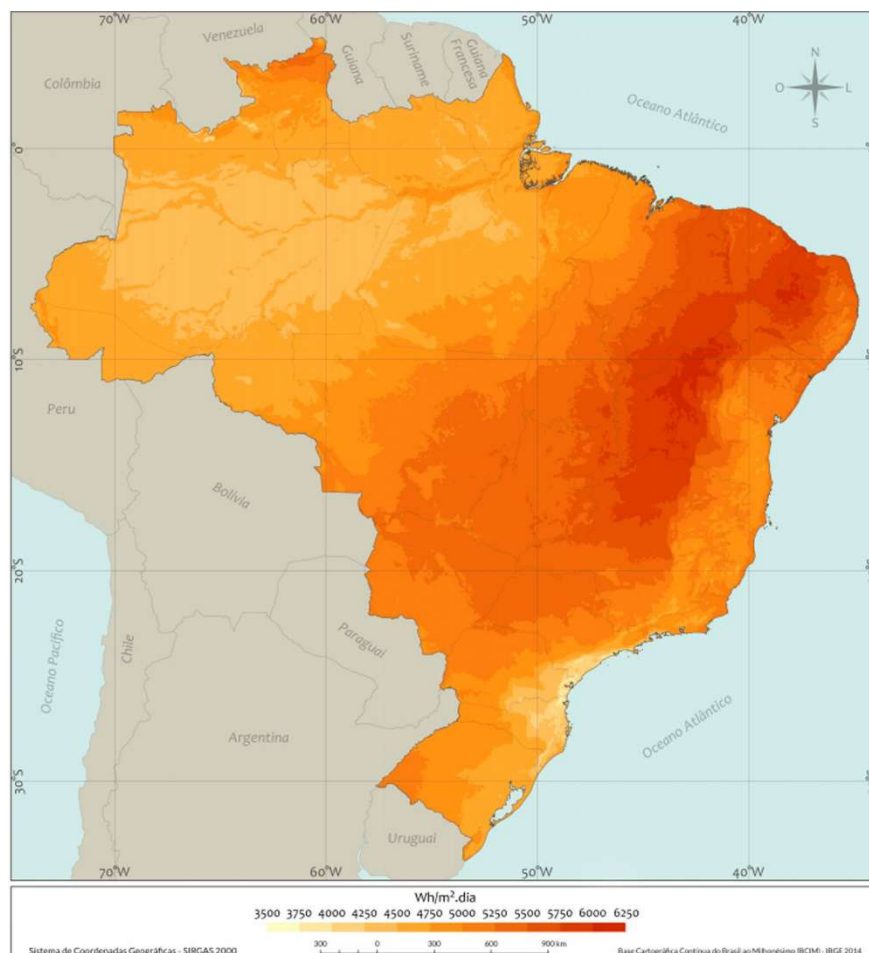
O Sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente, com um diâmetro de  $1,39 \times 10^9$  m, uma temperatura superficial de 5.777 K, mas que pode variar de  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$  K, uma densidade estimada em 100 vezes a da água e está localizado a  $1,5 \times 10^{11}$  m de distância da Terra. A radiação solar emitida é resultado das várias camadas que emitem e absorvem radiação de vários comprimentos de onda, produzindo a energia que será transferida para a sua superfície e então irradiada para o espaço (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A radiação recebida pela Terra pode ser de dois tipos: direta (ou de feixe), que é aquela recebida do Sol sem ter sofrido desvios causados pela atmosfera; e difusa, que é a recebida após a sua direção ter sido alterada devido à um processo de enfraquecimento na atmosfera, graças à presença de nuvens e sua absorção por moléculas de gases ou de partículas em suspensão. A soma desses dois resulta na chamada Radiação Total Solar ou Radiação Global (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A taxa de energia radiante por unidade de área ( $W/m^2$ ) é chamada de irradiância. Quando essa taxa é medida durante um período de tempo ( $Wh/m^2$ ), temos a irradiação, ou seja, é a quantidade de energia incidente em uma superfície durante um determinado período de tempo.

No Brasil, a distribuição de irradiância se dá conforme o que pode ser observado na Figura 2:

Figura 2 – Mapa da distribuição da irradiância no Brasil.



Fonte: Carol Rivello (2022).

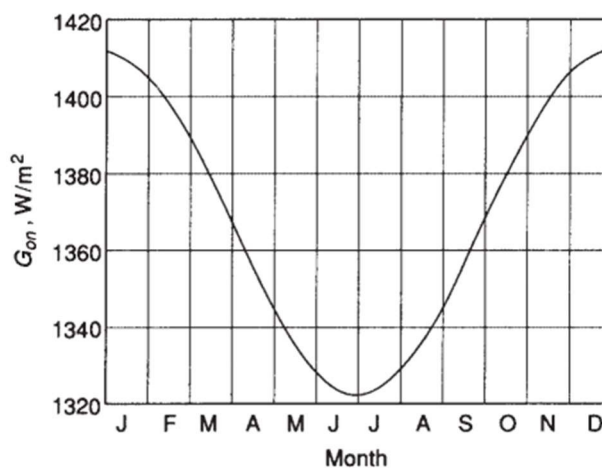
De acordo com Benford e Bock (1939), as relações geométricas entre um plano qualquer em relação à Terra a qualquer momento e a radiação direta, ou seja, a posição do sol em relação a esse plano, pode ser descrito em termos de alguns ângulos, sendo os principais deles:

- Latitude - localização angular a norte ou sul do equador;
- Ângulo de incidência - ângulo entre a radiação direta em uma superfície e a normal para aquela superfície;
- Ângulo azimute solar - deslocamento angular do sul da projeção da radiação direta no plano horizontal.

O movimento anual da Terra ao redor do sol (chamado de translação) associado à inclinação do planeta sobre seu próprio eixo, gera variações no fluxo de radiação em determinados locais, sendo responsável pelas estações do ano, além de alterar as condições de produção de energia, influenciando no potencial de geração de cada localidade (CRESESB, 2014).

A Figura 3 abaixo mostra a variação da Radiação Global (G) em  $\text{W/m}^2$  de acordo com os meses do ano:

Figura 3 - Variação de G de acordo com os meses do ano.



Fonte: Solar Engineering of Thermal Processes (2013).

## 2.4 Energia Solar fotovoltaica

Segundo Perlin (1999), a superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia proveniente do sol que ultrapassa em milhares de vezes o que seria suficiente para suprir as necessidades do planeta. No entanto, apenas uma pequena parte desse montante é reutilizada.

É neste cenário que a energia solar vem ganhando destaque nos últimos anos. Visando aproveitar a vasta energia disponível com uma geração livre de poluentes, a energia solar pode-se dividir em duas vertentes: a energia solar fotovoltaica e a energia solar térmica. Nesta última, a radiação é absorvida e transformada em calor, que pode ser utilizado para aquecimento de casas ou na substituição de chuveiros elétricos; ou ainda para aquecer um fluido, que acionará uma turbina e irá gerar energia elétrica.

A energia solar fotovoltaica pode ser definida como a conversão da energia radiante absorvida por uma superfície condutora em energia elétrica. Essa conversão é realizada através do efeito fotovoltaico, que foi descoberto pelo francês Edmond Becquerel em 1839, quando o mesmo observou que duas painéis de latão imersas em um eletrólito líquido produziam eletricidade quando expostas à luz solar (MACHADO; MIRANDA, 2014).

Segundo Puig e Jofra (2002), somente em 1885 Werner von Siemens declarou diante da Academia Real da Prússia que “pela primeira vez temos uma evidência da conversão direta da energia da luz em energia elétrica”, depois que Charles Fritts construiu o primeiro

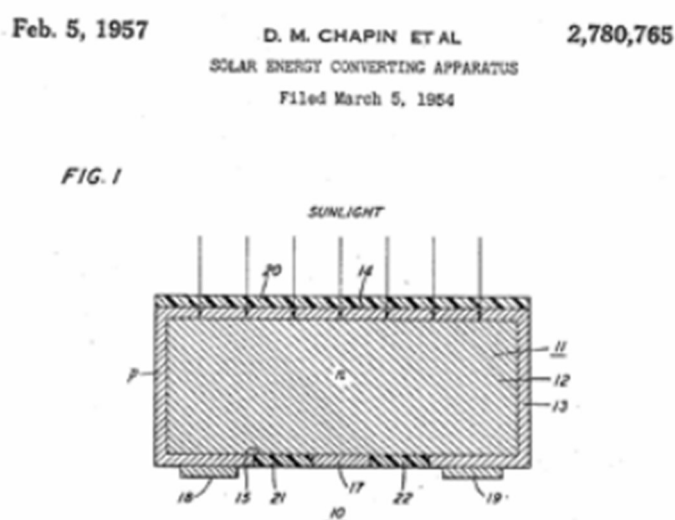


módulo solar, que era composto por uma folha de selênio sobre um suporte metálico e coberto com uma fina camada transparente de ouro. O módulo, no entanto, apresentava uma eficiência de conversão elétrica de apenas 1%.

A primeira célula fotovoltaica de silício, como as que são utilizadas atualmente, foi apresentada em 1953 por Darryl Chapin, cientista dos Laboratórios Bell, que possuía eficiência de 6%. A empresa Western Electric foi a primeira a utilizar as células solares fotovoltaicas na indústria, para o abastecimento de linhas telefônicas em zonas rurais na Georgia, nos EUA. Em 1955, no entanto, a National Fabricated Products comprou a licença para a fabricação de células solares, com o objetivo de aumentar sua eficiência. (PUIG; JOFRA, 2002).

Abaixo, a Figura 4 representa um modelo das células solares comercializadas em 1954:

Figura 4 - Esquema de células solares comercializadas em 1954.



Fonte: Miguel C. Brito et al (2006).

#### 2.4.1 Células Fotovoltaicas

De acordo com Brito e Silva (2006),

Uma célula fotovoltaica simples consiste basicamente num díodo de grande área, i.e. um substrato de material semicondutor onde é criado um campo elétrico interno permanente (chamado junção pn). Quando a radiação atinge um átomo do semicondutor, este liberta um elétron que pode ser conduzido pelo campo elétrico interno para os contatos, contribuindo assim para a corrente produzida pela célula fotovoltaica.

Isso significa que as células são compostas por duas partes de silício: uma positiva e uma negativa, divididas por campo elétrico que impede que os elétrons viagem entre as duas partes. Os elétrons das camadas externas ganham energia com a entrada da luz solar, fazendo com que os mesmos parem de sofrer a força de atração dos átomos e tornem-se elétrons livres (PORTAL SOLAR, 2014).

O silício cristalino é o material utilizado nas células graças a algumas de suas características, tais como a sua abundância no planeta, sua não-toxicidade, seu baixo coeficiente de segregação de metais, ser facilmente dopável e óxido passivante (BRITO; SILVA, 2006).

Segundo Rosa e Almeida (2015), existem três tecnologias aplicadas para a produção de células FV, classificadas em três gerações de acordo com o seu material e características.

A primeira é composta por silício cristalino (c-Si), que se subdivide em silício monocristalino (m-Si) e silício cristalino (p-Si) (ROSA; ALMEIDA, 2015). As células monocristalinas são aquelas formadas por um único bloco cristalino, o que lhes confere um maior rendimento de geração. No entanto, possuem também um valor elevado, devido às técnicas utilizadas na sua produção para manter o material puro e com uma estrutura cristalina perfeita. As policristalinas são feitas a partir de um bloco que é composto por vários pequenos cristais, tornando esse tipo de célula mais acessível e, em contrapartida, menos eficiente na conversão fotovoltaica (NUNES; CORREA, 2020).

A segunda geração pode ser chamada de filmes finos e pode ser representada por: silício amorfo (a-Si); disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS); telureto de cádmio (CdTe); e arseneto de gálio (GaAs) (ROSA; ALMEIDA, 2015).

O silício amorfo é utilizado em células de filmes finos, em que uma forma não cristalina de silício é depositada em filmes finos sobre uma variedade de substratos flexíveis. Esse tipo de célula apresenta baixa eficiência, mas não possuem metais pesados em sua composição, tornando-as mais sustentáveis.

O disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe) são utilizados devido a equivalência de suas características de absorção com o espectro solar, além do seu custo de fabricação e os impactos ambientais causados na deposição do material (NUNES; CORREA, 2020).

O arseneto de gálio (GaAs) é um semicondutor de propriedades superiores às do silício, apresentando uma eficiência que pode ultrapassar os 30%. A baixa popularização dessas células se deve ao processo de fabricação, que é complexo.

A terceira e última geração deve ser altamente eficiente, possuir baixo custo por W de potência e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade (IEEE, 2014). Essa geração, que ainda está em desenvolvimento, compreende: células PERC, células híbridas de heterojunção (HIT/HJT) e células orgânicas (OPV) (PORTAL SOLAR, 2018).

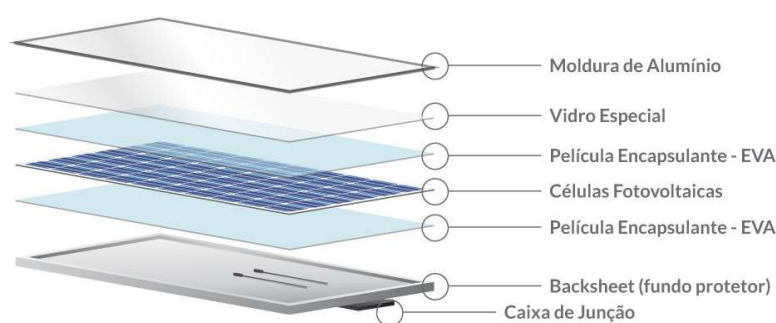
A sigla PERC vem do inglês *Passivated Emitter and Rear Contact*, que significa Emissor Passivado e Contato Traseiro, e representa células de silício mais finas fabricadas com uma camada adicional de passivação, que reduz a velocidade de recombinação de elétrons na superfície do silício, aumentando sua eficiência.

As células de heterojunção (HIT/HJT) são desenvolvidas com camadas de silício amorfo associadas às camadas de silício cristalino, agregando eficiência. Essas células apresentam baixo coeficiente de temperatura, funcionando melhor que células tradicionais em lugares mais quentes.

Já as células orgânicas (OPV) são constituídas a partir de polímeros conjugados, com propriedades elétricas similares aos semicondutores. Elas possuem baixo custo de produção e menor impacto ao meio ambiente, mas apresentam uma instabilidade na operação, não havendo uma proteção eficaz.

Para formar os módulos fotovoltaicos, as células são ligadas em série através de uma faixa condutora extremamente fina, formando um circuito. O conjunto de células é então coberto com uma lâmina de vidro temperado, que fica sobre uma camada encapsulante, que é tratado com uma substância antiaderente e antirreflexo, e emoldurado usando um quadro de alumínio, que agrupa todos os demais componentes. Além disso, há ainda a caixa de junção acoplada à parte traseira do painel, que possui os condutores que farão a junção dos módulos em um sistema, conforme a Figura 5 ilustra a seguir (PORTAL SOLAR, 2014).

Figura 5 - Formação de módulos fotovoltaicos.



Fonte: BLUESOL (2018).

### 2.4.2 Demais Componentes do Sistema

Apesar de os módulos fotovoltaicos serem de extrema importância para os sistemas de energia solar fotovoltaica, visto que são responsáveis por fazer a conversão da energia solar em energia elétrica, outros componentes também são indispensáveis para que todo o sistema esteja em pleno funcionamento.

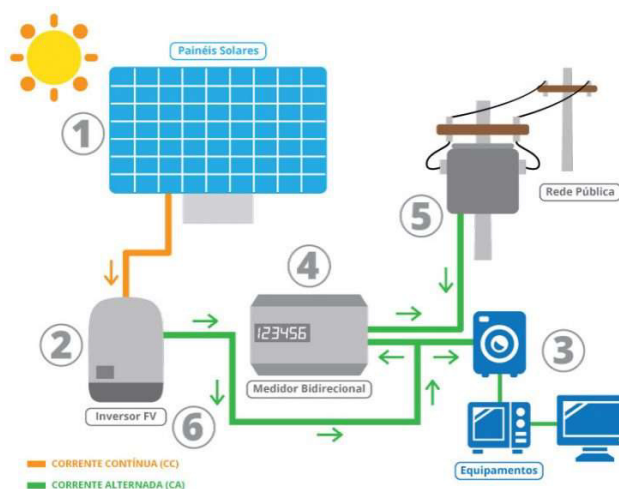
A energia gerada pelos módulos está em corrente contínua (CC). Neste caso, em sistemas fotovoltaicos mais simples, os painéis são ligados diretamente à carga, como é o caso de bombeamento de carga com motores CC (BRITO; SILVA, 2006).

Em casos de sistemas on-grid, que são aqueles conectados à rede elétrica, fornecendo-a o excedente produzido e o disponibilizando para outros consumidores, e utilizando a eletricidade fornecida sempre que o sistema não gerar energia (como a noite, por exemplo) (BRITO; SILVA, 2006); se faz necessário o uso de um equipamento que faça a conversão da corrente da energia gerada (CC) para o tipo de corrente de energia presente na rede elétrica (CA).

Essa conversão é realizada por um equipamento denominado inversor, que, segundo Brito e Silva (2006), além de converter a corrente que sai dos painéis, pode ainda ajustar a tensão de saída mais apropriada à aplicação em causa.

Além desses dois equipamentos, há todo o sistema de cabeamento e a estrutura de fixação dos módulos, que variam de acordo com o tipo de instalação (telhado, solo, flutuante, com tracker e etc). A Figura 6 ilustra um diagrama simplificado dos componentes de um sistema fotovoltaico e suas ordens.

Figura 6 - Esquema de organização de componentes de sistema fotovoltaico.



Fonte: Vip Solar (2020).

Em casos de sistemas off-grid, outros componentes necessários são as baterias eletroquímicas. Isso porque esse tipo de instalação não é conectado à rede elétrica, exigindo que o proprietário tenha uma maneira de armazenar o excedente produzido, para que este seja utilizado em momentos sem geração (durante a noite, por exemplo).

Esse tipo de sistema, no entanto, pode possuir um custo elevado, já que as baterias, tradicionalmente de chumbo ou de níquel-cádmio, possuem um custo significativo, além dos custos com manutenção.

Dependendo do tipo de tecnologia abordado na instalação, outros equipamentos podem estar presentes.

## **2.5 Tecnologias**

Além das variações de módulos (mono ou policristalino, filmes finos, etc), existem alguns tipos de tecnologia de sistemas, que podem acrescentar componentes ou modificar os que já foram apresentados.

Atualmente, no mercado, dois tipos de sistemas têm destaque: os chamados tradicionais e os com tecnologia MLPE.

Os sistemas tradicionais são mais simples, mais comuns e não têm nenhum componente além do mencionado. Neste tipo de sistema, os módulos são conectados em série, sob altos níveis de tensão, ao inversor, que coleta os dados da geração, entrega de energia e analisa qualquer sinistro que venha a acontecer (VASCONCELOS, 2021).

Em sistemas tradicionais, no entanto, devido ao tipo de conexão dos módulos com o inversor, é mais difícil rastrear um problema em caso de alterações no seu funcionamento. Além disso, em caso de sombreamento em um módulo, todo o sistema terá sua geração afetada, comprometendo também a eficiência geral da instalação.

Os outros tipos de sistema possuem a tecnologia MLPE, que será apresentada a seguir.

### **2.5.1 Tecnologia MLPE**

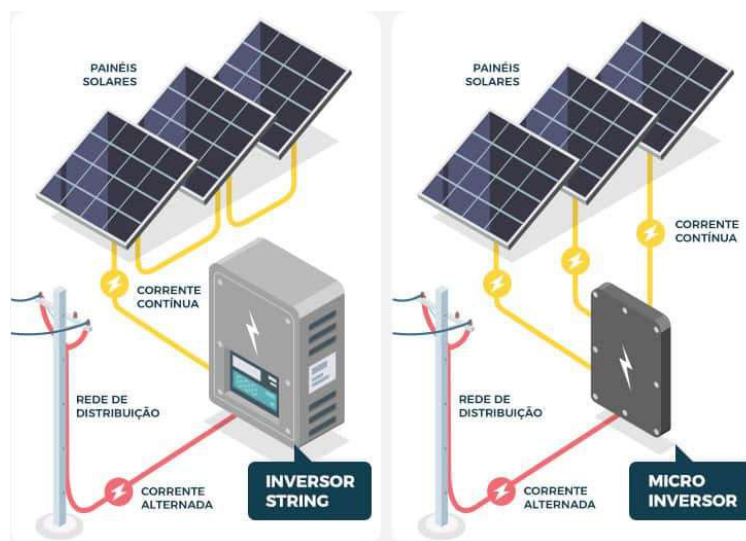
A sigla MLPE vem do inglês *Module-Level Power Electronics* e pode ser traduzida para o português como eletrônica de potência em nível de módulo que, segundo a Sirius, distribuidora exclusiva de equipamentos da tecnologia, quer dizer que,

Na prática, a MLPE consiste em uma divisão da produção e monitoramento de energia módulo a módulo. Ou seja, cada módulo gera energia de forma individualizada e não tem seu desempenho afetado por outros painéis. A tecnologia atua junto ao inversor.

Dois tipos de equipamentos representam essa tecnologia, sendo eles os otimizadores de potência e os microinversores. Estes últimos desempenham o papel do inversor, mas de maneira individualizada. Realizam a conversão da corrente da energia gerada pelos módulos, mas tem capacidade de comportar de dois a oito módulos, permitindo que cada módulo tenha uma autonomia na produção de energia, diferindo dos inversores tradicionais, que permitem que a menor produção de um módulo afete todo o sistema. Esse tipo de equipamento é mais comum para aplicações residenciais ou comerciais de menor potência.

Na Figura 7, é possível observar as principais diferenças entre os sistemas com inversores tradicionais ou *string* e sistemas com equipamentos da tecnologia MLPE:

Figura 7 – Diferenças entre sistemas com inversor *string* e com tecnologia MLPE.



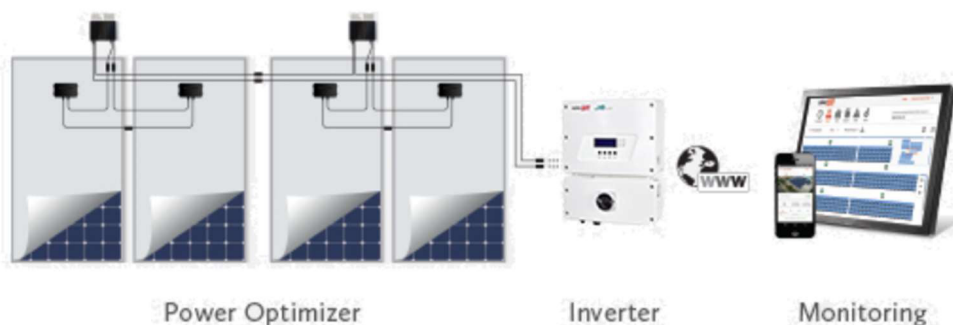
Fonte: Sunus (2022).

Já os otimizadores de potência são dispositivos cuja principal função é reduzir as perdas do sistema, elevando sua eficiência. Com a utilização desses dispositivos, os painéis não são ligados diretamente ao inversor, passando antes pelos otimizadores, que atuam como conversores CC-CC que fazem um “pré-processamento” da energia, só então dirigindo-a para o inversor (TRAPP, 2017).

A primeira proposta dos otimizadores foi feita em 2004, na *IEEE Industrial Electronics Society*. Contudo, a eficiência relatada não foi suficiente para que fosse utilizada. Somente em 2006, a SolarEdge, uma marca israelense de forte presença na fabricação de

inversores, inventou uma tecnologia de otimizadores CC, revolucionando o mercado (SOUZA, 2019). O esquema de ligação entre módulos, otimizadores, inversor e monitoramento pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema simplificado de ligação em sistemas com otimizadores de potência.



Fonte: SolarEdge (2022).

Na prática, funciona da seguinte maneira: cada par de módulo ligado em série é conectado a um otimizador de potência. A saída dos otimizadores é conectada em série, que será ligada ao inversor. Os otimizadores ajustam a corrente e a tensão por módulo fotovoltaico para captar a sua máxima energia individualmente, eliminando qualquer interdependência entre os módulos de uma *string* (PHOTON, 2021).

Segundo Souza (2019), dentre os benefícios oferecidos por esse tipo de sistema, podemos mencionar: maior segurança, já que o fluxo de corrente é interrompido quando o inversor é desligado; maior geração de energia, já que a individualização dos módulos oferece uma redução nas perdas por sombreamento, incompatibilidade, poeira e outros; flexibilidade nos projetos, pois o uso de otimizadores de potência permite o uso mais eficiente do espaço disponível no telhado através da flexibilidade do projeto.

No que diz respeito à temperatura, assim como todos os outros componentes elétricos, os otimizadores de potência também possuem uma faixa ideal de operação. Quando essa faixa é ultrapassada, o equipamento pode desligar momentaneamente ou operar com redução controlada de potência e/ou corrente, a fim de evitar danos. Esse processo é denominado *temperature derating* ou *power derating*. O que diferencia esse processo do otimizador de potência do processo de um inversor tradicional, é justamente a faixa de temperatura, que será maior nos otimizadores de potência (SOUZA, 2021).

## 2.6 Influência da Temperatura na Eficiência de Geração

Segundo Stambuk (2017), a incidência de radiação e a variação da temperatura ambiente implicam em uma variação de temperatura nas células que compõem o módulo. O aumento da temperatura das células implica na diminuição dos níveis de tensão, enquanto a corrente se mantém quase constante, afetando a potência de saída.

Essa influência da tensão na potência de saída pode ser explicada pela clássica relação física, pela qual a potência elétrica é o produto da tensão pela corrente, ou seja:

$$P = UI$$

onde P é potência, em watts, U é a tensão, em volts, e I denota a corrente elétrica, em ampères. Essa relação confirma que potência e tensão são grandezas diretamente proporcionais, explicando o motivo de que, quando a corrente se mantém constante e a tensão diminui, a potência também diminui, afetando, assim, a eficiência do sistema.

Em dias ensolarados e sem nuvens, a temperatura da célula pode variar de 20°C a 40°C acima da temperatura ambiente, ou seja, se a temperatura ambiente for de 25°C, a temperatura da célula pode atingir até 65°C (STAMBUK, 2017). Esse fator se dá devido aos fenômenos de troca térmica entre os módulos, seus componentes e o ambiente. Por isso, a redução da eficiência das células devido ao aumento de temperatura é mais expressiva em locais com alta temperatura ambiente (MELO, 2000).

Segundo Hersch (1982 *apud* MELO, 2000),

Os efeitos físicos que a temperatura exerce sobre a eficiência de conversão são complexos, dentre os quais dois são mais expressivos: (1) o aumento da temperatura causa uma maior vibração da rede do semicondutor, o que interfere na passagem livre dos portadores de carga; e (2) a junção perde seu poder de separar as cargas. O primeiro efeito pode ocorrer a baixas temperaturas, enquanto o segundo ocorre apenas a temperaturas bastante elevadas (próximas a 300°C).



### 3. METODOLOGIA

Para analisar os efeitos da temperatura em sistemas de energia solar fotovoltaica com otimizadores de potência, foram coletados dados de geração e de temperatura de duas usinas localizadas em locais diferentes, para que fossem analisados os efeitos não só da temperatura, mas também da irradiação.

Os dados foram cedidos por empresas do ramo da energia solar do estado do Ceará e do Rio Grande do Sul. Informações sobre as empresas e sobre os proprietários do sistema não serão fornecidas para preservar a identidade dos mesmos.

Neste capítulo, serão apresentados os meios para coleta de dados e a metodologia utilizada para análise dos mesmos.

#### 3.1 Coleta de Dados

Para possibilitar as análises, foram cedidos por duas empresas do setor de energia solar fotovoltaica dados de geração e de temperatura de duas usinas no período de janeiro a abril de 2022. Os dados são provenientes da plataforma de monitoramento SolarEdge, que os atualiza em tempo real através de uma comunicação *Wireless*.

Uma antena de comunicação presente no inversor é responsável por realizar a conexão do mesmo à internet do local, transferindo os dados de geração dos inversores, que são compartilhados através da sua placa de comunicação, através dessa conexão para a plataforma de monitoramento, que pode ser acessada tanto pela empresa instaladora quanto pelo proprietário do sistema.

A Figura 9, abaixo, ilustra a tela inicial do aplicativo de monitoramento da SolarEdge, que está disponível para download gratuito para aparelhos com IOS ou Android, além de possuir uma versão disponível na web, para ser acessada através de computadores ou aparelhos celulares.

Figura 9 - Plataforma de monitoramento de sistemas com SolarEdge.



Fonte: SolarEdge (2022).

Para o proprietário, existe um aplicativo que pode ser instalado no aparelho celular, permitindo-o acompanhar os dados em tempo real. Para o instalador, também há uma opção em aplicativo e em um site, que agrupa todas as instalações já realizadas por esse instalador sob um mesmo *login*, facilitando o acompanhamento. Neste *login* é possível acompanhar dados de geração, temperatura ambiente, velocidade do vento, tensão dos equipamentos, tensão da rede, corrente, frequência e outros.

Visto que a plataforma funciona como um banco de dados de geração, armazenando todos os dias e valores de geração e outras variáveis atreladas ao sistema, foram utilizados neste trabalho os dados coletados desde o primeiro dia de janeiro de 2022 até o último dia de abril do mesmo ano. Além dos dados de geração, os valores de temperatura ambiente que estão sendo utilizados para as análises também foram retirados da plataforma de monitoramento. Nela, também então disponíveis valores de velocidade do vento, assim como dados de funcionamento, como tensão, corrente e outros.

A fim de comparar os dados reais obtidos através do monitoramento com dados simulatórios para verificar a eficiência de ambos, foram utilizadas as plataformas Global Atlas Solar e Designer SolarEdge.

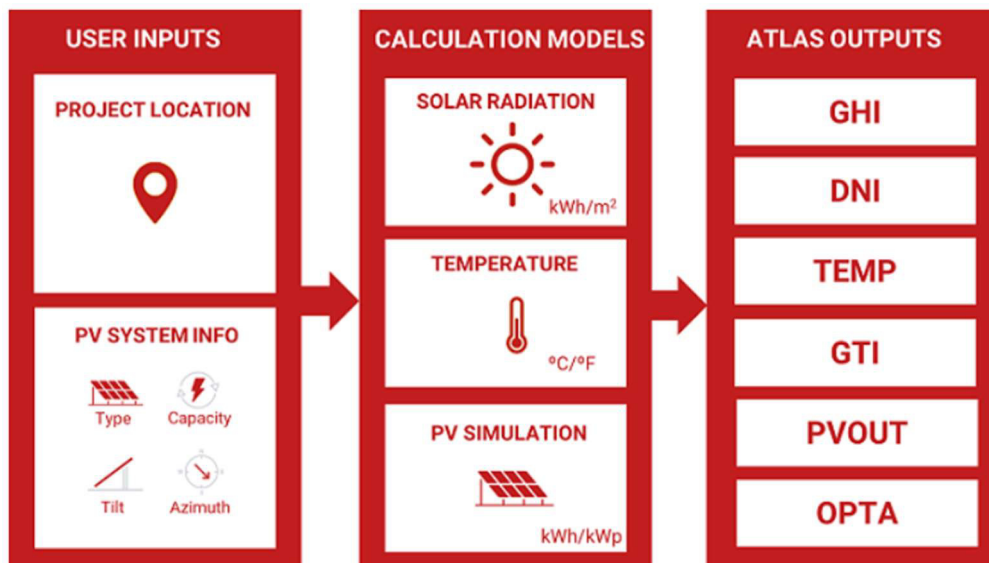
### 3.2 Global Atlas Solar

O coletivo The World Bank Group, formado por The World Bank e International Finance Corporation, formaram o Global Atlas Solar para apoiar a expansão da energia solar nos países que são seus clientes, inclusive o Brasil. Esse projeto é financiado pelo Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), que possui uma iniciativa global de mapeamento de recursos de energia renovável, incluindo biomassa, energia solar e energia eólica.

Os dados presentes do Global Atlas Solar foram fornecidos pela Solargis, que desenvolve, desde 2010, plataformas de banco de dados de recursos solares e modelagem de energia fotovoltaica.

Os dados fornecidos pelo Global Atlas durante uma pesquisa, são resultados de uma série de dados pré-calculados que podem ser recuperados em praticamente qualquer local do mapa global. As simulações de tipos e configurações específicas de sistemas fotovoltaicos são calculadas sob demanda, usando algoritmos e banco de dados internos da Solargis, conforme apresenta a Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de funcionamento do Global Atlas Solar.



Fonte: Global Atlas Solar (2022).

O diagrama ilustra o seguinte passo a passo: primeiro o usuário deve informar a localização do projeto e informações básicas do sistema, como sua capacidade de geração, o tipo (comercial, residencial, em solo, dentre outros); a partir dessas informações, a plataforma utiliza modelos de cálculo baseados em radiação solar, temperatura e simulações fotovoltaicas; por fim, o Atlas emite algumas variáveis determinadas a partir dos modelos de cálculo baseados nos dados da Solargis, sendo algumas delas: irradiação horizontal global (GHI), temperatura do

ar (TEMP) e uma simulação de geração por unidade de potência pico do sistema proposto, chamada de PVOUT, que significa, ao pé da letra, Energia Fotovoltaica Específica de Saída.

Para o cálculo de simulação de produção de um sistema, alguns fatores são fundamentais, sendo alguns deles: a quantidade de radiação incidente nos painéis, condições climáticas locais, montagem dos painéis e a temperatura.

Quando o usuário fornece para o Global Atlas Solar a localização, o *software* busca séries de dados de radiação solar e de temperatura do ar no Solargis para, com eles, calcular médias que possam contribuir para o cálculo de uma produção esperada para cada mês do ano de acordo com o tipo de instalação, que podem ser: residencial de pequeno porte, comércio de médio porte, grande escala montado em solo e grande escala com instalação flutuante.

Para instalações residenciais de pequeno porte, o *software* considera que o sistema será instalado em telhado, possuindo uma ventilação reduzida, aumentando a temperatura dos painéis e reduzindo a eficiência e, portanto, afetando os valores de simulação fornecidos.

Sistemas comerciais de médio porte consideram sistemas de 10 a 100 kWp de potência instalada, com montagem em telhados planos, com inclinação ideal e melhor resfriamento, melhorando a eficiência e os valores de simulação.

Os sistemas de solo em grande escala abrangem, como o próprio nome sugere, instalações de solo, onde os painéis são montados de maneira inclinada fixa (sem rastreador solar). Neste cenário, a ventilação é melhor do que nos outros dois casos, melhorando sua eficiência.

As instalações flutuantes consistem de instalações em alto mar feitas em pontões de plástico com orientação para o equador. Por possuir maiores fatores de risco do que usinas instaladas em solo, aqui a eficiência é reduzida na simulação.

Além do tipo de instalação, a localização também influencia nos valores de simulação, visto que variam latitude, longitude, inclinação, azimute e outros fatores que são significativos para a quantificação de produção do sistema.

As etapas de conversão para a simulação são as seguintes:

1. A partir do local fornecido, o Global Atlas calcula a irradiação global que estaria presente em um plano inclinado de painéis fotovoltaicos a partir do modelo de irradiação difusa para superfícies inclinadas, que consiste de um modelo proposto por Liu e Jordan que considera que a irradiação difusa é recebida de maneira uniforme em todo o hemisfério celeste, não levando em conta as distorções causadas por fatores atmosféricos (SOUZA, et al; 2020);

2. São calculadas perdas por sombreamento causado por características do terreno e por linhas de painéis, em caso de instalações em solo, por exemplo, em que a primeira fileira de painéis pode causar sombreamento nas últimas fileiras; não considerando edificações, vegetações e obstáculos;
3. O desempenho dos painéis é calculado a partir da implementação do modelo de 5 parâmetros De Soto, que consiste em um conjunto de 5 equações para a definição da temperatura da célula ( $T_c$ ) e da irradiância total absorvida ( $S$ );
4. São calculadas perdas por conversão de energia (de CC para CA).

A taxa de incerteza para os valores fornecidos pela Solargis, variam de 4% a 9% em países como Brasil, África do Sul, Chile e Austrália; taxa considerada baixa se comparada à faixa de 8% a 14% presente em locais como Norte da Índia, África Ocidental, região do Golfo e algumas regiões da China.

Através do Global Atlas, foram coletados dados de PVOut e de irradiação para ambas as localidades em que cada usina está instalada, com o objetivo de verificar as influências da irradiação e da localização da instalação na eficiência, além da temperatura.

### **3.3 Designer SolarEdge**

Além dos dados obtidos através do Global Atlas Solar, os sistemas foram simulados na plataforma Designer SolarEdge, que permite a elaboração de um projeto em 3D com as dimensões reais do local de instalação. A plataforma também possibilita um estudo de sombreamento, em caso de obstáculos no telhado ou mesmo construções/árvores próximas e mais altas do que o local de instalação.

Através da plataforma, foram obtidos dados de expectativas de geração de acordo com os meses do ano, levando em consideração as estações em que os dias têm mais ou menos horas de sol; as margens de perdas devido à temperatura, sombreamento ou fatores como desgaste dos equipamentos e outros.

O funcionamento do Designer é semelhante ao do Global Atlas Solar. Os dados de irradiação são importados de acordo com a localização, reduzindo os valores de erro e fornecendo estimativas mais próximas da realidade.

A seguir, serão apresentadas as usinas e os valores simulados para cada uma delas utilizando os dados adquiridos através das ferramentas apresentadas.

### 3.4 Apresentação das Usinas

Conforme mencionado anteriormente, duas usinas foram utilizadas para a coleta de dados, que serão mencionadas como Usina A e Usina B. As usinas referem-se a clientes reais, que terão os dados de seus proprietários preservados devido à proteção de dados. Os dados de geração, no entanto, foram enviados pelas empresas instaladoras.

A seguir, ambas as usinas serão apresentadas.

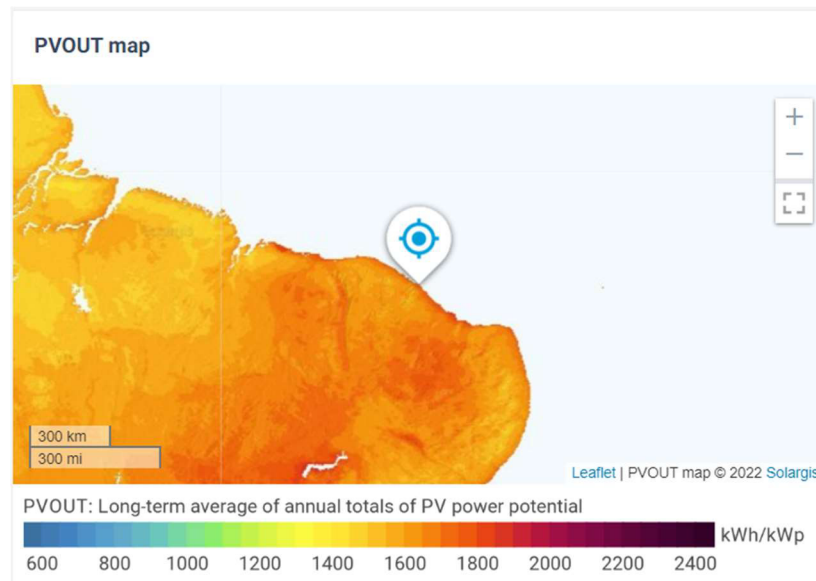
#### 3.4.1 Usina A

A primeira usina escolhida, que será chamada de Usina A, é um sistema de 89,64 kWp de potência nominal, composto por 216 painéis de 415 W de potência cada, da marca Canadian Solar. Também compõem o sistema 3 inversores SolarEdge, de 20,10 kW de potência cada, cada um acomodando 72 painéis em duas *strings* de 36 módulos cada. Além disso, o sistema possui 108 otimizadores de potência P850, que possuem uma potência nominal de 850 W. O sistema também conta com toda a estrutura de fixação necessária.

A Usina A fica localizada na cidade de Fortaleza, no bairro Dunas e trata-se de uma instalação residencial. O sistema foi instalado no ano de 2021, no mês de agosto, e possui uma estimativa de geração mensal de 11.447,33 kWh, baseada nas simulações fornecidas pelo Designer SolarEdge.

Além dessa informação, o Global Atlas Solar fornece a taxa de irradiação direta no local que, neste caso, é de 167,73 kWh/m<sup>2</sup> por mês. O site também fornece um gráfico de calor mostrando uma média de potencial de energia fotovoltaica do local de instalação, conforme pode ser observado na Figura 11 a seguir:

Figura 11 - Potencial de geração médio do local de instalação da Usina A.



Fonte: Simulação Designer SolarEdge.

A simulação feita na plataforma do Designer forneceu um layout conforme apresentado na Figura 12, considerando as quedas dos telhados e o sombreamento das árvores que cercam o local:

Figura 12 - Simulação de layout de instalação da Usina A através do Designer SolarEdge.



Fonte: Simulação Designer SolarEdge.

Quanto às previsões de geração, a plataforma forneceu os dados apresentados no Quadro 1, abaixo:

Quadro 1 - Simulação de geração mensal da Usina A de acordo com cálculos do Global Atlas Solar.

Mês	Produção Fotovoltaica (kWh)
Jan	11.386
Fev	9.789
Mar	10.047
Abr	9.504
Mai	10.614
Jun	10.293
Jul	12.036
Ago	12.803
Set	12.354
Out	13.030
Nov	12.750
Dez	12.762

Fonte: Simulação Designer SolarEdge.

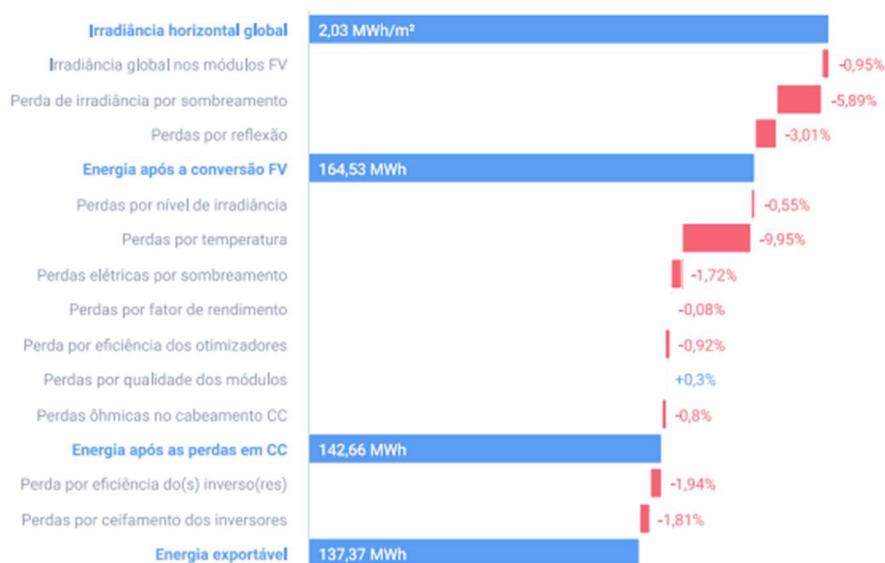
As variações de previsões de geração devem-se, principalmente, ao período chuvoso do estado, que compreende os primeiros seis meses do ano, com maior concentração de chuvas de fevereiro a junho.

Conforme mencionado, a plataforma fornece, também, estimativas para as perdas que podem reduzir a eficiência de geração. Para o layout plotado e o local de instalação, os valores aproximados de perdas podem ser observados na Figura 13:



Figura 13 - Diagrama de perdas da Usina A.

## DIAGRAMA DE PERDAS DO SISTEMA



Fonte: Simulação Designer SolarEdge.

A partir do diagrama, pode ser observado que a maior perda possível para a Usina A é a perda por temperatura, representando 9,95%. Outro valor significativo, é o de perdas por sombreamento, representando 5,89% de energia perdida.

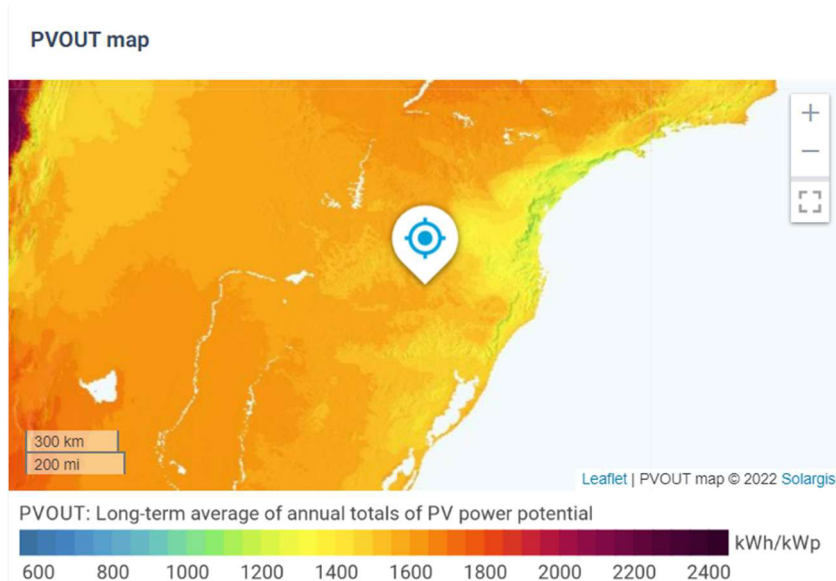
### 3.4.2 Usina B

A segunda usina, que será chamada de Usina B, é um sistema de 90,06 kWp de potência nominal, composto por 228 painéis de 395 W de potência cada, da marca JA Solar. Assim como a Usina A, a Usina B também possui 3 inversores SolarEdge de 20,10 kW de potência cada e conta com 114 otimizadores de potência P850 e foi instalada no segundo semestre de 2019.

A instalação foi realizada no município de Erechim, localizado no Rio Grande do Sul. A geração esperada é de aproximadamente 10.844,25 kWh mensais.

Quanto a potencial de geração e irradiação, o Global Atlas Solar forneceu os valores de 129,3 kWh/kWp e 146,23 kWh/m² mensais, respectivamente. O mapa da média anual de energia fotovoltaica de saída pode ser observado na Figura 14:

Figura 14 - Potencial de geração médio do local de instalação da Usina B.



Fonte: Simulação Designer SolarEdge.

É possível observar que o local de instalação da Usina B fornece um gráfico com menores valores de potencial de geração do que aquele obtido a partir do local da Usina A. Além disso, os valores de temperatura do ar de ambos também são bem distintos, sendo o da Usina B 17,6°C e o da Usina A 26,6°C.

A Usina B também apresenta um valor de geração esperada mais baixo que o da Usina A, mesmo possuindo maior potência. Os valores de irradiação e energia fotovoltaica de saída também são maiores na Usina A.

A geração estimada a partir do layout, considerando as variações causadas pelas estações do ano, pode ser observada a seguir no Quadro 2:

Quadro 2 - Simulação de geração mensal da Usina B de acordo com cálculos do Global Atlas Solar.

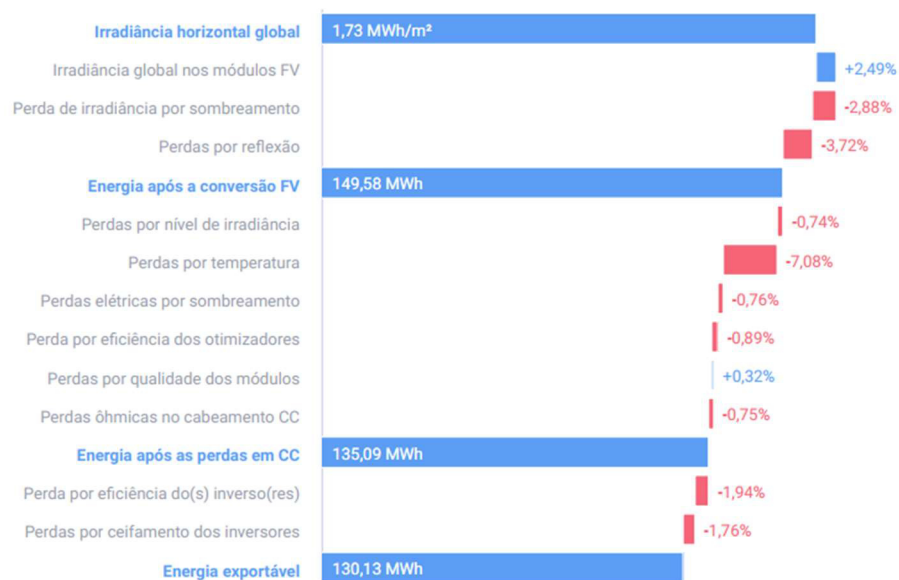
Mês	Produção Fotovoltaica (kWh)
Jan	14.233
Fev	11.923
Mar	12.676
Abr	9.395
Mai	8.543
Jun	7.381
Jul	7.600
Ago	8.921
Set	9.837
Out	11.840
Nov	13.545
Dez	14.237

Fonte: Simulação Designer SolarEdge.

Quanto às perdas, os valores fornecidos pelo Designer para a Usina B podem ser observados na Figura 15:

Figura 15 - Diagrama de perdas da Usina B.

#### DIAGRAMA DE PERDAS DO SISTEMA



Fonte: Simulação Designer SolarEdge.

Pode ser observado que, para a Usina B, a maior perda possível também é aquela por temperatura, mas com um valor menor, sendo este 7,08%. Outro valor significativo, é o de

perdas por reflexão, representando 3,72%, que podem estar relacionadas à presença de vários prédios mais altos que a altura de instalação, resultando no fenômeno de reflexão.

A seguir, um resumo das principais informações das duas usinas, além de um breve comparativo entre as mesmas, está disposto nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Dados da Usina A.

<b>DADOS USINA A</b>	
<b>MÓDULOS</b>	CANADIAN SOLAR 415W
<b>QUANTIDADE DE MÓDULOS</b>	216
<b>INVERSORES</b>	SE20.1K
<b>QUANTIDADE DE INVERSORES</b>	3
<b>OTIMIZADORES DE POTÊNCIA</b>	P850
<b>QUANTIDADE DE OTIMIZADORES DE POTÊNCIA</b>	108
<b>POTÊNCIA TOTAL</b>	89,64 kWp
<b>LOCAL DE INSTALAÇÃO</b>	Fortaleza/CE
<b>IRRADIAÇÃO LOCAL</b>	167,73 kWh/m <sup>2</sup>
<b>GERAÇÃO ESPERADA PARA O PERÍODO CONSIDERADO</b>	40.726 kWh

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3 – Dados da Usina B.

<b>DADOS USINA B</b>	
<b>MÓDULOS</b>	JA SOLAR 395W
<b>QUANTIDADE DE MÓDULOS</b>	228
<b>INVERSORES</b>	SE20.1K
<b>QUANTIDADE DE INVERSORES</b>	3
<b>OTIMIZADORES DE POTÊNCIA</b>	P850
<b>QUANTIDADE DE OTIMIZADORES DE POTÊNCIA</b>	114
<b>POTÊNCIA TOTAL</b>	90,06 kWp
<b>LOCAL DE INSTALAÇÃO</b>	Erechim/RS
<b>IRRADIAÇÃO LOCAL</b>	146,23 kWh/m <sup>2</sup>

<b>GERAÇÃO ESPERADA PARA O PERÍODO CONSIDERADO</b>	48.227 kWh
--	------------

Fonte: Elaborado pela autora.

### **3.5 Tabulação de Dados em Planilhas Eletrônicas**

Para geração de gráficos, tabelas e porcentagens que possibilitaram a análise de dados, foi utilizado o Excel, que consiste em um aplicativo de criação de planilhas eletrônicas, que são programas digitais que utilizam tabelas para realização de cálculos, análise de dados, geração de gráficos e/ou banco de dados, entre outros.

Atualmente o Excel faz parte do Office, que é um pacote de *softwares* desenvolvidos para realizar vários tipos de tarefas, como editar textos, gerar apresentações de slides e as planilhas executivas.

Para a análise de dados deste trabalho, o Excel foi utilizado na formação de tabelas, geração de gráficos e cálculos que contribuíram para os resultados que serão apresentados no capítulo seguinte.

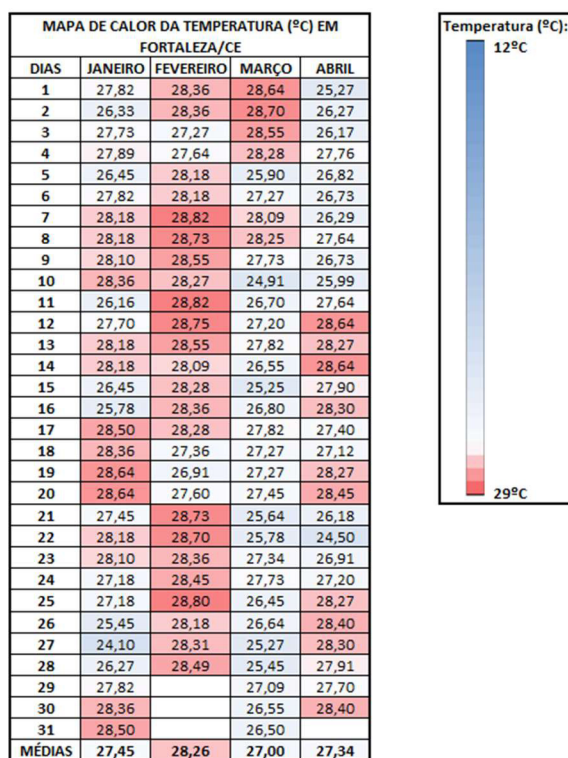
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das plataformas mencionadas e o que elas representam a partir dos referenciais traçados.

##### 4.1 Temperatura

O primeiro componente dos dados coletados a ser analisado, será a temperatura. Devemos lembrar que a Usina A fica em Fortaleza, Ceará e a Usina B fica em Erechim, no Rio Grande do Sul. Para a análise, foi considerado o período de janeiro a abril de 2022. A escala de temperatura utilizada para classificar os valores obtidos foi a mesma: de 12°C a 29 °C. Os valores obtidos estão expostos na Figura 16 a seguir.

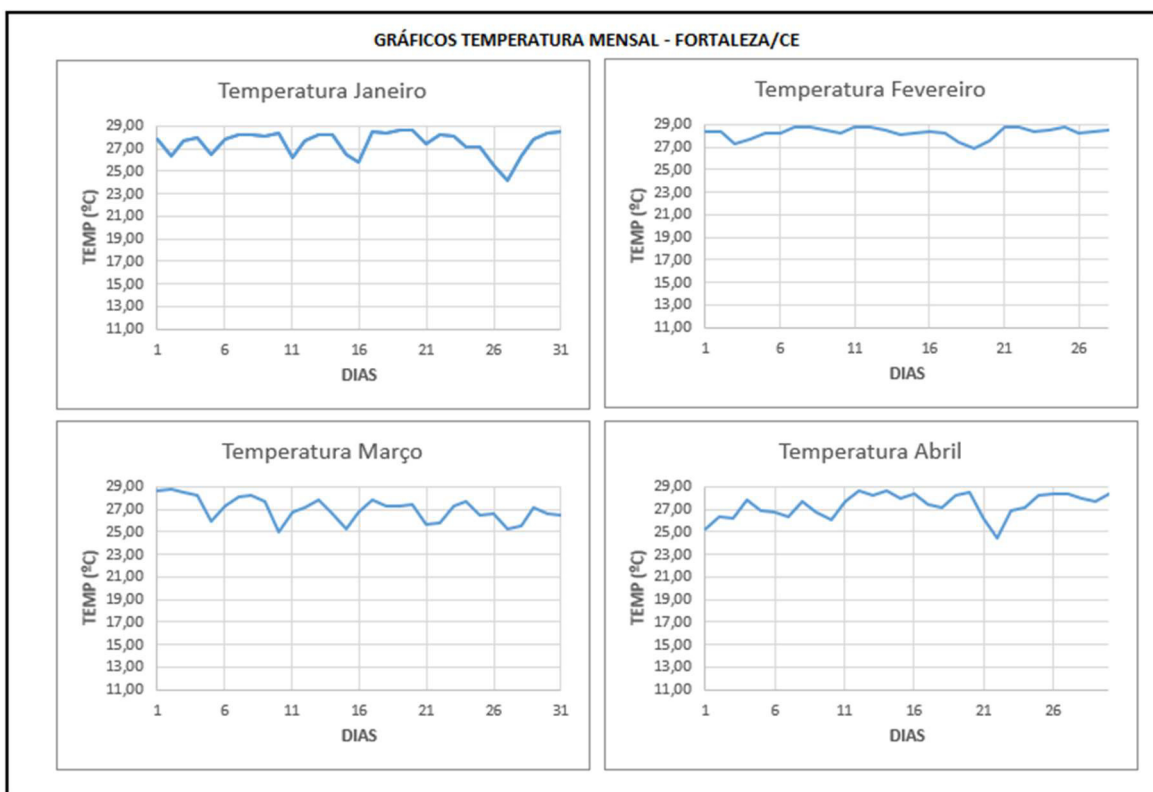
Figura 16 - Mapa de calor da temperatura do local de instalação da Usina A.



Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar que os meses de janeiro e fevereiro apresentaram maiores temperaturas, apesar de a média mensal de todo o período estar sempre acima de 27°C. Abaixo serão apresentados gráficos mês a mês da temperatura diária a fim de acompanhar de maneira mais linear o comportamento dessa temperatura.

Gráfico 1 - Curvas de temperatura dos meses de Janeiro a Abril de 2022 em Fortaleza (Usina A).



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo dados coletados pelo NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, as temperaturas médias registradas em Fortaleza no período considerado estão de acordo com os valores colhidos através do sistema de monitoramento. As médias registradas foram, conforme segue na Figura 17:

Figura 17 – Comparação entre as médias de temperaturas obtidas e as registradas pelo NOAA.

MÊS	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL
MÉDIA NOAA	28	28	27,5	27,5
MÉDIA MONITORAMENTO	27,49	28,26	27,00	27,34
ERRO	1,84%	0,94%	1,83%	0,60%

Fonte: Elaborado pela autora.

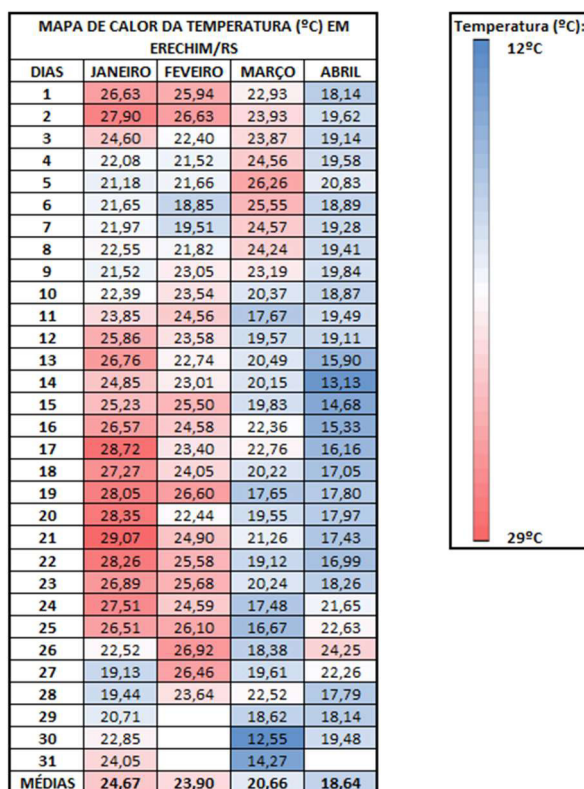
É possível observar uma baixa variação de temperatura nas curvas do Gráfico 1, fato que pode ser comprovado através do desvio padrão da amostra, que foi de aproximadamente 1,06, demonstrando a homogeneidade dos valores coletados.

Esse fenômeno pode ser justificado através da localização do Estado, que está no Nordeste, região que está mais próxima da linha do Equador, atingindo maiores temperaturas e tendo estações climáticas menos definidas. Segundo Raul Fritz, meteorologista da Funceme,

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, esse fato justifica as pequenas variações entre as máximas, médias e mínimas no decorrer do ano, tornando difícil a identificação de inverno e verão.

Quanto aos valores encontrados para a cidade do Sul, a Figura 18 dá:

Figura 18 - Mapa de calor da temperatura do local de instalação da Usina B.



Fonte: Elaborado pela autora.

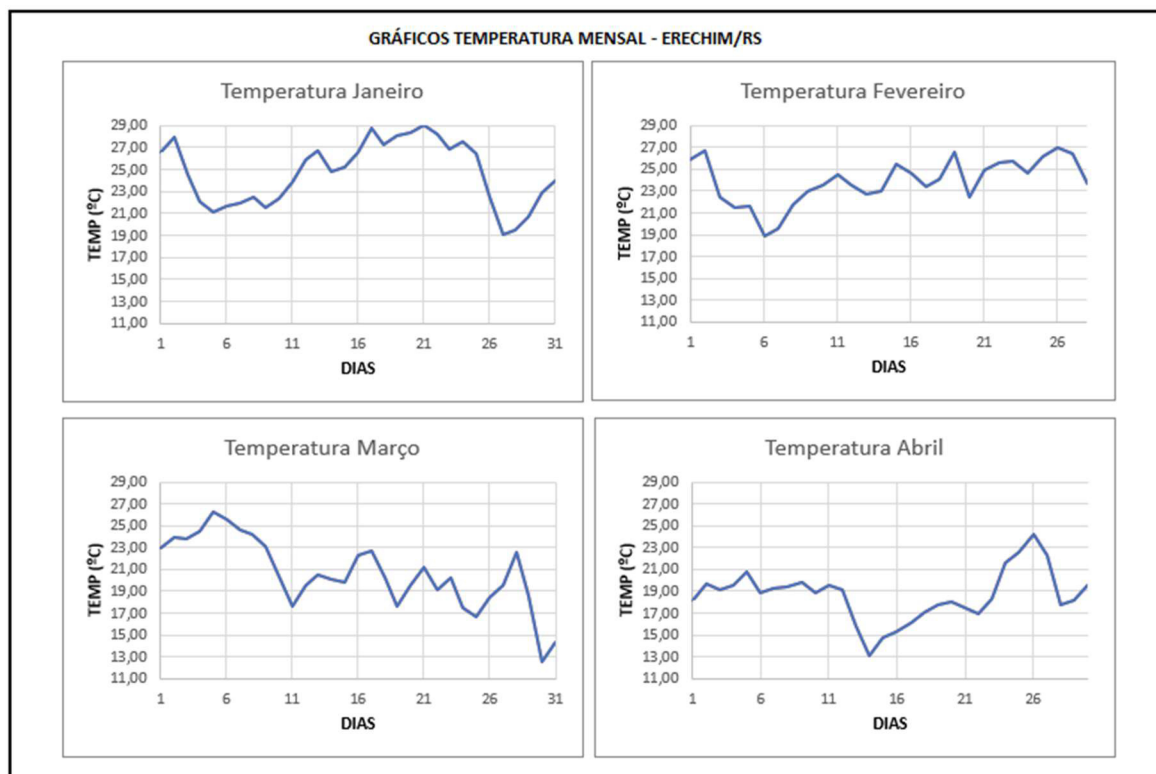
Assim como em Fortaleza, Erechim apresentou temperaturas mais elevadas nos dois primeiros meses do ano. No entanto, por estar localizada no Sul do país, a cidade possui suas estações bem definidas, apresentando uma maior variação de temperaturas diárias, que pode ser justificada através do desvio padrão de 3,63 obtido para a amostra, valor aproximadamente três vezes maior que aquele observado nos dados referentes à Fortaleza.

A cidade atingiu a mínima de 12,55°C e a máxima de 29,07°C. A localização também justifica as menores médias mensais, se comparadas com os valores encontrados na capital cearense, visto que a cidade Gaúcha se localiza no sul do país, mais distante da linha do equador e recebendo maiores influências de massas de ar frias, além de outros fatores geográficos.

Para observar essa variação diária da temperatura mês a mês, o Gráfico 2 mostra:



Gráfico 2 - Curvas de temperatura dos meses de Janeiro a Abril de 2022 em Erechim (Usina B).



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme mencionado anteriormente, Erechim possui maiores variações diárias, além de também apresentar temperaturas mais baixas. Esse fato também pode ser constatado através dos gráficos, já que em Fortaleza a linha de tendência fica sempre acima dos 20°C, variando até quase 29°C. Na cidade gaúcha, contudo, é possível observar variações acentuadas, com valores ainda mais baixos nos meses de março e abril.

No período em questão, ambos os estados se encontram no período de verão, que, no Hemisfério Sul do Planeta, acontece de dezembro a março. No Ceará, no entanto, o período chuvoso compreende os meses de fevereiro a maio, podendo justificar menores temperaturas na época.

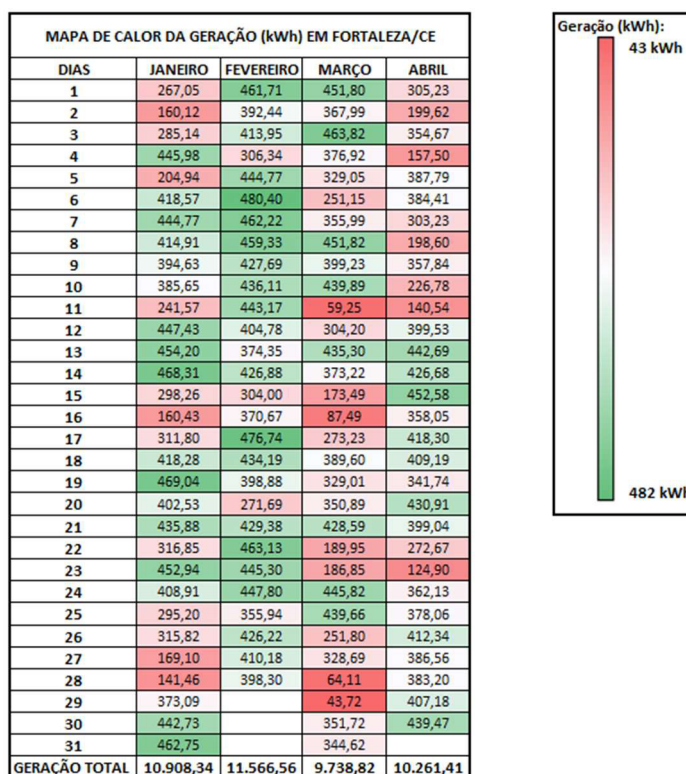
Já no Rio Grande do Sul, os maiores índices pluviométricos são registrados no período do inverno, que ocorre de junho a setembro, mas o estado não possui um verão seco. Em abril a temperatura do estado começa a cair, devido a chegada do outono.

## 4.2 Geração

Conforme mencionado, os valores de geração também foram coletados no mesmo período e, a seguir, serão apresentados.

Para a Usina A, teve-se:

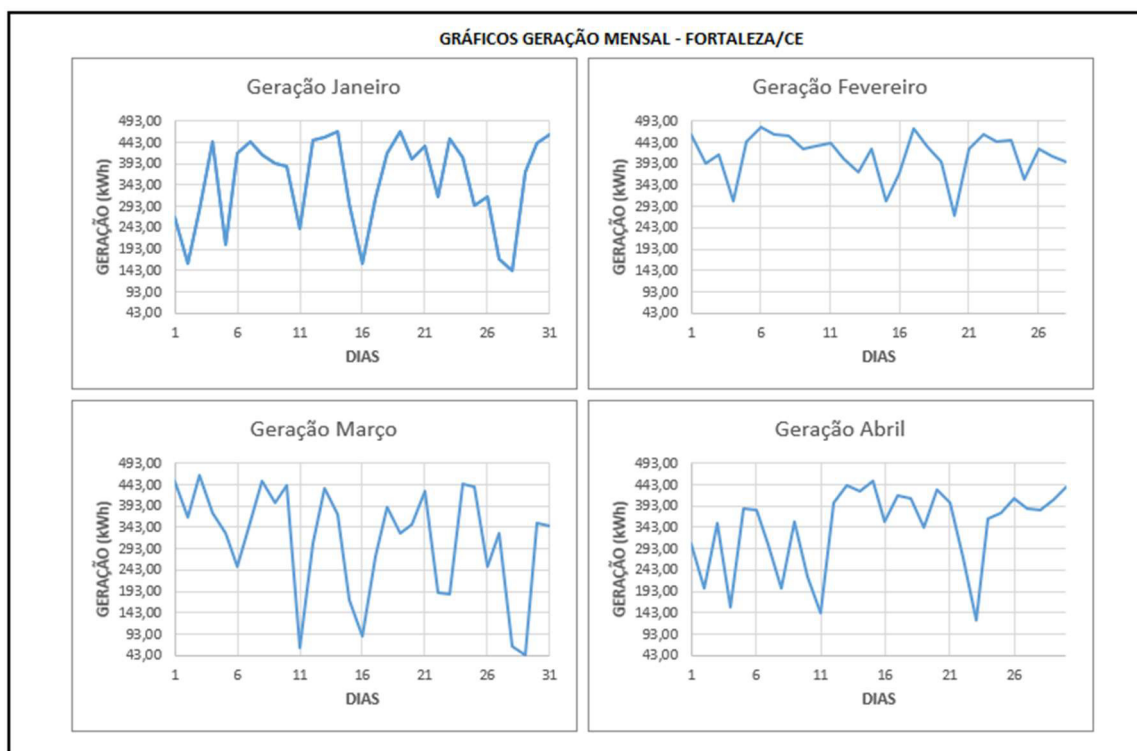
Figura 19 - Mapa de calor de geração da Usina A.



Fonte: Elaborado pela autora.

A fim de uma melhor visualização do comportamento diário da geração mês a mês, o Gráfico 3 fornece:

Gráfico 3 - Curvas de geração dos meses de Janeiro a Abril de 2022 da Usina A.



Fonte: Elaborado pela autora.

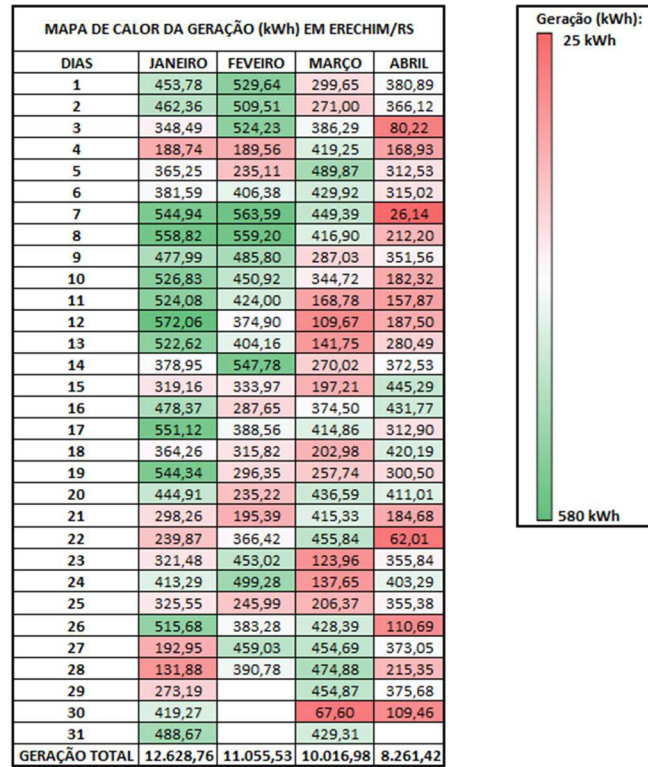
Os gráficos confirmam o que pôde ser observado na Figura 18: os maiores valores de geração ocorreram no mês de fevereiro; e os menores foram registrados no mês de março.

É válido mencionar que, segundo a Funceme, as chuvas ficaram 45,8% abaixo da média do Estado no mês de fevereiro de 2022. Portanto, apesar de ser o primeiro mês da quadra chuvosa do Ceará, o mês não registrou tantos dias chuvosos, o que pode justificar a maior geração observada no mesmo.

Ainda segundo a Fundação Cearense de Meteorologia, o mês de março registrou um desvio de 31,4% acima da média considerada normal para o período, além de ter sido um dos 10 maiores acumulados da série histórica para o mês. O grande volume de chuvas pode, portanto, justificar a baixa geração observada no terceiro mês do ano.

Quanto aos valores de geração de Erechim, a Figura 20 dá:

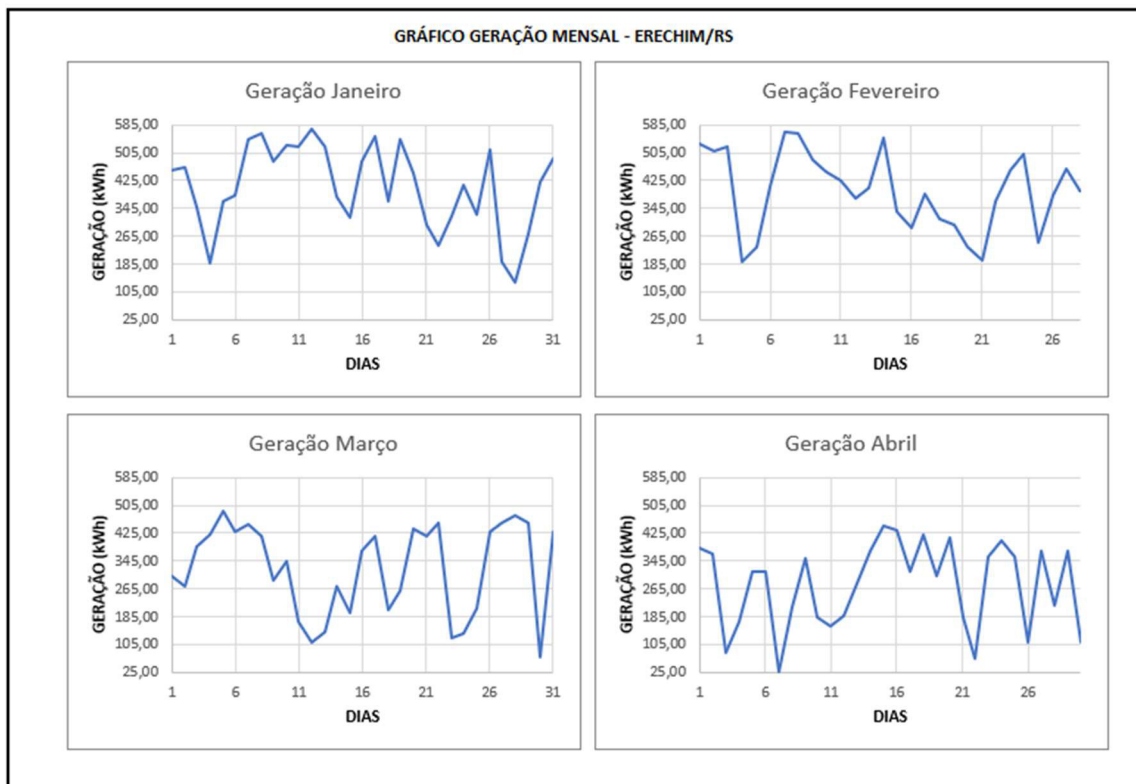
Figura 20 - Mapa de calor de geração da Usina B.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para melhor observar a variação diária dos valores obtidos, o Gráfico 4 segue:

Gráfico 4 - Curvas de geração dos meses de Janeiro a Abril de 2022 da Usina B.



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo dados da plataforma Climate-Data.org, o mês de janeiro é o que apresenta maior quantidade de horas de sol no período considerado, podendo justificar porque esse mês apresentou maior geração. Além disso, a geração muito abaixo do esperado no mês de maio pode ser justificada pela sua proximidade com o período do inverno do estado, que começa em junho.

A partir de maio, as temperaturas já começam a cair e o volume de chuvas começa a aumentar. Neste mês, é registrada uma média de 6 horas diárias de sol, enquanto em janeiro essa média é de 9 horas.

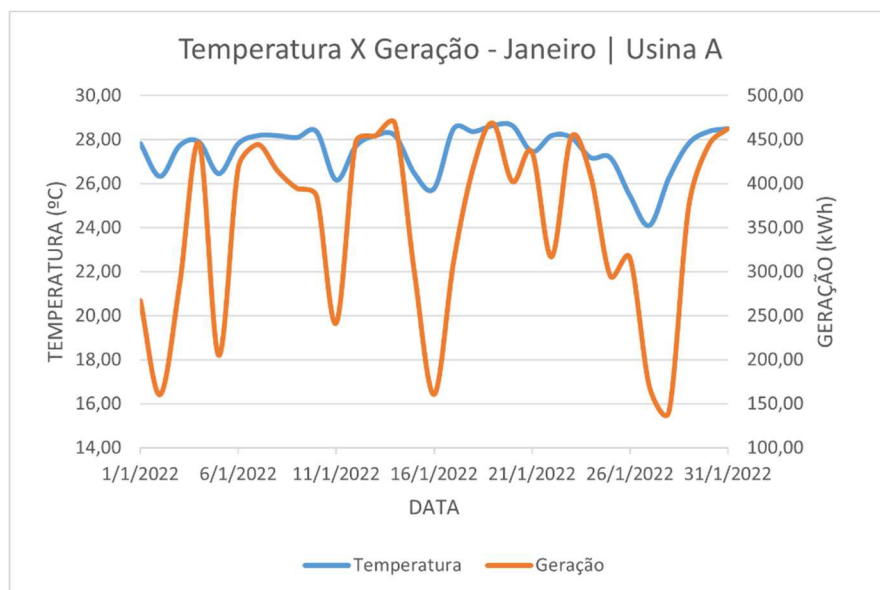
### 4.3 Relação entre temperatura e geração

A seguir serão apresentados gráficos que representam a relação que pôde se estabelecer entre temperatura e geração nas duas usinas utilizadas de referência.

#### 4.3.1 Usina A

Em janeiro, a Usina A registrou um total de 10.908,34 kWh gerados, o que representa 96% de eficiência. Neste mês, a maior geração alcançada foi 460,04 kWh, a uma temperatura de 28,64 °C. É válido salientar que, apesar de ter alcançado elevados valores de temperatura, janeiro registrou muitos dias chuvosos, podendo justificar as quedas vistas no Gráfico 5:

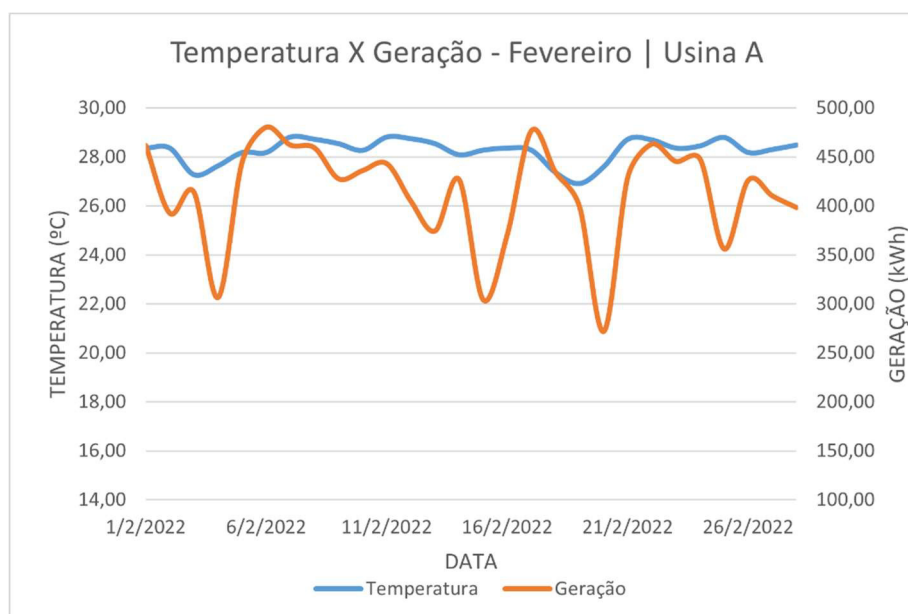
Gráfico 5 - Curva de Temperatura X Geração de janeiro da Usina A.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em fevereiro, a geração total foi de 11.566,56 kWh, alcançando 118% de eficiência no mês. A máxima geração registrada foi 480,40 kWh, a uma temperatura de 28,18 °C. Conforme mencionado anteriormente, fevereiro ficou bem abaixo do esperado no quesito pluviométrico, visto que o mês marca o início do período chuvoso no Ceará. A seguir, o Gráfico 6 mostra valores de geração mais consistentes, sem muitas quedas, confirmando que fevereiro foi um mês de muito sol.

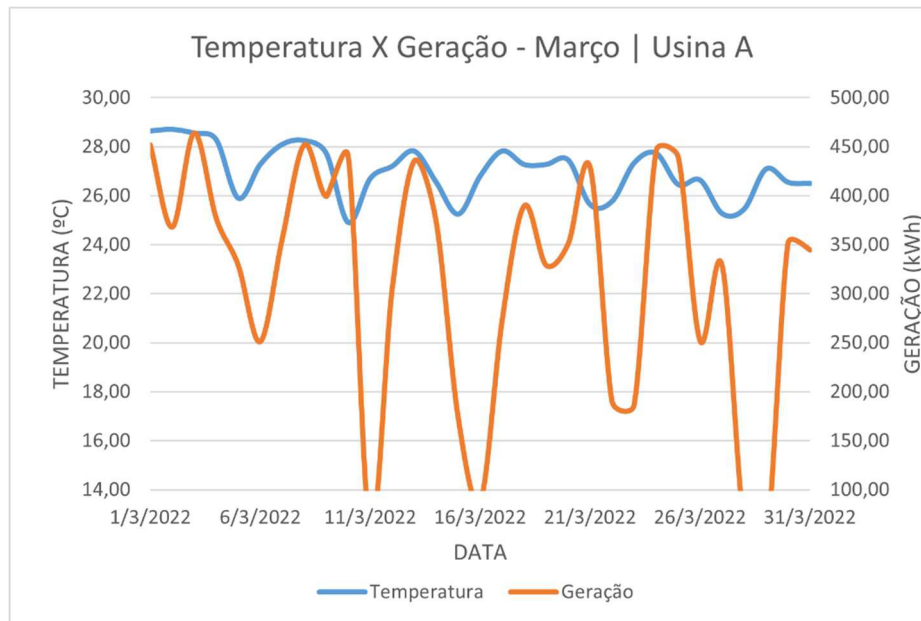
Gráfico 6 - Curva de Temperatura X Geração de fevereiro da Usina A.



Fonte: Elaborado pela autora.

No mês de março, a geração total atingiu 9.738,82 kWh, atingindo uma eficiência de 97%. A maior geração registrada foi de 463,82 kWh a uma temperatura de 25,27 °C. Conforme mencionado anteriormente, esse mês atingiu recordes de chuvas, justificando a geração um pouco abaixo do esperado, de acordo com o que pode ser observado no Gráfico 7.

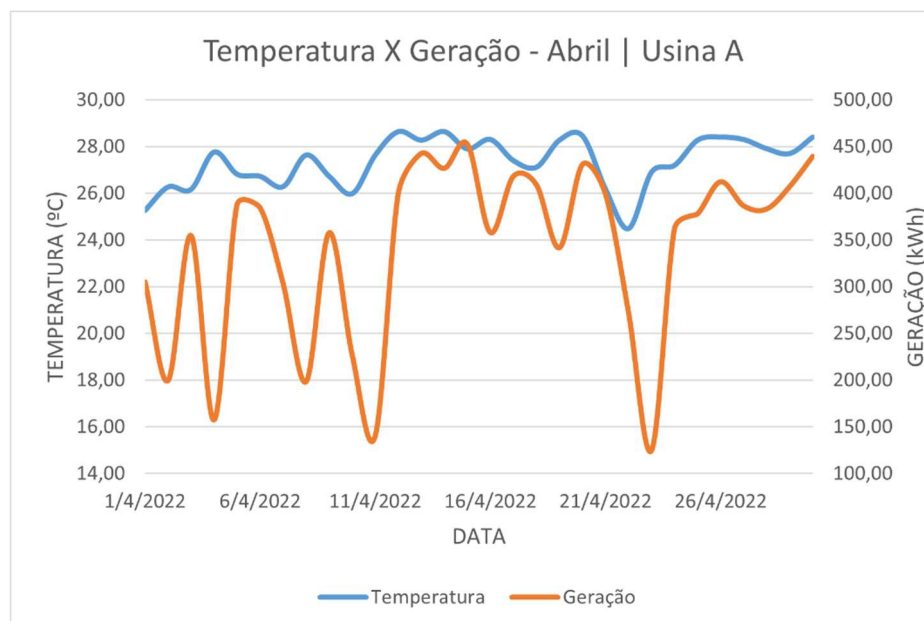
Gráfico 7 - Curva de Temperatura X Geração de março da Usina A.



Fonte: Elaborado pela autora.

Já o mês de abril acumulou 10.261,41 kWh de geração, atingindo 108%. A maior geração diária foi 452,58 kWh a uma temperatura de 27,64 °C. Abril não registrou tantos dias de chuva quanto março, fato que justifica o aumento de geração, conforme pode ser observado no Gráfico 8:

Gráfico 8 - Curva de Temperatura X Geração de abril da Usina A.



Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo o *datasheet* dos painéis, que é um documento que resume o desempenho e as especificações do equipamento, que encontra-se em anexo, a temperatura de operação ótima é de 25°C, ou seja, o módulo atingiria sua máxima geração à temperatura mencionada. No entanto, os testes que determinam tais variáveis são realizados em condições ideais e controladas, podendo haver variações em sistemas reais, como é o caso da Usina A.

No período considerado, 45% dos dias obtiveram geração acima da média e estavam com temperaturas acima de 25°C, demonstrando que o funcionamento ótimo do sistema pode variar do que é descrito no *datasheet*.

É possível observar que a geração foi maior nos meses em que foram registradas maiores temperaturas, o que pode estar associado ao fato de que esses meses também foram os que registraram menores chuvas.

A eficiência total do sistema no período analisado atingiu 104,3%, com registros de um acumulado de 42.475,13 kWh gerados e uma média mensal de 10.618,78 kWh; comparados à geração esperada de 40.726 kWh acumulados e uma média de 10.181,50 kWh.

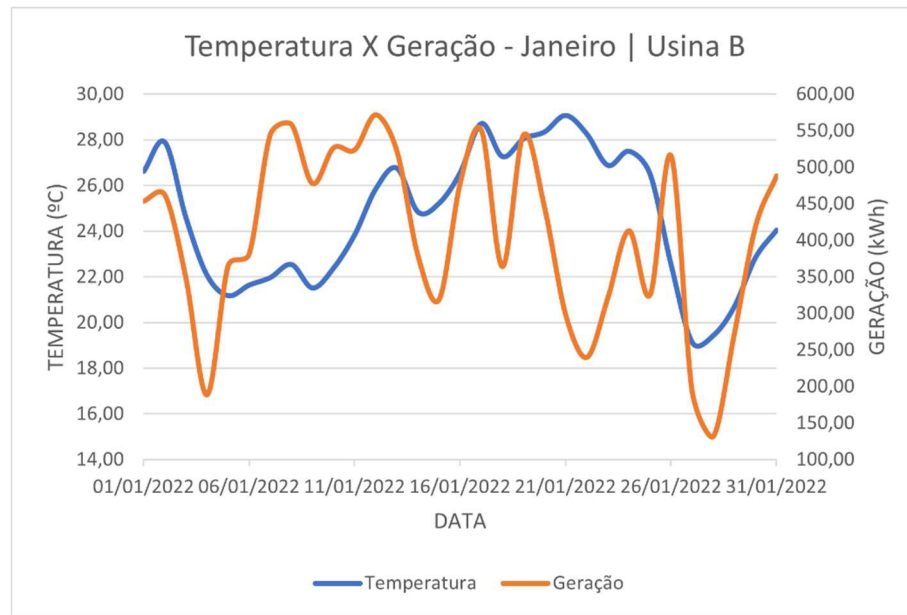
Não há, portanto, perdas de geração significativas por temperatura na Usina A no período analisado.

#### **4.3.2 Usina B**

Em janeiro a Usina B registrou a maior geração mensal do período, com 12.628,76 kWh de geração, atingindo 89% de eficiência, considerando uma geração mensal esperada de 14.233,00 kWh. Neste mês, a máxima geração registrada foi de 572,06 kWh a uma temperatura de 25,86 °C, no dia 12. Já a mínima foi de 131,88 kWh a uma temperatura de 19,44 °C, no dia 28.



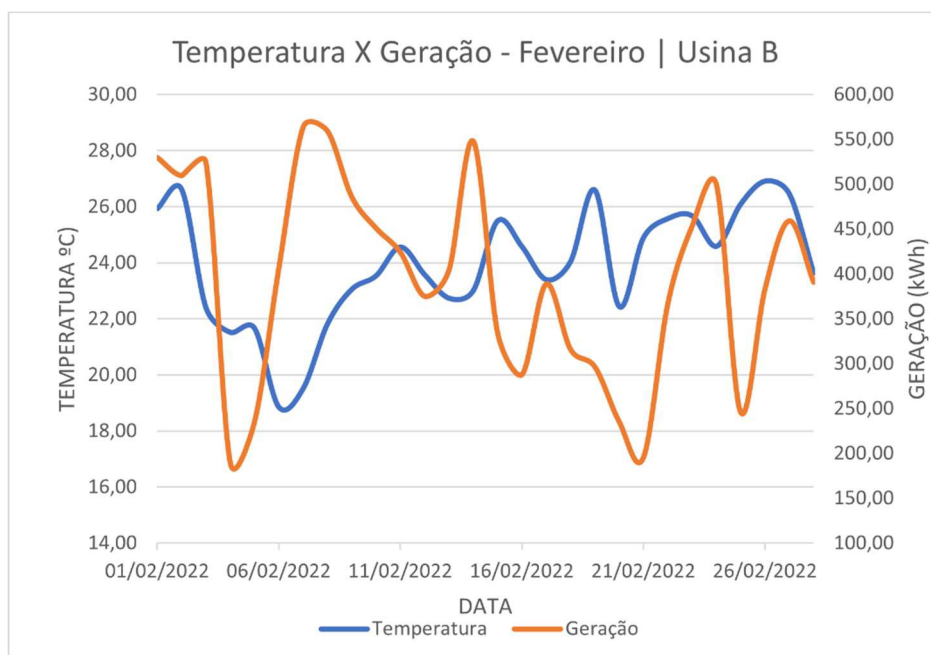
Gráfico 9 - Curva de Temperatura X Geração de janeiro da Usina B.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em fevereiro, a geração total foi de 11.055,53 kWh, atingindo uma eficiência de 93%. Neste período, a máxima geração registrada foi de 563,59 kWh, a uma temperatura de 22,44 °C, no dia 7. Já a mínima foi de 189,56 kWh, a uma temperatura de 21,66 °C, no dia 4. A seguir, mais informações sobre os valores registrados no mês.

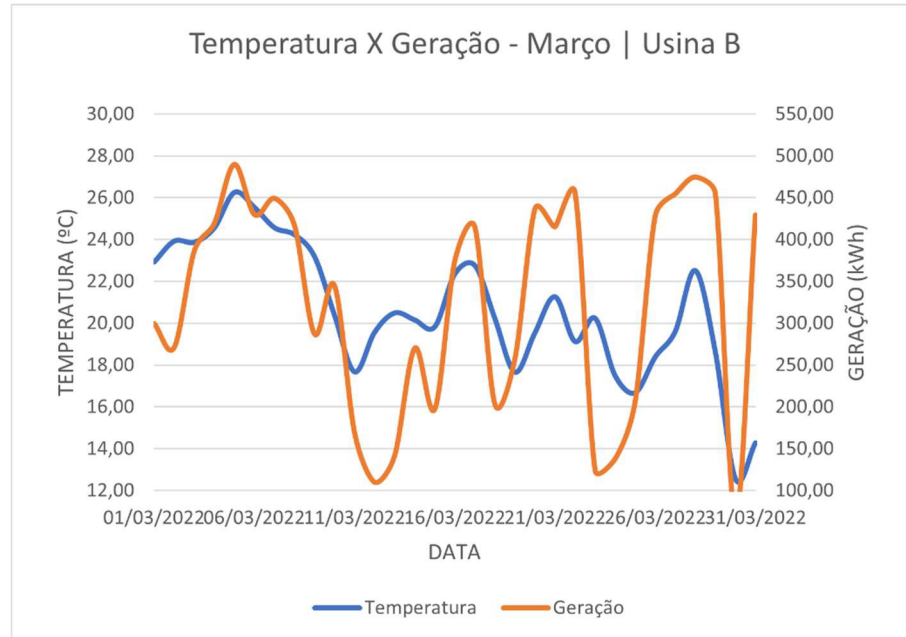
Gráfico 10 - Curva de Temperatura X Geração de fevereiro da Usina B.



Fonte: Elaborado pela autora.

Já em março, a geração total foi de 10.016,98 kWh, com uma eficiência de 79%. Neste mês, a geração máxima registrada foi de 489,87 kWh a uma temperatura de 17,65 °C, no dia 5. A mínima registrada foi de 67,60 kWh a uma temperatura de 25,55 °C, no dia 30.

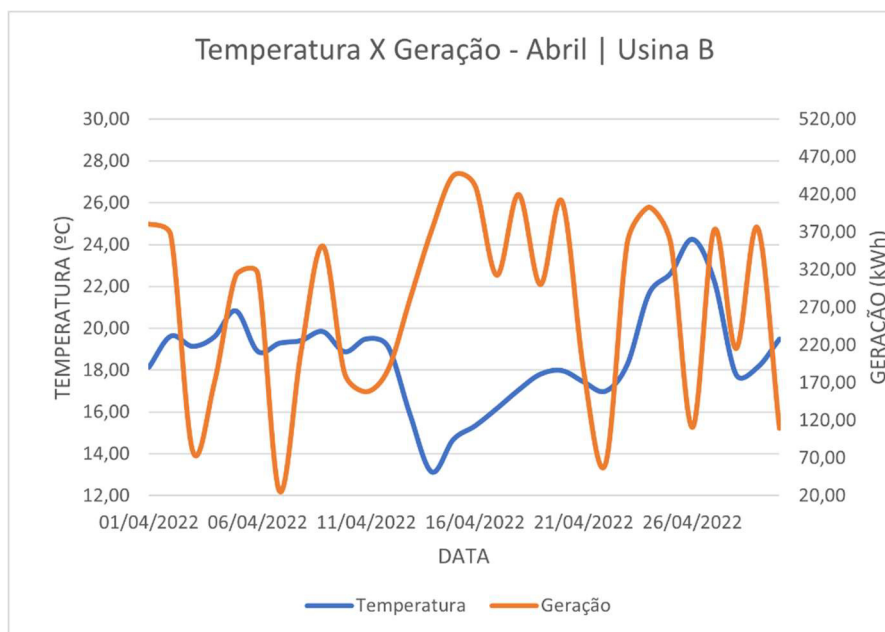
Gráfico 11 - Curva de Temperatura X Geração de março da Usina B.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em abril, a geração total foi de 8.261,42 kWh com uma eficiência de 88%. É válido ressaltar que, neste mês, não foi registrado nenhum dia com temperatura superior a 25°C. A geração máxima registrada foi de 445 kWh a uma temperatura de 18,87 °C, no dia 15. A mínima foi de 26,14 kWh a uma temperatura de 17,05 °C, no dia 07.

Gráfico 12 - Curva de Temperatura X Geração de abril da Usina B.



Fonte: Elaborado pela autora.

É possível observar que, conforme os meses foram registrando temperaturas mais baixas, a eficiência de geração também foi diminuindo. Alguns fatores podem justificar esse comportamento, sendo o principal deles a quantidade diária média de horas de sol que, conforme mencionado anteriormente, era de 9 horas em janeiro e foi diminuindo até atingir 6 horas em abril.

Quanto às curvas presentes nos gráficos, é possível observar 4 cenários: baixas gerações a baixas temperaturas (1), baixas gerações a altas temperaturas (2), altas gerações a altas temperaturas (3) e altas gerações a baixas temperaturas (4).

O cenário 1 pode ser observado em dias de pouco sol, normalmente dias chuvosos, nublados ou mesmo frios, como no caso de Erechim. O cenário 2 pode ser observado em dias com muitas nuvens e pouco vento. Neste caso a circulação de ar é menor, aumentando a temperatura e a geração se torna menor devido à sombra projetada pelas nuvens. Já o cenário 3 pode ser visto em dias bem ensolarados, com poucas nuvens no céu. O 4º e último cenário pode ser visto em dias com sol, mas com temperaturas amenas. Esse cenário é mais presente na amostra da cidade Gaúcha, visto que a capital cearense raramente atinge temperaturas abaixo de 24°C.

Neste caso, é possível concluir que as perdas se deram mais devido a variações de clima (menores quantidades de horas de sol, chuvas, dias nublados e etc) do que por temperaturas altas.

É válido salientar que as perdas podem ser justificadas por motivos não analisados nesta pesquisa, tais como sombreamento, tempo de destaque dos equipamentos, características de instalação (como distância entre os painéis, altura de instalação, etc). Esses e outros fatores foram desconsiderados durante as análises.

#### **4.4 Influência da irradiação**

Através dos dados coletados, foi possível observar uma eficiência de comparação entre dados reais e dados esperados de 104,30% na Usina A e de 87,01% na Usina B. A diferença entre elas é, portanto, de 16,60% apesar de a usina gaúcha apresentar uma potência 0,5% maior quando comparada à usina cearense.

Justifica-se esse fenômeno devido à proximidade da localização da Usina A com a linha do Equador, tornando as estações do ano menos definidas, aumentando a incidência e a irradiação solar, que é cerca de 13% superior à irradiância do local da Usina B, e reduzindo a variação da mesma no decorrer do ano, proporcionando maior quantidade de horas diárias de sol pleno e, conseqüentemente, aumentando a geração.

Esse fato pode ser observado inclusive através das simulações: mesmo possuindo maior potência, a Usina B apresenta valores esperados de geração menores do que os valores obtidos na simulação da Usina A.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através das análises dos dados coletados, permitiram observar que, em sistemas com otimizadores de potência, as perdas por temperatura não são consideráveis. Ficou claro que a relação entre temperatura ambiente e incidência solar é considerável, podendo justificar a geração alta em dias de temperatura muito altas, alcançando os objetivos da pesquisa.

Segundo o fabricante, o otimizador de potência utilizado em ambas as usinas, o P850, opera com potência e correntes totais até a temperatura ambiente de 70°C. Como os mesmos são instalados sob os painéis fotovoltaicos, espera-se que a temperatura de operação dos mesmos seja maior. Portanto, o seu desempenho e, conseqüentemente o desempenho dos painéis, não foram afetados nos sistemas analisados.

Ademais, foi possível observar a influência da localização na eficiência de geração dos sistemas. Além do índice de radiação ser variável, a proximidade com a linha do equador também se mostrou um fator significativo, visto que nessas regiões não há estações bem definidas, resultando em baixas variações de clima e, conseqüentemente, baixas variações na quantidade diária de horas de sol, resultando em uma eficiência 16,60% maior da Usina A quanto a Usina B, mesmo que esta última tenha uma maior potência instalada.

No entanto, é válido salientar que alguns outros fatores que podem influenciar no impacto da temperatura ambiente no sistema não foram analisados, tais como a velocidade do vento no local, a altura de instalação, a distância entre os painéis e etc. A temperatura de operação, que é a temperatura em que os equipamentos (painéis, otimizadores e inversores se encontram) também não foi analisada.

Esta pesquisa, que teve como objetivo analisar a influência da temperatura na eficiência de geração de sistemas de energia solar fotovoltaica com otimizadores de potência, pode ser explorada no futuro, utilizando, nesse caso, a temperatura de operação para realizar as análises; ou, ainda, analisar como o vento, temperatura e altura de instalação se relacionam e afetam a eficiência do sistema.

Portanto, é possível afirmar que o trabalho cumpriu seu objetivo e realizou a análise dos dados coletados, concluindo que a temperatura ambiente não exerce uma influência tão significativa em sistemas com otimizadores de potência. Seu uso, então, se mostra promissor para ambientes com altas temperaturas, tais como todos os estados do nordeste brasileiro.

## REFERÊNCIAS

GEO Soluções Ambientais. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Usina Solar Fotovoltaica Serra do Mato.** 1ª ed. Fortaleza, jun. 2019.

DANTAS, Stefano Giacomazzi. **Oportunidades e Desafios da Geração Solar Fotovoltaica no Semiárido do Brasil.** 1ª ed. Brasília: ipea, fev. 2020.

SOBRINHO, José Espínola et al. **Análise da Eficiência de uma Usina Solar Fotovoltaica em Mossoró-RN.** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10, 2017, Juazeiro-BA. [A Agrometeorologia na Solução de Problemas Multiescala...](#) p1.

PEREIRA, Nilson Leite. **Energia Solar uma Perspectiva de Sustentabilidade e Viabilidade Econômica.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Departamento de Ensino Pesquisa e Extensão, IFMG, Cuiabá/MT, 2016.

LIMA, Jonyelle Silva. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA:** estudo de viabilidade técnica-financeira de implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica para o Centro de Ciências Agrárias e Ambientais – CCAA, na cidade de Chapadinha – MA, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, UFMA, Chapadinha/MA, 2019.

STAMBUK, Richard Heinrich. **Influência da Temperatura de Operação no Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos,** 2017. Monografia de Especialização (Especialização em Energias Renováveis) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SIMIONI, Tássio. **O IMPACTO DA TEMPERATURA PARA O APROVEITAMENTO DO POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO DO BRASIL,** 2017. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

NAKABAYASHI, Rennyo Kunizo. **MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL: CONDIÇÕES ATUAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS**, 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, USP, São Paulo, 2014.

FILHO, Kleber Nogueira et al. **Influência da Temperatura e Umidade do Ar na Produção de Energia Fotovoltaica**. In: Encontro Internacional de Produção Científica, 8, 2013, UNICESUMAR – Centro Universitário Cesumar, Maringá/PA.

MACHADO, C.T; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**. In: Revista Virtual de Química, 2015, 7 (1), publicado na Web em 2014.

CASARO, Marcio Mendes; MARTINS, Denizar Cruz. **PROCESSAMENTO ELETRÔNICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM SISTEMAS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**. Revista Controle & Automação, Vol. 21, 2ª ed., 2010, p159-172.

SILVA, Roberta A. e et al. **Estudo da Variabilidade da Radiação Solar no Nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 14, n. 5, 2010, p.501-509, Campina Grande/PB.

DUFFIE, Jhon A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, 4ª ed, 2013, Published by John Wiley & Sons, Inc, p928.

PUIG, Pep; JOFRA, Marta. **Energía Solar Fotovoltaica. Energías renovables para todos**, Madrid: p. 1-20.

NUNES, Henrique Menezes et al. **ESTUDO COMPARATIVO TÉCNICO-FINANCEIRO DE USINAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO MÓDULOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINOS E POLICRISTALINOS**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 8, 2020, Fortaleza/CE.

BRITO, Miguel C.; SILVA, José A. **Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em eletricidade**. O instalador, 2006.

SILVA, Heitor Marques Francelino da; ARAÚJO, Francisco José Costa. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação – REASE, vol. 8, n. 03, 2022, p.859-869, São Paulo/SP.

SILVA, Lucas Damião da C. **Implementação tecnológica atrelada a recuperação de áreas degradadas**. Revista de Extensão da UNIVASF, vol. 5, n. 1, 2017, p.30-39, Petrolina/PE.

**DIFERENÇA ENTRE IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO**. Disponível em: <<https://energes.com.br/diferenca-de-irradiancia-e-irradiacao/>>. Acesso em: 24 abr. 2022.

**Inverno no Hemisfério Sul: o que muda no Ceará**. Disponível em: <<http://www.funceme.br/?p=1383>>. Acesso em: 08 jun. 2022.

**Tempo para Rio Grande do Sul em Abril 2023: Temperaturas e tabela climática - Climate-Data.org**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul-187/r/abril-4/>>. Acesso em: 19 jun. 2022.

NOAA. **National Centers for Environmental Information (NCEI)**. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/>>. Acesso em: 20 jun. 2022.

Portal Solar. **Célula fotovoltaica: tudo o que você precisa saber**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html#ancora9>>. Acesso em: 20 jun. 2022.



## ANEXOS

Links para *download* dos *datasheets* dos equipamentos mencionados:

Painél Canadian Solar 415W (Usina A) –

[https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/8b0b8-pt\\_canadiansolar-hiku\\_cs3w-p\\_high-efficiency\\_v5.584\\_j2\\_a4.pdf](https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/8b0b8-pt_canadiansolar-hiku_cs3w-p_high-efficiency_v5.584_j2_a4.pdf)

Painél JA Solar 395W (Usina B) –

<https://www.jasolar.com/uploadfile/2019/0603/20190603114345468.pdf>

Otimizador de Potência P850 – <https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/001ee-p-series-commercial-add-on-power-optimizer-datasheet-por.pdf>

Inversor SolarEdge SE20.1K – <https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/45336-se-three-phase-inverter-with-setapp-datasheet-prt.pdf>