

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JOÃO GUILHERME SOARES**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO E DO ÂNGULO DE  
INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS**

**GUARAPUAVA  
2022**

JOÃO GUILHERME SOARES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO E DO ÂNGULO DE  
INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF POSITION AND ANGLE OF INCIDENCE OF  
SOLAR RADIATION ON THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC PANELS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Coordenação de Engenharia Mecânica, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Renan Manozzo Galante

GUARAPUAVA  
2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/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) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO GUILHERME SOARES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO E DO ÂNGULO DE  
INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia mecânica da Universidade  
Tecnológica federal do paraná (UTFPR)

Data de aprova o: 09/dezembro/2022

---

Renan Manozzo Galante

Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade tecnológica do Paraná

---

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade tecnológica do Paraná

---

Sérgio Dalm s

Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade tecnológica do Paraná

**GUARAPUAVA**

**2022**

## RESUMO

A busca incessante por métodos de otimizar os processos de geração de energia, com fontes renováveis, é pauta primária mundialmente. A energia solar é vista como uma das principais fontes de energia renovável e limpa pela abundância e acessibilidade. Baseado na necessidade do aumento da eficiência de fontes renováveis de energia, objetiva-se analisar os fatores que alteram a eficiência de geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos. O presente trabalho aborda como o ângulo de incidência da radiação solar varia com o tempo (em relação ao dia e ao ano), e como esse ângulo altera a eficiência dos painéis. Para essa análise o presente trabalho propôs um equacionamento usando o programa EES para calcular e investigar como a incidência solar e a eficiência dos painéis FV se dão a cada hora do ano.

**Palavras-chave:** Energia Solar; Painel Fotovoltaico; Eficiência; Radiação Solar.

## ABSTRACT

The incessant search for methods of optimizing the energy's generation process, with renewable sources, is a primary agenda in the world. Solar energy is considered one of the main sources of renewable and clean energy, because of its abundance and accessibility. Because of the need to increase the efficiency of renewable energy sources, the objective is to analyze the factors that change the efficiency of photovoltaic modules. The present work addresses how the angle of incidence of solar radiation varies with time (in the day and along the year), and how this angle affects the efficiency of the panels. For this analysis the present work proposed an equation using the software EES to calculate how the solar incidence and the efficiency of PV panels acts at each hour during the year.

**Keywords:** Solar Energy; Photovoltaic Panel; Efficiency; Solar Radiation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> – Eficiência por tipo de célula fotovoltaica 2014-2021 .....  | 11 |
| <b>Figura 2</b> – Tendência para a eficiência dos módulos fotovoltaicos.....  | 12 |
| <b>Figura 3</b> – Sistema fotovoltaico “off-grid” e “on-grid” . .....   | 15 |
| <b>Figura 4</b> – Matriz elétrica brasileira, 2019. (GW). .....   | 18 |
| <b>Figura 5</b> – Comparação da irradiação em território brasileiro e alemão. ....                                  | 19 |
| <b>Figura 6</b> – Variação do fator Air Mass para angulação zênite do Sol. ....                                     | 21 |
| <b>Figura 7</b> – Componentes da radiação solar.....  | 22 |
| <b>Figura 8</b> – Órbita da Terra ao redor do Sol.....  | 24 |
| <b>Figura 9</b> – Inclinação do eixo de rotação da Terra. ....  | 24 |
| <b>Figura 10</b> – Comportamento do valor da irradiação em função da distância.....                                 | 26 |
| <b>Figura 11</b> – Comportamento anual da Irradiação Extraterrestre Efetiva.....                                    | 27 |
| <b>Figura 12</b> – Ângulos de orientação de um plano (H), tangencial à um ponto da Terra.<br>.....                  | 28 |
| <b>Figura 13</b> – Ângulos de orientação de um plano inclinado (T) em relação ao plano (H)<br>.....                 | 29 |
| <b>Figura 14</b> – Ângulo de azimute solar sobre o plano horizontal.....  | 31 |
| <b>Figura 15</b> – Ângulo de incidência da irradiação solar: a) no plano horizontal, b) no<br>plano inclinado. .... | 34 |
| <b>Figura 16</b> – Curva I-V de uma célula de Silício de 156mm x 156mm.....   | 36 |
| <b>Figura 17</b> – Ficha técnica painel Vertex TSM-510DE18M(II).....  | 41 |
| <b>Figura 18</b> – Ficha técnica painel Vertex TSM-510DE18M(II).....  | 42 |
| <b>Figura 19</b> – Performance do módulo Trina Solar 510W pelo software SAM.....                                    | 43 |
| <b>Figura 20</b> – Representação do analema. ....   | 44 |
| <b>Figura 21</b> – Aproveitamento do recurso solar.....   | 52 |
| <b>Figura 22</b> – Soma das estatísticas anuais para diferentes inclinações para latitude=<br>25,467°.....          | 54 |
| <b>Figura 23</b> – Soma das estatísticas anuais para diferentes inclinações para latitude =<br>25° .....            | 56 |
| <b>Figura 24</b> – Valores de máximo anual das grandezas de interesse. ....   | 56 |
| <b>Figura 25</b> – Valores das grandezas para o dia médio de cada mês ao meio-dia solar.<br>.....                   | 57 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 26</b> – Gráfico do cosseno da incidência durante o ano.....  | 58 |
| <b>Figura 27</b> – Gráfico da radiação total efetiva durante o ano.....   | 58 |
| <b>Figura 28</b> – Gráfico da eficiência durante o ano.....   | 58 |
| <b>Figura 29</b> – Gráfico da potência máxima gerada durante o ano.....   | 59 |
| <b>Tabela 1</b> - Declinação solar baseada na ordem do dia do ano e dia médio de cada mês para ângulos de latitude de $-66,5^{\circ}$ a $+66,5^{\circ}$ ..... | 25 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 8  |
| 1.1 OBJETIVOS GERAIS.....                                     | 9  |
| 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                             | 9  |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                                  | 10 |
| 2.1 O EFEITO FOTOELÉTRICO.....                                | 10 |
| 2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....                          | 10 |
| 2.2.1 Painéis solares .....                                   | 11 |
| 2.2.2 Primeira geração .....                                  | 12 |
| 2.2.3 Segunda geração .....                                   | 13 |
| 2.2.4 Terceira geração .....                                  | 13 |
| 2.2.5 Sistema fotovoltaico.....                               | 13 |
| 2.2.6 Sistemas “ <i>off-grid</i> ” e “ <i>on-grid</i> ” ..... | 14 |
| 2.2.7 Avanço da tecnologia .....                              | 15 |
| 2.3 CENÁRIO FOTOVOLTAICO NACIONAL.....                        | 16 |
| 2.3.1 História da energia fotovoltaica no Brasil.....         | 16 |
| 2.3.2 Matriz de energia elétrica brasileira.....              | 17 |
| 2.3.3 Potencial fotovoltaico.....                             | 18 |
| 2.4 FORNECIMENTO DE RADIAÇÃO SOLAR.....                       | 19 |
| 2.4.1 Componentes direta e difusa.....                        | 21 |
| 2.5 MOVIMENTO DA TERRA .....                                  | 22 |
| 2.6 MOVIMENTO APARENTE DO SOL.....                            | 28 |
| 2.6.1 Ângulo de incidência solar.....                         | 30 |
| 2.6.2 Ângulo de azimute solar no plano H.....                 | 31 |
| 2.7 CONCEITOS ELÉTRICOS.....                                  | 34 |
| 2.7.1 Eficiência .....  | 38 |

|  |    |
|--|----|
| 3 METODOLOGIA.....                           | 40 |
| 3.1 COLETA DE DADOS .....                    | 40 |
| 3.2 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA.....  | 43 |
| 3.2.1 Variação da posição solar .....        | 44 |
| 3.2.2 Fator geográfico .....                 | 45 |
| 3.3 FERRAMENTAS .....                        | 45 |
| 4 DESENVOLVIMENTO.....                       | 46 |
| 4.1 DADOS DE IRRADIÂNCIA.....                | 46 |
| 4.2 DADOS DOS PAINÉIS.....                   | 47 |
| 4.3 DADOS DE INCLINAÇÃO.....                 | 51 |
| 4.4 TRATAMENTO DE DADOS .....                | 51 |
| 4.5 PLANO HORIZONTAL E PLANO INCLINADO ..... | 52 |
| 4.6 RELAÇÃO ÂNGULO x EFICIÊNCIA .....        | 53 |
| 5 RESULTADOS .....                           | 54 |
| 6 CONSIDERAÇÕES.....                         | 60 |
| REFERÊNCIAS.....                             | 61 |
| APÊNDICE 1 – Programação em EES .....        | 64 |

## 1 INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente é pauta recorrente dentro do cenário científico. Uma questão atual e que possui extrema relevância é a problemática que discute o aquecimento global, causado pelo efeito estufa. Esse efeito ocorre majoritariamente pela emissão de gases poluentes oriundos da queima ineficiente de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica (VELASQUEZ et al., 2021). Naturalmente, problemas ambientais relacionados a geração de energia elétrica por fontes não renováveis e poluentes, têm fomentando a busca por alternativas de geração com fontes renováveis e limpas (SANCHEZ, 2014). Entre as opções atuais, a energia solar é considerada como uma das principais fontes de energia renovável (HUSSEIN et al., 2003). Tal relevância se deve ao grande potencial de geração e em razão da energia solar ser acessível quase na totalidade da superfície da terra.

Atualmente o sistema de geração fotovoltaico é uma tecnologia relativamente acessível e está presente em parte significativa das indústrias e domicílios. Mas um fator que ainda deve se desenvolver é o aumento da eficiência dos painéis solares, e isso tem sido estudado e buscado incessantemente pela comunidade científica. Os painéis, feitos de silício, mais eficientes atualmente, possuem eficiência que chegam a 22% (VIAN, 2021). Esse valor pode atingir patamares ainda mais satisfatórios com a ajuda de algumas tecnologias como a implantação de um sistema de orientação dos painéis chamado buscador solar, que orienta as células fotovoltaicas a permanecerem, o máximo de tempo possível, perpendicular aos raios solares. A eficiência dos módulos fotovoltaicos também pode ser acrescida com o dimensionamento adequado do sistema, com acompanhamento e manutenção a fim de garantir que todos os equipamentos realizem suas funções de forma eficiente. Algumas das tecnologias que serão apresentadas posteriormente, como as células *tandem*, chegaram a uma eficiência de 46%, valor bem acima da média das outras tecnologias. Porém o alto custo de fabricação torna esse modelo inviável para comercialização.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

O principal objetivo do presente trabalho é analisar a variação da eficiência em função do ângulo de incidência da radiação solar. É visado chegar a valores de eficiência para várias inclinações dos painéis fotovoltaicos.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Escrever um programa em EES que calcule o ângulo de incidência da radiação solar e a eficiência dos painéis para cada hora do ano;
- Comparar a eficiência de painéis fotovoltaicos para diferentes ângulos de inclinação dos módulos;
- Analisar as perdas e desperdícios causados pela orientação incorreta dos painéis;
- Comparar a eficiência de painéis fotovoltaico para diferentes valores de irradiação incidente.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre a temática abordada no presente trabalho. No decorrer do capítulo é discutido tópicos sobre energia fotovoltaica e conceitos de radiação

### 2.1 O EFEITO FOTOELÉTRICO

A tecnologia de energia fotovoltaica é baseada no efeito fotoelétrico, descrito por Albert Einstein. Em 1905, Einstein, baseado em alguns estudos de Max Planck, propôs que a luz fosse formada por partículas sem massa, mas dotadas de energia. Tais partículas vieram a ser chamadas de fótons. Essa proposta foi chamada de quantização do campo eletromagnético. Einstein propôs que a luz tinha natureza quântica.

Com base nessas propostas concluiu-se que quando a luz atinge um material, os fótons que compõe a luz transferem energia para os elétrons, que por sua vez se encontram na superfície do material, e dependendo da frequência da radiação eletromagnética a energia transferida é suficiente para ejetar os elétrons. A energia de cada fóton depende da sua frequência. E há uma energia mínima necessária para arrancar um elétron, chamada função trabalho. Quando um elétron é arrancado ocorre um fluxo de elétrons, que gera uma corrente elétrica e assim ocorre o efeito fotoelétrico (BRAUNN; LARSEN, 2019).

### 2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

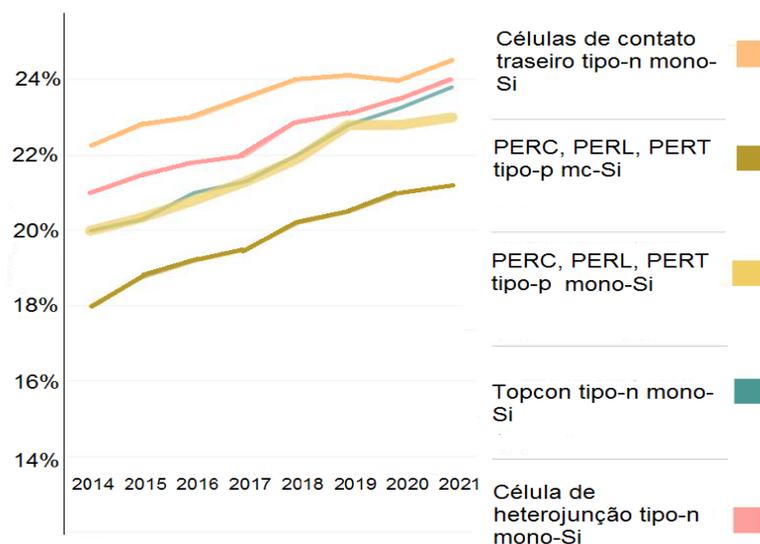
Energia solar é toda forma de energia que é emitida pelo Sol como radiação eletromagnética. Essa radiação é emitida em decorrência do processo de fusão nuclear, que ocorre constantemente no interior do Sol. Essa fonte de energia tem papel fundamental para a maioria das outras formas de energia presentes na Terra. O caso específico da energia fotovoltaica é a conversão direta da energia solar em energia elétrica (VIAN, 2021). Essa conversão é feita baseada no efeito fotoelétrico.

Onde as células fotovoltaicas são responsáveis pela captação da luz solar e pela conversão da radiação em energia elétrica.

### 2.2.1 Painéis solares

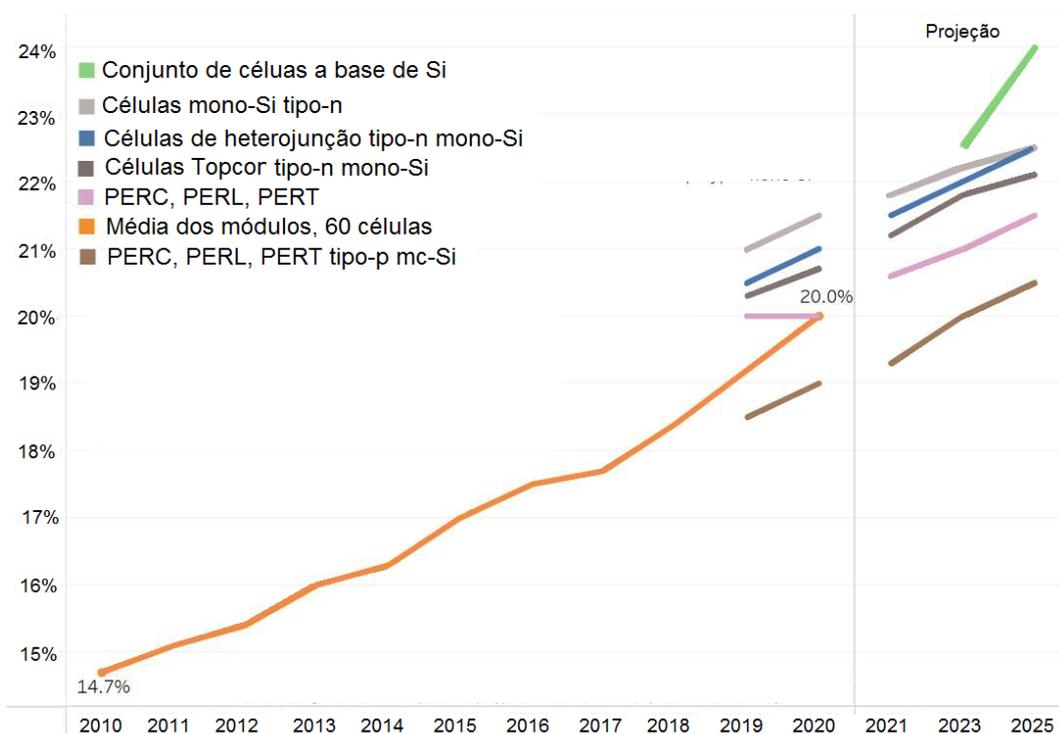
Nos sistemas fotovoltaicos (FV) os painéis solares são os responsáveis pela captação da energia solar, e são os principais agentes na transformação da energia solar em elétrica (VIAN, 2021). Os painéis consistem em ligações de células fotovoltaicas, em série e/ou em paralelo, que dependem da tensão requerida pelo sistema (VIAN, 2021). As tecnologias empregadas na fabricação dos painéis são classificadas em grupos de acordo com o material usado na fabricação e suas características. A classificação é feita em três gerações de tecnologias (PINHO & GALDINO, 2014). A Figura 1 mostra uma comparação da eficiência das células das três gerações e a Figura 2 mostra uma projeção do comportamento esperado para cada tecnologia nos próximos anos.

**Figura 1 – Eficiência por tipo de célula fotovoltaica 2014-2021.**



**Fonte:** Adaptado pelo autor de IRENA, 2022.

**Figura 2 – Tendência para a eficiência dos módulos fotovoltaicos.**



**Fonte:** Adaptado pelo autor de IRENA, 2022.

### 2.2.2 Primeira geração

A primeira geração engloba as células feitas à base de silício cristalino (c-Si). Essa classe é subdividida em duas. O primeiro modelo de células é com silício monocristalino (m-Si), e o segundo com silício policristalino (p-Si). Segundo o Instituto de Sistemas de Energia Solar (ISE, 2020), as células de silício representavam 95% da produção mundial de células fotovoltaicas em 2020 (ISE, 2020). Sendo a tecnologia de silício monocristalino responsável por 86% da produção das células da primeira geração e 14% de silício policristalino. É uma tecnologia consolidada e confiável. Essa confiabilidade é dada pelo fato de as células terem a melhor eficiência entre as disponíveis comercialmente (PINHO & GALDINO, 2014).

Da primeira geração temos também uma classe de células que está dentro de uma arquitetura avançada de silício. Nessa classificação temos as placas PERC e as células híbridas (tandem). PERC é uma sigla que em português significa “Emissor Passivado na Célula Traseira”. E consiste na aplicação de uma camada adicional de

passivação no fundo de cada célula. Além de causar a reflexão dos raios solares, essa camada altera a reorganização de elétrons no silício. Tornando as células PERC mais eficientes que as comuns (IRENA, 2019). A célula *tandem* é um conjunto de células associadas, posicionadas paralelamente uma logo acima da outra. Cada camada será responsável por absorver uma faixa do espectro eletromagnético. Assim as células *tandem* desperdiçam menos radiação, e, portanto, são mais eficientes que as comuns (IRENA, 2019).

### **2.2.3 Segunda geração**

A tecnologia de células FV de Filmes Finos é considerada como a segunda geração. São células compostas por filmes com poucos micrômetros de espessura. E tem duas classes principais: na primeira classificação os filmes finos são feitos à base de silício (silício amorfo [a-Si] e silício micromorfo [a-Si / c-Si]). A segunda categoria é a tecnologia que não é a base de silício (perovskitas, telureto de cádmio [Cd-Te] e cobre-índio-gálio-diselenide [CIGS]). Em geral é uma tecnologia com baixo custo de fabricação. Todavia possui eficiência de conversão energética menor (VIAN, 2021).

### **2.2.4 Terceira geração**

A terceira geração de células fotovoltaicas são células que estão em processo de desenvolvimento. A terceira geração é dividida em três categorias: células FV multijunção e para concentração (CPV - *Concentrated Photovoltaic*), células sensibilizadas por corante (DSSC - *Dye-sensitized solar cell*) e células orgânicas ou poliméricas (OPV - *Organic Photovoltaic*). As células CPV mostraram um excelente desempenho, com alta eficiência, porém o custo de produção torna a classe inviável de se comercializar (PINHO & GALDINO, 2014).

### **2.2.5 Sistema fotovoltaico**

De acordo com Vian, A. (2021), para a geração de energia elétrica acontecer de forma adequada e otimizada foram criados sistemas fotovoltaicos, compostos de

uma série de componentes, cada um executando uma função específica. Os elementos básicos de um sistema fotovoltaico:

- a) **Painéis fotovoltaicos:** são responsáveis pela captação da luz solar e pela conversão em eletricidade.
- b) **Inversores:** transforma a corrente gerada pelos painéis, corrente contínua, em corrente alternada. Pois a corrente gerada precisa ser compatível com a corrente da rede pública.
- c) **Conjunto de proteção:** serve para garantir que a corrente está concordante à requerida pelas normas locais.
- d) **Cabos e conexões:** Unem os componentes e transportam a energia gerada. Devem ter proteção contra radiação e temperatura.

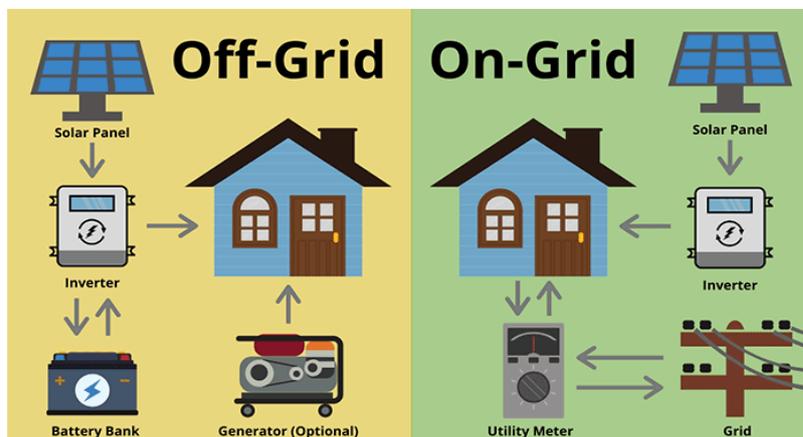
### 2.2.6 Sistemas “*off-grid*” e “*on-grid*”

A geração de energia elétrica fotovoltaica só ocorre em períodos onde há incidência de luz solar sobre os painéis. Por isso, deve-se ter uma opção para suprir a demanda de eletricidade em períodos de escassez, como as noites, por exemplo. Uma opção é ligar o sistema FV na rede elétrica pública (sistema “on-grid”). Nessa ligação a conexão é feita por um relógio contador, que contabiliza a energia gerada durante o dia e não foi consumida. Então em períodos noturnos toda a energia consumida vem necessariamente da rede pública, que passa pelo relógio contador e subtrai da energia excedente gerada durante o dia. Assim é feito um balanço para abater a fatura mensal do local onde está instalado o sistema.

As leis que governam a matriz energética, assim como a tributação, em cada país variam de acordo com a legislação local. Em alguns países, caso o sistema fotovoltaico de um usuário gere mais energia que consumiu, a energia fornecida à rede pública pode ser vendida gerando uma renda ao usuário. Não é o caso do Brasil, onde a energia fornecida a mais só pode ser convertida em um crédito energético para ser consumido posteriormente, esse processo é chamado de Sistema de Compensação de Energia Elétrica, conforme consta na Resolução Normativa 482 da ANEEL de 2012 (ANEEL, 2022). Outra forma de suprir a demanda por energia elétrica em períodos de escassez é ter um sistema isolado (“off-grid”), onde toda energia consumida é gerada pelos painéis fotovoltaicos. Dessa forma o sistema enquanto há

geração vai suprindo a demanda e a energia não consumida serve como carga para baterias ligadas ao sistema. Então quando não há incidência de luz a energia é fornecida pelas baterias (ALMEIDA et. al. 2016).

**Figura 3** – Sistema fotovoltaico “off-grid” e “on-grid”.



**Fonte:** Paradise Energy Solutions: Save With Solar Energy.

### 2.2.7 Avanço da tecnologia

Em razão da necessidade da otimização dos sistemas FV foram desenvolvidas algumas tecnologias que os tornam mais eficientes. Entre os avanços vale destacar o desenvolvimento de células bifaciais e a implantação de um sistema de busca solar (VIAN, 2021). As células bifaciais geram energia elétrica pela captação de radiação solar, tanto pela superfície frontal como pela traseira, que irá captar a radiação refletida pelo solo. O sistema de busca solar torna a captação de luz solar mais eficiente pois a geração FV máxima é quando os raios solares incidem perpendicularmente sobre os painéis. Como a posição do Sol varia durante o dia e durante o ano, a inclinação da incidência sobre os painéis varia, logo, a eficiência é afetada. Para corrigir esse desperdício de recurso solar, os sistemas de busca solar detectam qual deve ser a inclinação dos painéis para que haja incidência perpendicular durante o máximo possível no período de insolação (VIAN, 2021).

## 2.3 CENÁRIO FOTOVOLTAICO NACIONAL

### 2.3.1 História da energia fotovoltaica no Brasil

O Brasil tem uma localização geográfica privilegiada para geração de energia fotovoltaica. O país recebe em todo o território altos índices de radiação solar durante todo o ano em comparação aos países europeus, que têm a geração FV consolidada na matriz elétrica. Em contrapartida, o avanço da tecnologia tem sofrido oscilações no Brasil.

O marco inicial das pesquisas sobre a tecnologia fotovoltaica no Brasil ocorreu nos anos 50. Nesse período iniciou-se o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e no Centro Tecnológico de Aeronáutica (CTA). Os primeiros módulos foram feitos de silício cristalino e atingiram eficiência de até 12,5% (PINHO & GALDINO, 2014).

Na década de 70 o Brasil se encontrava em pleno avanço nas pesquisas e desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica. No final da década foram instaladas duas fábricas de células no país que produziam células de silício cristalino. Entretanto, nos anos 80 a falta de incentivo levou as empresas mudarem o foco de suas atividades. Algumas empresas chegaram até a fecharem as portas (PINHO & GALDINO, 2014).

Com o crescimento do cenário, surgiu a necessidade da criação de órgãos de pesquisa e regulamentação da energia fotovoltaica. Alguns marcos são:

- Em 1978 foi criada a Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS).
- Em 1994 foi criado o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica (Cresesb).
- Em 2001 o governo federal criou o Fundo Setorial de Energia (CT-ENERG).
- Em 2004 foi criado o Centro Brasileiro para Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica (CB-Solar).

Em 2002 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) iniciou pesquisas para a regulamentação técnica das instalações SIGFIs (Sistemas Individuais de

Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes), e desses estudos se originou a Resolução Normativa nº 83/2004, que futuramente seria revogada e substituída pela Resolução Normativa nº 493/2012.

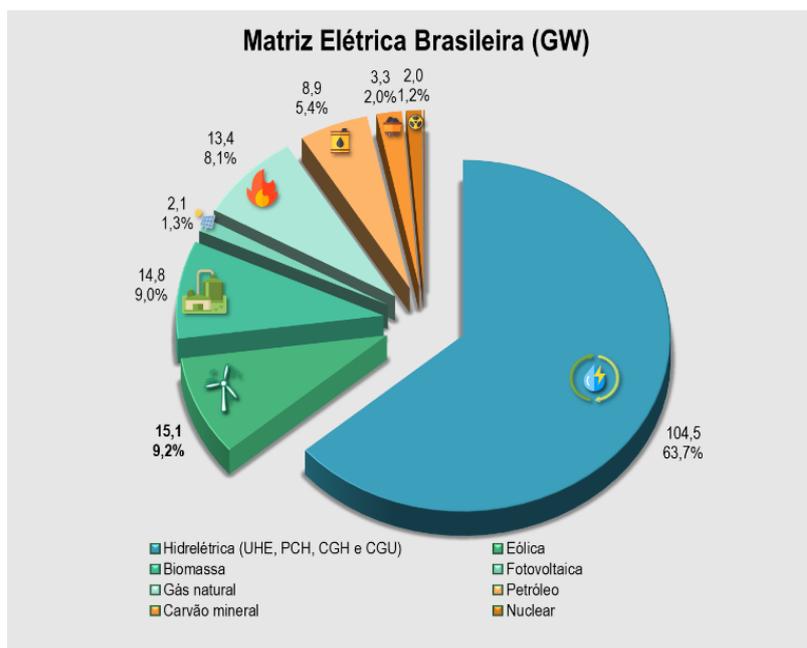
No Brasil as primeiras instalações fotovoltaicas ligadas à rede elétrica foram feitas nos anos 90. Mas foi apenas em 2012 que a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482/2012. Essa resolução trata dos sistemas de micro e minigeração distribuída. E previa um sistema de compensação de energia elétrica por meio de um balanço energético entre a energia consumida e a energia gerada injetada na rede.

### **2.3.2 Matriz de energia elétrica brasileira**

O Brasil baseia sua matriz de energia elétrica em energia de fontes renováveis. A principal fonte de suprimento é a hidroelétrica fornecendo cerca de 63,7% da energia elétrica consumida no país em 2019 (VIAN, 2021). Enquanto a energia solar supre apenas 1,3% da demanda nacional. Vale notar que a matriz energética brasileira usa mais fontes renováveis na geração de energia elétrica do que a matriz energética média mundial. As previsões apontam para um crescimento significativo na quantidade de instalações de geração FV. Bem como o crescimento na capacidade instalada (ISE, 2020).

Segundo dados da ANEEL, em 2019 o Brasil possuía uma capacidade instalada de geração de energia solar de 2,1 GW (VIAN, 2021). A Figura 4 descreve como estava dividida a matriz energética brasileira em 2019.

**Figura 4 – Matriz elétrica brasileira, 2019. (GW).**

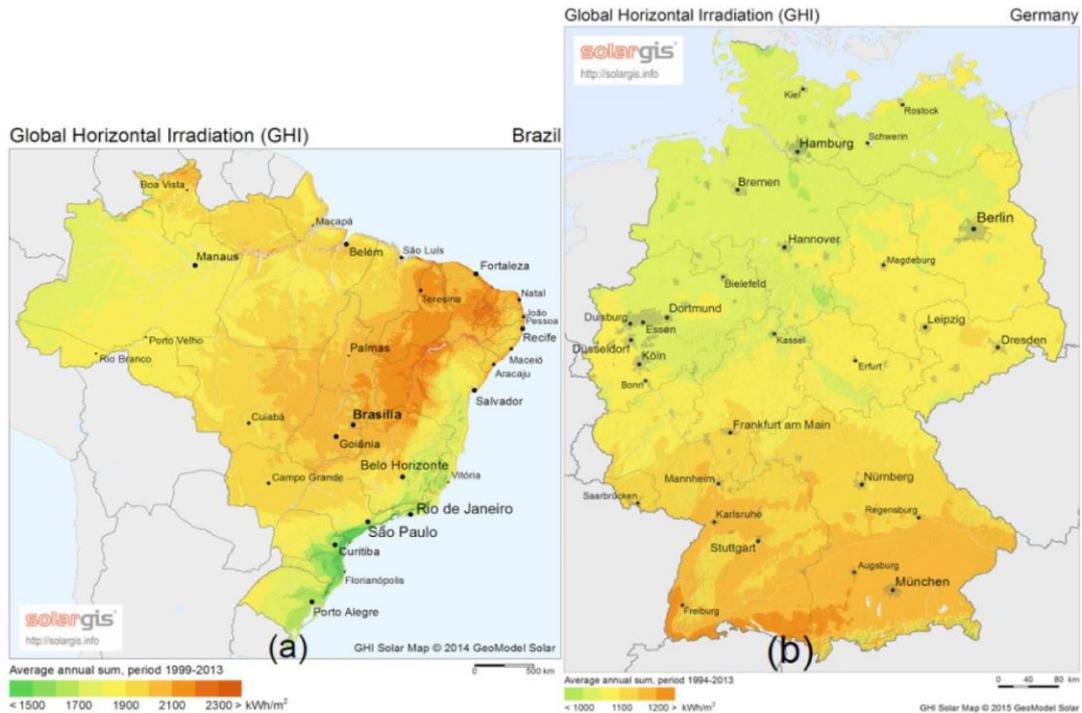


**Fonte:** ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica.

### 2.3.3 Potencial fotovoltaico

Devido a sua localização geográfica, o Brasil recebe altos níveis de irradiação solar. Uma análise comparativa entre Brasil e Alemanha, feita por JÚNIOR E SOUZA (2018), mostrou que os valores anuais mais baixos de irradiação solar no Brasil ainda são maiores que os maiores valores da irradiação incidente na Alemanha. Os valores, segundo os autores da pesquisa, da menor radiação Global no plano horizontal no Brasil são na ordem de 1.500 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto na Alemanha o maior índice de radiação chega a 1.200 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 5 – Comparação da irradiação em território brasileiro e alemão.**



**Fonte: JÚNIOR & SOUZA, 2018.**

## 2.4 FORNECIMENTO DE RADIAÇÃO SOLAR

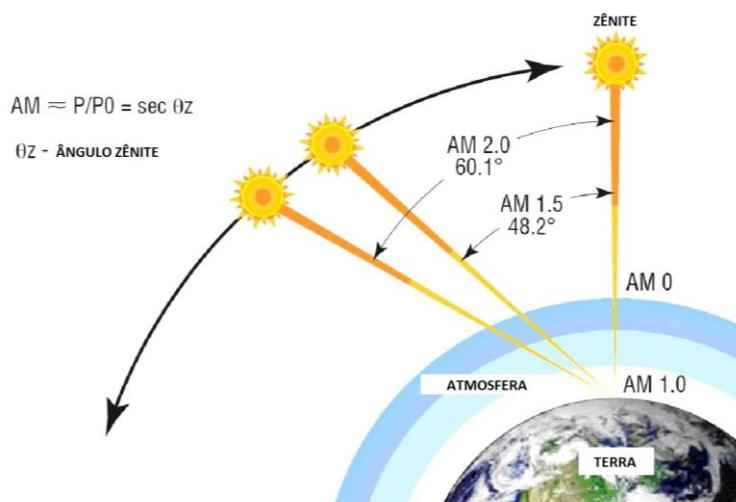
A energia solar é a radiação emitida pelo Sol por meio de ondas eletromagnéticas. Esse processo tem início no interior do núcleo do Sol onde ocorre o processo de fusão nuclear, onde as condições extremas de pressão e temperatura são capazes de fundir átomos de hidrogênio. Essa fusão forma átomos de hélio (He), a partir da fusão de átomos de hidrogênio (H). A quantidade de energia emitida pelo Sol por unidade de tempo é aproximadamente constante por bilhões de anos, com uma potência atual em cerca de  $3,86 \cdot 10^{26}$  W. Toda essa energia é emitida por toda a superfície do Sol de maneira uniforme. As ondas eletromagnéticas chegam até a superfície externa da atmosfera terrestre com uma ampla faixa do espectro eletromagnético (PINHO & GALDINO, 2014).

A disponibilidade do recurso solar é afetada por alguns fatores. Ao analisar o movimento de translação da terra ao redor do sol, nota-se que a distância relativa entre os corpos celestes é alterada durante o ano. Esse fator altera a quantidade de energia que chega até a Terra. Variando de  $1.325 \text{ W/m}^2$  até  $1412 \text{ W/m}^2$ . A literatura usa um valor médio da irradiância solar de  $1366 \text{ W/m}^2$  para definir a constante solar. A disponibilidade de radiação solar depende também da quantidade de tempo da incidência solar. Esse tempo varia em razão do movimento de rotação da terra, que é responsável por definir os períodos diurnos e noturnos. Isso ocorre pelo fato da rotação ocorrer de forma inclinada em relação ao plano solar, que é definido pelo plano em que a Terra orbita o Sol. A inclinação na rotação causa mudança nas horas de incidência de luz de acordo com o período do ano. No inverno os dias são mais curtos e no verão são mais longos (PINHO & GALDINO, 2014).

Outro fator que altera a disponibilidade solar é o horário do dia em que se coleta os dados. A radiação solar que chega até a superfície externa da atmosfera terrestre sofre fenômenos de reflexão, refração e absorção. Cerca de 30% da luz solar sofre reflexão e não chega até a superfície terrestre. Parte do restante da luz que não foi refletida, é absorvida ao entrar em contato com as moléculas que compõem a atmosfera. O contato com essas moléculas também gera uma reflexão da luz. Que então chega até a superfície da terra de maneira difusa. O restante da luz chega diretamente é conhecida como irradiação direta.

Para analisar o comportamento desse fenômeno podemos observar o parâmetro *Air Mass* (AM, Massa de Ar). Que mede a irradiação em um horário do dia, e compara com a irradiação que ocorreria com Sol a pino (Sol incidindo perpendicularmente no mesmo local) para a mesma localização, analisando a distância que a luz percorre na atmosfera até chegar ao receptor (PINHO & GALDINO, 2014). A Figura 6 mostra como é definido o coeficiente de massa de ar (*Air Mass*).

**Figura 6** – Variação do fator *Air Mass* para angulação zênite do Sol.



**Fonte:** Adaptada pelo autor de: Universidade de Kufa - IQ, 2019.

O valor do coeficiente *Air Mass* deve ser levado em conta para calcular as perdas da radiação incidente nos painéis solares, sofridas pela interação com a atmosfera. Especialmente nos casos onde o Sol não incide perpendicularmente no ponto onde está instalado o painel solar.

Quando o Sol incide perpendicularmente para uma localização na Terra, o ângulo zenital tem valor 0°, e esse ponto é chamado de zênite. Quando o Sol está no zênite o valor de *Air Mass* é 1.

O cálculo do *Air Mass* é dado pela equação 1.

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

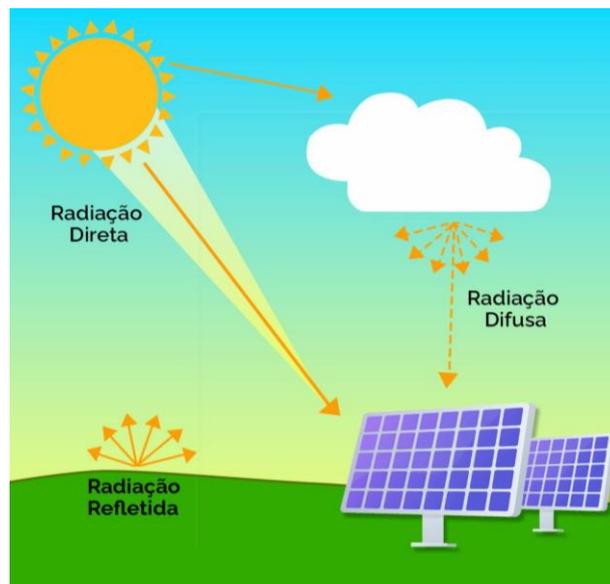
#### 2.4.1 Componentes direta e difusa

A radiação que chega até a superfície de um receptor localizado na superfície terrestre é composta por uma componente direta e uma difusa. A radiação direta vem diretamente do Sol, não sofre reflexão ou absorção e atinge diretamente a superfície terrestre. A radiação direta é a responsável pela produção de sombras bem definidas dos objetos atingidos. No caso da radiação difusa, é aquela que antes de atingir a superfície sofre efeitos de espalhamento pela atmosfera terrestre.

Em dias completamente ensolarados, mais de 90% da radiação que chega até a superfície terrestre é direta. Enquanto em dias completamente nublados 100% da radiação incidente na superfície terrestre chega de forma difusa.

Quando a luz solar atinge objetos na superfície da terra, sofre uma reflexão. Esse fenômeno espalha a radiação e é uma terceira forma de incidência de radiação da luz solar nas superfícies dos painéis FV. A Figura 7 apresenta os três tipos de irradiação incidentes na terra.

**Figura 7** – Componentes da radiação solar.



**Fonte:** Quanta, 2021.

A irradiância global que chega até uma superfície é obtida pela soma das componentes difusa e direta.  $G = G_{Dir} + G_{Dif}$ .

## 2.5 MOVIMENTO DA TERRA

As primícias dos estudos do movimento dos corpos celestes surgiram com Platão no princípio do século IV a.C.. Platão propôs alguns questionamentos aos seus discípulos onde ele buscava entender os movimentos uniformes e ordenados para

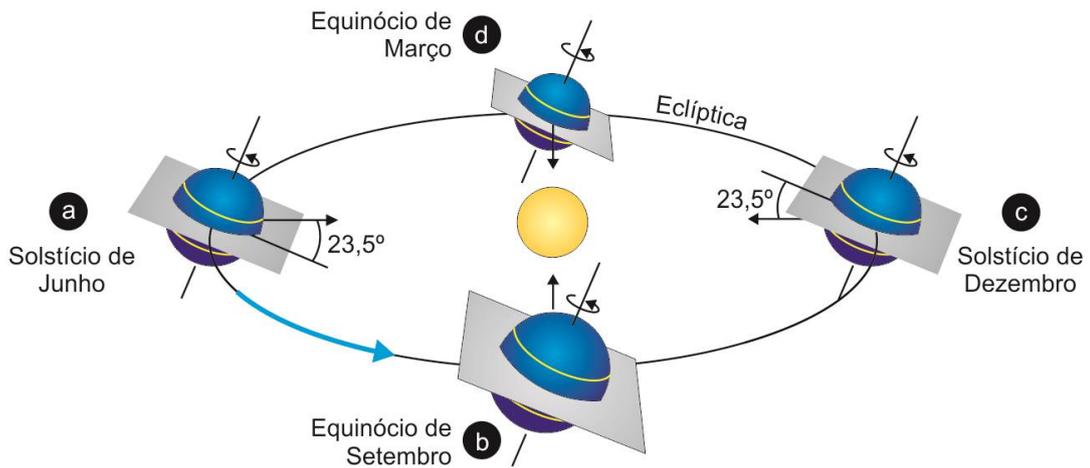
explicar o movimento de corpos celestes. Ele assumia um universo com formas e figuras perfeitas, com forma muito bem definida e geometrias conhecidas. Platão imaginava um universo com movimento imutável. Também considerava a terra como uma esfera perfeita e o universo como uma esfera celeste concêntrica que rotaciona de forma uniforme e constante. Atualmente essas considerações foram refutadas e o entendimento do movimento dos corpos celestes se desenvolveu com modelos muito precisos (NUSSENZVEIG, 2013).

Passados alguns séculos dos primeiros esboços de como era descrito o movimento dos planetas surgiram as grandes novas ideias. Os maiores avanços vieram com Johannes Kepler, estudioso do século XVI, que definiu o movimento da terra com um movimento elíptico ao redor do sol. E ainda observou uma excentricidade do sol, que estaria em um dos focos da elipse. Essa configuração implica que existe um ponto de máxima e um de mínima distância entre o sol e a terra. O ponto mais próximo é conhecido como periélio e o de maior distância é chamado afélio (NUSSENZVEIG, 2013).

As estações do ano são explicadas pelo fato de que a rotação da terra não ocorre de forma perpendicular ao plano de translação ao redor do sol. A Terra gira ao redor de um eixo com direção fixa. Essa mesma direção acompanha o movimento de translação. O eixo de rotação da Terra possui inclinação de  $23,5^\circ$  em relação ao eixo normal ao plano de translação (PINHO & GALDINO, 2014).

A Figura 8 mostra como é descrito atualmente o movimento de translação da terra. A Terra tem órbita elíptica ao redor do Sol, que está no centro do movimento com uma discreta excentricidade ( $\epsilon \approx 0,017$ ). A figura está fora de escala.

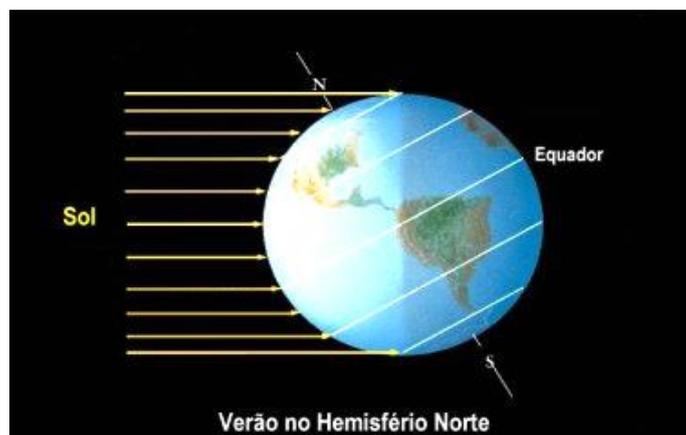
**Figura 8 – Órbita da Terra ao redor do Sol.**



**Fonte:** Adaptado de SARAIVA, 2001.

A Figura 9 mostra como é descrito o movimento de rotação da Terra. Explicita a inclinação do eixo de rotação, e esse fator é responsável por definir as estações em cada hemisfério. E por conta do declínio na rotação o nível de irradiação solar em uma coordenada geográfica se torna variável durante o ano. Além de variar o ângulo de incidência em um plano fixo no mesmo ponto. É notável que o nível de radiação incidente no hemisfério Norte (Figura 9) é maior que a radiação incidente no hemisfério Sul da Terra.

**Figura 9 – Inclinação do eixo de rotação da Terra.**



**Fonte:** SARAIVA, 2001.

Das Figuras 8 e 9 percebe-se que os dias são mais longos em uma determinada época do ano. Em cada hemisfério os dias mais longos são os dias de solstício de verão enquanto os dias durante o solstício de inverno são abreviados.

Quanto mais próximo da linha do Equador, menor será a variação da duração do dia. No caso específico da linha do Equador a duração dos dias pode ser considerada constante. Durante os equinócios a duração dos dias é a mesma para qualquer região na superfície terrestre (PINHO & GALDINO, 2014).

Considerando as convenções para a declinação solar e a latitude, a angulação orientada ao Norte da linha do Equador é positiva e a orientação ao Sul é negativa. Para descrever o movimento aparente do Sol para uma localização na Terra é feita a diferença entre a declinação e a latitude. Assim se chega a uma descrição da trajetória aparente do Sol para cada dia do ano (PINHO & GALDINO, 2014).

Baseada na correlação de Cooper (1969), a declinação pode ser calculada em função do dia do ano pela Equação 2.

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(\left(\frac{360}{365}\right) \cdot (284 + n)\right) \quad (2)$$

Onde  $\delta$  é a declinação solar e  $n$  representa os dias do ano, sendo o primeiro dia de janeiro  $n=1$ , dia dois de janeiro  $n=2$ , ... , dia 31 de dezembro  $n=365$ . A Tabela 1 serve de base mostra o valor da declinação solar para o dia médio de cada mês para ângulos de latitude entre  $-66,5^\circ$  e  $+66,5^\circ$  (COLLE, 2012).

Geometricamente a declinação solar é o ângulo compreendido entre dois vetores com origem no centro da terra, onde um tem direção a posição do Sol e o outro que pertence ao plano do equador, como fica claro na Figura 12.

**Tabela 1** - Declinação solar baseada na ordem do dia do ano e dia médio de cada mês para ângulos de latitude de  $-66,5^\circ$  a  $+66,5^\circ$ .

| Mês | n para o i-ésimo dia do mês | Dia médio do mês |    | $\delta$ |
|-----|-----------------------------|------------------|----|----------|
|     |                             | Data             | n  |          |
| JAN | I                           | 17               | 17 | -20,9    |
| FEV | 31+i                        | 16               | 47 | -13,0    |
| MAR | 59+i                        | 16               | 75 | -2,4     |

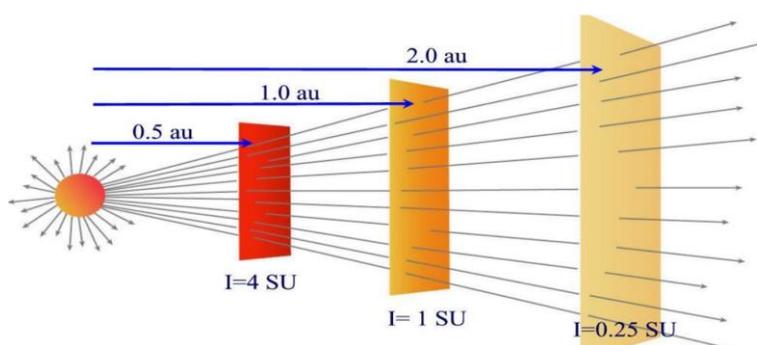
|     |       |    |     |       |
|-----|-------|----|-----|-------|
| ABR | 90+i  | 15 | 105 | 9,4   |
| MAI | 120+i | 15 | 135 | 18,8  |
| JUN | 151+i | 11 | 162 | 23,1  |
| JUL | 181+i | 17 | 198 | 21,2  |
| AGO | 212+i | 16 | 228 | 13,5  |
| SET | 243+i | 15 | 258 | 2,2   |
| OUT | 273+i | 15 | 288 | -9,6  |
| NOV | 304+i | 14 | 318 | -18,9 |
| DEZ | 334+i | 10 | 344 | -23,0 |

**Fonte:** Acervo pessoal - Baseado em COLLE, 2012.

A radiação solar quando descrita em termos de fluxo de potência, ou equivalentemente, energia por unidade de área é chamada de irradiação solar. A irradiação que chega até a superfície externa da atmosfera é chamada de irradiação extraterrestre. É definida a constante solar ( $G_0$ ) como a irradiação incidente em uma superfície perpendicular aos raios solares na distância Terra-Sol. A constante solar tem valor próximo a  $1.367 \text{ W/m}^2$  (padrão pelo WRC - *World Radiation Center*). Porém, o valor da irradiação se altera com a distância percorrida. E como a Terra percorre uma trajetória elíptica ao redor do Sol, a distância entre os astros varia e conseqüentemente o valor da irradiação extraterrestre também sofre alterações ao longo do ano.

A Figura 10 exemplifica a variação na irradiação de acordo com a distância. A irradiação é reduzida a 1/4 do valor quando a distância dobra.

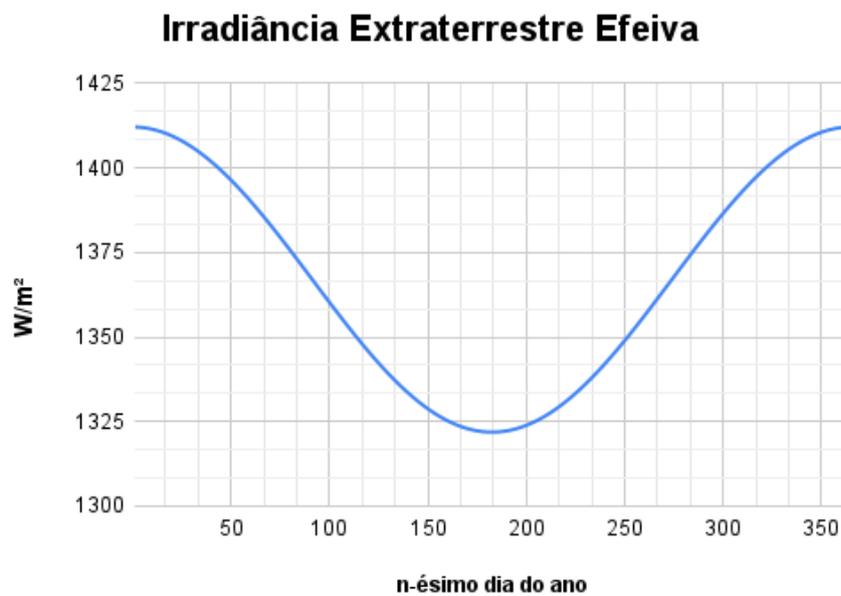
**Figura 10** – Comportamento do valor da irradiação em função da distância.



**Fonte:** LEB 360 - Meteorologia Agrícola

E a Figura 11 mostra a variação no valor da irradiação extraterrestre, ou irradiação extraterrestre efetiva ( $G_{0,ef}$ ), durante o ano.

**Figura 11** – Comportamento anual da Irradiação Extraterrestre Efetiva.



**Fonte:** Adaptado pelo autor de PINHO & GALDINO, 2014.

Nota-se da Figura 11 que o valor mínimo da  $G_{0,ef}$  é 1.322 W/m<sup>2</sup> aproximadamente, e ocorre próximo ao solstício de inverno para o hemisfério sul (afélio). E o valor máximo assumido pela  $G_{0,ef}$  é cerca de 1.412 W/m<sup>2</sup>, e ocorre no solstício de verão. Obtém-se da Figura 11 uma equação para calcular o valor da irradiação extraterrestre efetiva. A Equação 3 é dada por:

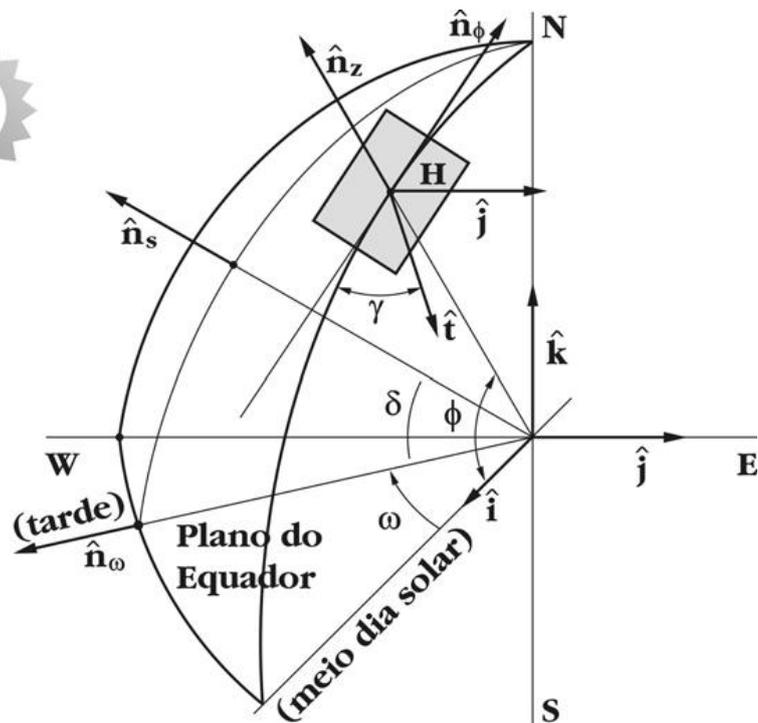
$$G_{0,ef} = G_0 * (1 + 0,033 * \cos((\frac{360}{365,25}) * n)) \quad (3)$$

Onde  $G_0$  é a constante solar e  $n$  é referente ao dia do ano.

## 2.6 MOVIMENTO APARENTE DO SOL

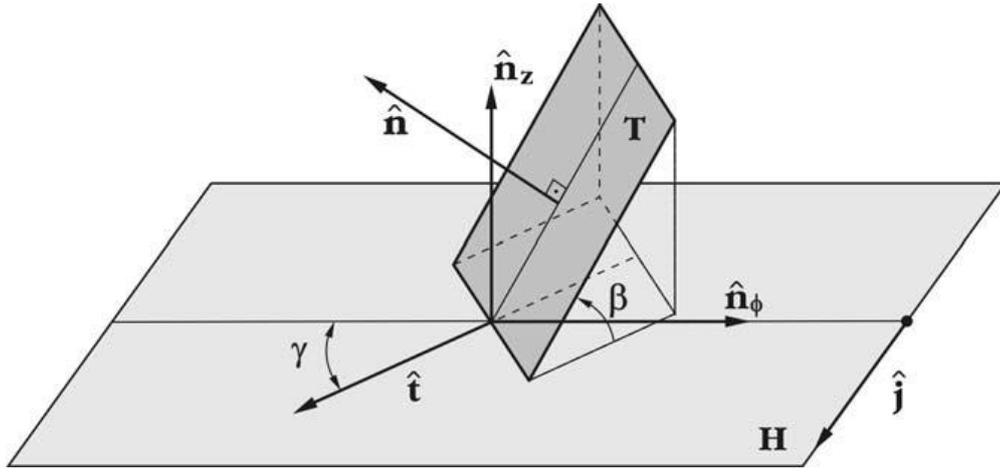
Para descrever como será a trajetória do movimento aparente do Sol para uma localidade na Terra deve-se levar em conta alguns ângulos base para servirem de referência. As Figuras 12 e 13 mostram um plano inclinado (T), localizado em um determinado ponto do globo terrestre. A inclinação  $\beta$  é a inclinação do plano, que representa nesse estudo o plano do painel fotovoltaico, T em relação ao plano horizontal (H). O ângulo  $\phi$  é o ângulo de latitude ( $\phi > 0$  significa orientação acima da linha do Equador, hemisfério Norte). O ângulo de azimute ( $\gamma$ ), é medido em relação à tangente da linha meridional na localização do plano H. Para  $\gamma > 0$  significa que o plano tem sua superfície voltada para o Leste (COLLE, 2012).

**Figura 12** – Ângulos de orientação de um plano (H), tangencial à um ponto da Terra.



Fonte: COLLE, 2012.

**Figura 13** – Ângulos de orientação de um plano inclinado (T) em relação ao plano (H)



Fonte: COLLE, 2012.

O vetor unitário  $\hat{n}$ , representado na Figura 13, é normal ao plano T e compartilha o mesmo plano de  $\hat{t}$  e  $\hat{n}_z$ . O vetor unitário  $\hat{n}_z$  é perpendicular ao plano H e aponta para a mesma direção do zênite. E  $\hat{t}$  pertence ao plano H e indica o ângulo azimutal de T em H (COLLE, 2012).

A Figura 12 apresenta o vetor  $\hat{n}_s$ , que é um vetor unitário que representa o movimento aparente do Sol ao redor da Terra. O vetor  $\hat{n}_\omega$  compartilha plano com  $\hat{n}_s$  e acompanha o movimento aparente do Sol sobre o plano do Equador segundo o ângulo horário  $\omega$ . O ângulo horário tem velocidade angular de  $15^\circ/\text{h}$ , o referencial desse ângulo é o meio-dia solar com valores positivos pela manhã (COLLE, 2012).

Segue das Figuras 12 e 13 que:

$$\hat{n} = \text{sen}(\beta) \hat{t} + \cos(\beta) \hat{n}_z \quad (4)$$

$$\hat{t} = \cos(\gamma) \hat{n}_\phi + \text{sen}(\gamma) \hat{j} \quad (5)$$

Com  $\hat{j} = (0,1,0)$ .

$$\hat{n}_\phi = (-\text{sen}(\phi), 0, \cos(\phi)) \quad (6)$$

$$\hat{n}_z = (\cos(\phi), 0, \text{sen}(\phi)) \quad (7)$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 5 chegamos na expressão:

$$\hat{t} = (\cos(\gamma) \cdot \text{sen}(\phi), \text{sen}(\gamma), -\cos(\gamma) \cdot \cos(\phi)) \quad (8)$$

Temos da Figura 12 que:

$$\hat{n}_s = \cos(\delta) \hat{n}_\omega + \text{sen}(\delta) \hat{k} \quad (9)$$

$$\hat{n}_\omega = \cos(\omega) \hat{i} + \text{sen}(\omega) \hat{j} \quad (10)$$

Com  $\delta$  sendo o ângulo da declinação do Sol. E  $\hat{i} = (1,0,0)$ . Substituindo a Equação 10 na Equação 9, resulta em:

$$\hat{n}_s = (\cos(\delta) \cdot \cos(\omega), \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega), \text{sen}(\delta)) \quad (11)$$

Ao substituir as Equações 8 e 7 na Equação 4 chegamos à Equação 12, que representa a direção normal da superfície do painel na forma escalar. Basicamente indica o sentido em que a superfície está direcionada.

$$\hat{n} = (\cos(\beta) \cos(\phi) + \cos(\gamma) \text{sen}(\beta) \text{sen}(\phi), \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\beta), \cos(\beta) \text{sen}(\phi) - \cos(\gamma) \text{sen}(\beta) \cos(\phi)) \quad (12)$$

### 2.6.1 Ângulo de incidência solar

O ângulo de incidência solar ( $\theta$ ) é o ângulo entre os vetores  $\hat{n}$  e  $\hat{n}_s$ . E define a inclinação em que a irradiação direta ocorre em uma superfície inclinada em um ponto do globo.

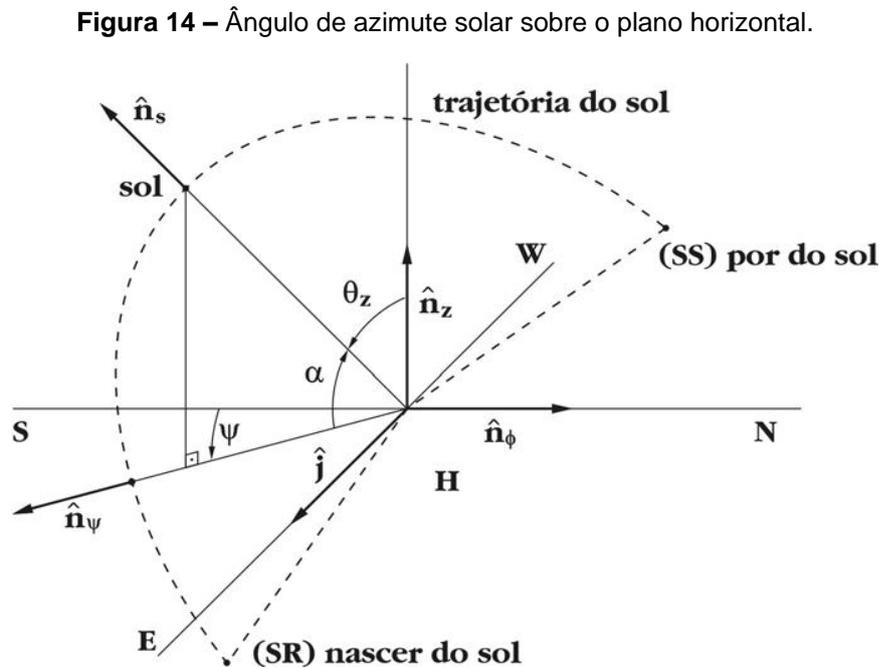
Ao analisar o produto escalar  $\hat{n} \cdot \hat{n}_s$  podemos usar a definição de produto escalar para ver que  $\hat{n} \cdot \hat{n}_s = |\hat{n}| |\hat{n}_s| \cdot \cos(\theta) = \cos(\theta)$ , pois o módulo dos dois

vetores unitários é igual a um. A partir das Equações 11 e 12, fazendo o produto escalar e resumindo a equação chega-se a uma expressão que descreve o ângulo de incidência solar (COLLE, 2012).

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen}(\delta)(\text{sen}(\phi) \cdot \cos(\beta) - \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma)) \\ & + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)(\cos(\phi) \cdot \cos(\beta) + \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma)) \\ & + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(\omega) \end{aligned} \quad (13)$$

### 2.6.2 Ângulo de azimute solar no plano H

O ângulo de azimute solar indica o ângulo de posicionamento solar em relação ao plano horizontal (H), mostrado na Figura 14. É referenciado pelo eixo Norte-Sul na direção de  $\hat{n}_\phi$ . Esse ângulo é o ângulo formado entre a projeção do vetor  $\hat{n}_s$  sobre o plano horizontal e o eixo tangente ao meridiano local (direção Norte-Sul), (COLLE, 2012).



Fonte: COLLE, 2012.

Da Figura 14 se obtém que:

$$\hat{n}_\psi = -\cos(\psi) \hat{n}_\phi + \text{sen}(\psi) \hat{j} \quad (14)$$

Onde considera-se  $\psi$  positivo para leste, portanto, pela manhã. Podemos substituir  $\hat{n}_\phi$  dado pela Equação 6 na Equação 14. Com isso é expressa a Equação escalar 15:

$$\hat{n}_\psi = (\cos(\psi) \cdot \text{sen}(\phi), \text{sen}(\psi), -\cos(\psi) \cdot \cos(\phi)) \quad (15)$$

É possível também obter da Figura 14 que:

$$\hat{n}_s = \cos(\alpha) \hat{n}_\psi + \text{sen}(\alpha) \hat{n}_z \quad (16)$$

Onde  $\alpha$  define o ângulo de altura solar. Ao substituir a expressão escalar de  $\hat{n}_z$  dada pela Equação 7 e de  $\hat{n}_\psi$  expressa pela Equação 15 na Equação 16 e igualar o resultado obtido à Equação 11, são obtidas as equações referentes às direções  $\hat{i}$  (17),  $\hat{j}$  (18) e  $\hat{k}$  (19):

$$\cos(\alpha) \cdot \cos(\psi) \cdot \text{sen}(\phi) + \text{sen}(\alpha) \cdot \cos(\phi) = \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (17)$$

$$\cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega) = \cos(\alpha) \cdot \text{sen}(\psi) \quad (18)$$

$$\text{sen}(\delta) = \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\alpha) - \cos(\alpha) \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\phi) \quad (19)$$

A partir da Equação 19 é possível chegar a uma expressão explícita para  $\psi$ :

$$\cos(\psi) = \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\phi) - \text{sen}(\delta)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\phi)} \quad (20)$$

Caso o ângulo de azimute solar for expresso em relação a direção Norte, é definido um ângulo  $\psi_N = \pi - \psi$ . Onde segue que  $\cos(\psi_N) = -\cos(\psi)$ .

Os ângulos  $\alpha$  e  $\theta_z$ , mostrados na Figura 14, são complementares. Portanto,  $\theta_z + \alpha = \frac{\pi}{2}$ ,  $\text{sen}(\alpha) = \cos(\theta_z)$  e  $\cos(\alpha) = \text{sen}(\theta_z) = (1 - \cos^2(\theta_z))^{\frac{1}{2}}$ . Essas deduções lógicas a partir da análise das propriedades trigonométricas dos ângulos, evidenciam que o ângulo de azimute solar varia em função do ângulo horário.

Reescrevendo a Equação 13 de forma conveniente, é possível obter uma equação para o ângulo de incidência em função de  $\beta$ ,  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\delta$  e  $\gamma$ .

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \cos(\beta)[\text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)] \\ & + \text{sen}(\beta)[\text{sen}(\phi) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \cos(\phi) \cdot \cos(\gamma) \cdot \text{sen}(\delta) \\ & + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(\omega)] \end{aligned} \quad (21)$$

Para o caso especial da incidência solar em uma superfície orientada horizontalmente ( $\beta=0$ ), o ângulo  $\theta$  denotado por  $\theta_z$  é definido como o ângulo de zênite. E tem a forma de:

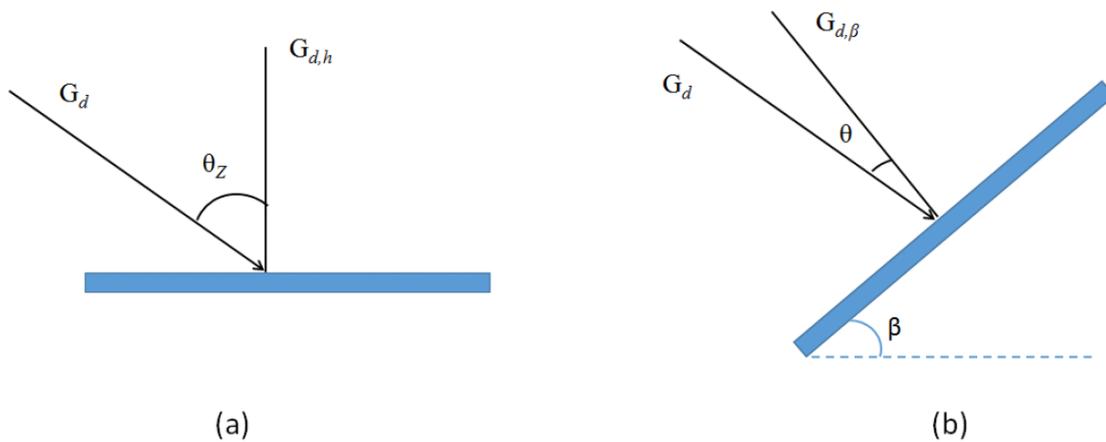
$$\cos(\theta_z) = \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (22)$$

Assim o fator que multiplica  $\cos(\beta)$  na primeira parcela da Equação 21 é a própria expressão de  $\cos(\theta_z)$ , representada pela Equação 22. Substituindo  $\cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$  da Equação 17 no primeiro termo da segunda parcela,  $\cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega)$  da Equação 18 no terceiro termo da segunda parcela e  $\text{sen}(\delta)$  da Equação 19 no segundo termo da segunda parcela da Equação 21 é encontrada uma expressão para definir o ângulo de incidência, que feitas algumas simplificações toma a forma:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cdot \cos(\theta_z) + \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\theta_z) \cdot \cos(\psi - \gamma) \quad (23)$$

A Figura 15 mostra como se comporta a radiação no plano horizontal e no plano inclinado, com base nos ângulos  $\theta$  e  $\theta_z$  (COLLE, 2012).

**Figura 15** – Ângulo de incidência da irradiação solar: a) no plano horizontal, b) no plano inclinado.



**Fonte:** PINHO & GALDINO, 2014.

## 2.7 CONCEITOS ELÉTRICOS

A soma da corrente da célula no escuro (diodo semicondutor) com a corrente fotogerada é, por definição, a corrente elétrica na célula fotovoltaica. Caso seja considerado essa corrente ( $I$ ) em função da tensão dos módulos, é obtido um parâmetro muito importante na análise de sistemas FV: A curva I-V, descrita pela Equação 24:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot V}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (24)$$

Onde:

$I_L$  - Corrente fotogerada (A);

$I_0$  - Corrente de saturação reversa do diodo (A);

$n$  - Fator de idealidade do diodo. Adimensional. Geralmente entre 1 e 2;

$q$  - Carga do elétron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C);

$k$  - Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K);

$T$  - Temperatura absoluta (K);

A geração fotovoltaica em uma célula no escuro é nula. Então da Equação 24 podemos dizer que  $I_L = 0$  no escuro. Assim a célula no escuro tem comportamento idêntico ao de um diodo.

A corrente reversa do diodo pode ser encontrada por meio da Equação 25:

$$I_0 = q \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left( \frac{D_p}{L_p \cdot N_d} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_a} \right) \quad (25)$$

Onde:

$I_0$  - Corrente de saturação reversa do diodo (A);

$A$  - Área da célula;

$n_i$  - Concentração de portadores intrínsecos no material;

$N_d, N_a$  - Concentração dos dopantes tipo n e tipo p, respectivamente;

$D_p, D_n$  - Coeficiente de difusão de lacunas e elétrons, respectivamente;

$L_p, L_n$  - Comprimentos de difusão de lacunas e de elétrons;

$q$  - Carga do elétron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C);

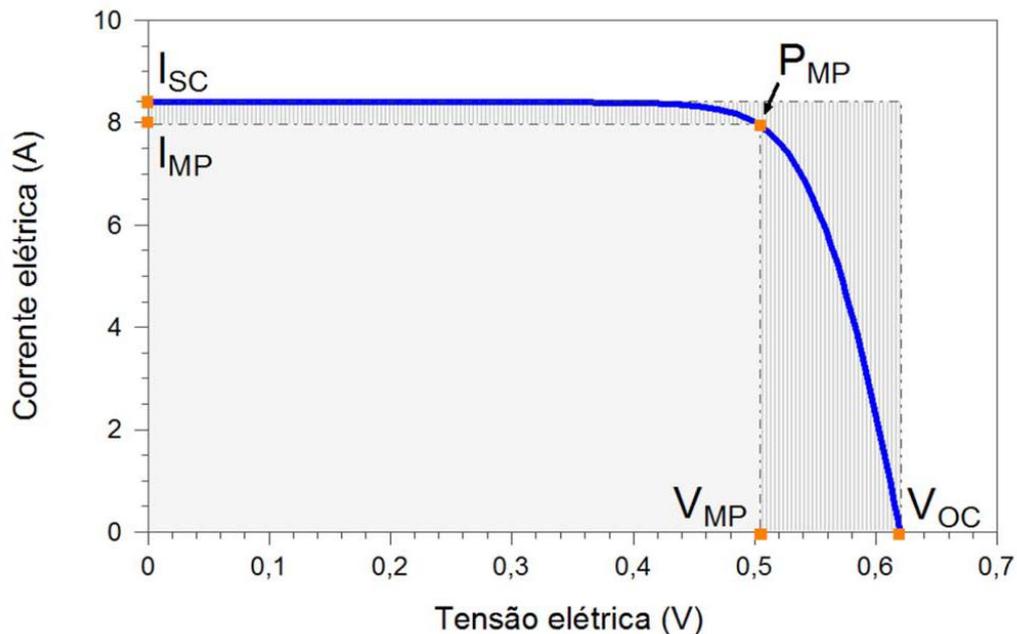
Em uma célula fotovoltaica existem resistências em série, devido a junção metal-semicondutor, e resistência em paralelo devido a pontos de curto-circuito na junção *pn*. Aderindo essas considerações a corrente em uma célula fotovoltaica é determinada pela Equação 26:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (26)$$

Onde  $R_s$  é a resistência em série e  $R_p$  é a resistência em paralelo.

A curva I-V de uma célula de silício é mostrada na Figura 16. Essa curva mostra como a corrente de um painel varia em função da tensão. O valor  $I_{SC}$  é a corrente de curto circuito que é a máxima corrente da célula, que é medida quando a tensão é nula.  $V_{OC}$  é a tensão de circuito aberto e é a máxima tensão que a célula pode produzir. E  $P_{MP}$  é a potência máxima gerada pela célula, sendo  $I_{MP}$  e  $V_{MP}$  os valores de corrente e tensão, respectivamente, que geram essa máxima tensão.

**Figura 16** – Curva I-V de uma célula de Silício de 156mm x 156mm.



Fonte: PINHO & GALDINO, 2014.

A curva I-V possibilita a visualização de variáveis importantes para descrever o comportamento de uma célula fotovoltaica: Tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência

- **Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ):** É a tensão medida entre os terminais da célula. É a tensão mais alta que a célula pode produzir. Pode ser medida por um voltímetro diretamente nos terminais da célula. Pode ser obtida por meio da Equação 27:

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (27)$$

e o valor de  $V_{oc}$  depende da tecnologia usada na célula. Exemplo para c-Si,  $V_{oc} = (0,5-0,7)V$ .

- **Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ):** É a máxima corrente que pode se obter na célula, e é medida quando a tensão nos terminais é nula.  $I_{sc}$  depende da área da célula e da irradiância. O valor da densidade de corrente de curto-circuito pode ser obtido de acordo com a tecnologia da célula, por exemplo: para c-Si  $I_{sc} = (38-42,7)mA/cm^2$ .
- **Fator de forma (FF):** É um fator expresso pela divisão da potência máxima da célula pelo produto entre a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto. O fator de forma é expresso por:

$$FF = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (28)$$

O fator de forma depende da tecnologia usada na célula. Exemplo para c-Si,  $FF = (80,9 - 82,8)\%$ .

### 2.7.1 Eficiência

A eficiência de um sistema fotovoltaico pode ser obtida através da razão entre a potência real gerada pelos painéis, pelo produto da radiação global total que chega até a terra e a área útil total dos módulos instalados no sistema, como expresso na Equação 29. Esse cálculo é uma razão entre a potência real gerada pelo sistema fotovoltaico pela potência que seria produzida se o sistema convertesse 100% da energia solar incidente em energia elétrica (MICHELS N. R. et al., 2010).

Diversos fatores influenciam diretamente a eficiência fotovoltaica: o nível de incidência de irradiação solar, a temperatura de acordo com o nível de irradiação, a deposição de sujeira sobre as células do painel, o sombreamento, a degradação do painel de acordo com a vida útil dele, fatores climáticos e geográficos. A incidência de radiação solar na terra varia ao longo do ano em razão da órbita elíptica que a terra percorre em seu movimento de translação ao redor do sol. Isso causa uma variação na quantidade de irradiação solar que a terra recebe. Quando a Terra está no ponto mais perto do Sol (periélio), a constante de radiação solar é maior. E analogamente, quando está no ponto afélio a radiação que chega a atmosfera terrestre é menor. O aumento da temperatura dos painéis em cada nível de irradiação causa quedas no valor da tensão, que conseqüentemente diminui a potência gerada e finalmente a eficiência fotovoltaica (MICHELS N. R. et al., 2010). O sombreamento e a deposição de sujeira afetam, de maneira análoga, a eficiência negativamente em decorrência do fato que quando algum objeto se interpõe entre a radiação solar e o painel, esse objeto diminui o nível de radiação recebida. Acarretando em uma quantidade menor de potência gerada (MICHELS N. R. et al., 2009).

Segundo dados de pesquisas do ISE, a eficiência das células FV de silício cresceu de 15% a 20% nos últimos 10 anos. Ainda de acordo com o instituto alemão, o mercado de energia fotovoltaico vive um cenário de crescimento rápido, onde atingiu crescimento nas instalações FV de 34% entre 2010 e 2020. Em razão de subsídios e do aumento da concorrência no mercado, a tecnologia tenderá à uma competição para redução de custos. Como consciência dessas previsões, as pesquisas estão sendo voltadas para o aumento na eficiência dos painéis (ISE, 2020).

A eficiência pode ser calculada pela Equação 29:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (29)$$

Onde  $A$  ( $m^2$ ) é a área das células,  $G$  ( $W/m^2$ ) a radiação global incidente,  $P_{MP}$  é a potência máxima gerada pelo painel,  $I_{sc}$  é a corrente de curto circuito da célula FV e  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto.

### **3 METODOLOGIA**

Esse capítulo traz uma descrição detalhada das atividades desenvolvidas no trabalho. Como foram coletados os dados, como se desenvolveu a programação que foi utilizada nos cálculos e demais itens usados no trabalho.

#### **3.1 COLETA DE DADOS**

Para o início da análise da eficiência de um painel solar é fundamental definir o modelo de painel a ser utilizado. As fabricantes dos painéis, em geral, oferecem os dados dos seus produtos, como: dimensão, peso, material, propriedades químicas e propriedades físicas. Os dados da fabricante servem como referência para os cálculos. O painel selecionado como objeto de estudo é o painel Vertex Trina Solar TSM-510DE18M.08(II).

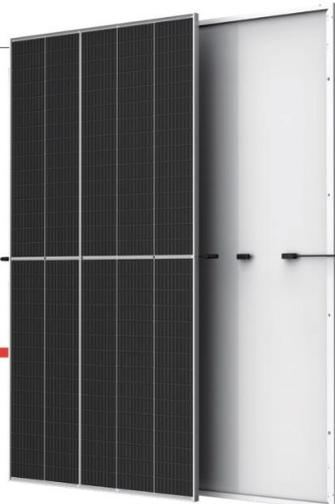
Como discutido nas seções anteriores, os módulos mais utilizados mundialmente são os fabricados de silício monocristalino (c-Si). A fabricante Trina Solar produz painéis com essa tecnologia e disponibiliza as fichas técnicas com os dados de cada modelo fabricado. As Figuras 17 e 18 a seguir trazem a ficha técnica do modelo que será analisado.

Figura 17 – Ficha técnica painel Vertex TSM-510DE18M(II).

Mono
Multi
Soluções



**MÓDULO MONOCRISTALINO MONOFACIAL**



510W

POTÊNCIA MÁXIMA

---

21.2%

EFICIÊNCIA MÁXIMA

---

0~+5W

TOLERÂNCIA POSITIVA

|                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| PRODUTO<br><b>TSM-DE18M(II)</b> | FAIXA DE POTÊNCIA<br><b>485-510W</b> |
|---------------------------------|--------------------------------------|

**Alto valor agregado**

- Menor LCOE (Custo Nivelado de Energia), valor reduzido de CAPEX, tempo de payback reduzido.
- Menor taxa de degradação anual garantida para o primeiro ano e anual.
- Compatibilidade integrada com demais equipamentos de sistemas fotovoltaicos.
- Alto retorno de investimentos.

---

**Potência até 510W**

- Células de 210mm cortadas em 3 partes.
- Até 21.2% de eficiência do módulo com tecnologia de interconexão de células de alta densidade.
- Tecnologia multi-busbar para melhores efeitos de captura de luz, menor resistência em série e melhor rendimento do módulo.

---

**Alta confiabilidade**

- Redução de micro-fissuras com a inovadora tecnologia de corte não-destrutivo.
- Resistência PID garantida através do controle de qualidade de processos e matéria-prima.
- Resistente a ambientes severos como sal, amônia, altas temperaturas e alta umidade.
- Resistência a cargas mecânicas até 5400 Pa positiva e 2400 Pa negativa.

---

**Alto rendimento**

- Excelente IAM (Modificador de Ângulo de Incidência) e ótimo desempenho em baixa irradiação, validado por certificadores internacionais.
- O design exclusivo fornece produção otimizada de energia sob condições de sombreamento.
- Baixo coeficiente de temperatura (-0,34%) e temperatura de operação.

**Certificados Internacionais do Produto**

IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716/UL61730  
 ISO 9001: Quality Management System  
 ISO 14001: Environmental Management System  
 ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification  
 ISO45001: Occupational Health and Safety Management System











**Curva de Garantia de Performance**



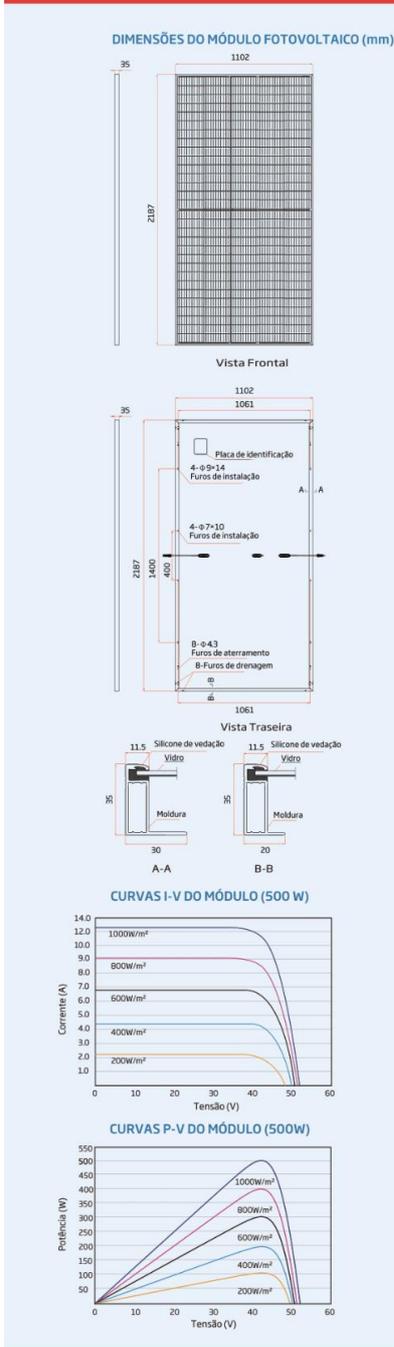
| Anos | Potência Garantida (%) |
|------|------------------------|
| 0    | 98.0%                  |
| 25   | 84.8%                  |

Fonte: Trina Solar, 2022.

Figura 18 – Ficha técnica painel Vertex TSM-510DE18M(II)



MÓDULO MONOCRISTALINO MONOFACIAL



**DADOS ELÉTRICOS (STC)**

| Potência de Pico - P <sub>MAX</sub> (Wp)*        | 485    | 490   | 495   | 500   | 505   | 510   |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tolerância de Potência - P <sub>MAX</sub> (W)    | 0 ~ +5 |       |       |       |       |       |
| Tensão Máxima - V <sub>MPP</sub> (V)             | 42.2   | 42.4  | 42.6  | 42.8  | 43.0  | 43.2  |
| Corrente Máxima - I <sub>MPP</sub> (A)           | 11.49  | 11.56 | 11.63 | 11.69 | 11.75 | 11.81 |
| Tensão de Circuito Aberto - V <sub>OC</sub> (V)  | 51.1   | 51.3  | 51.5  | 51.7  | 51.9  | 52.1  |
| Corrente de Curto Circuito - I <sub>SC</sub> (A) | 12.07  | 12.14 | 12.21 | 12.28 | 12.35 | 12.42 |
| Eficiência do Módulo η <sub>m</sub> (%)          | 20.1   | 20.3  | 20.5  | 20.7  | 21.0  | 21.2  |

STC: Irradiação 1000W/m<sup>2</sup>, Temperatura de Célula 25°C, Massa de Ar AM1.5. \*Tolerância de Medida: ±3%.

**DADOS ELÉTRICOS (NOCT)**

| Potência de Pico - P <sub>MAX</sub> (Wp)         | 365  | 369  | 373  | 377  | 381  | 385   |
|--|------|------|------|------|------|-------|
| Tensão Máxima - V <sub>MPP</sub> (V)             | 39.9 | 40.0 | 40.2 | 40.4 | 40.6 | 40.5  |
| Corrente Máxima - I <sub>MPP</sub> (A)           | 9.17 | 9.22 | 9.28 | 9.33 | 9.38 | 9.50  |
| Tensão de Circuito Aberto - V <sub>OC</sub> (V)  | 48.1 | 48.2 | 48.4 | 48.6 | 48.8 | 49.0  |
| Corrente de Curto Circuito - I <sub>SC</sub> (A) | 9.73 | 9.78 | 9.84 | 9.90 | 9.95 | 10.01 |

NOCT: Irradiação 800W/m<sup>2</sup>, Temperatura Ambiente 20°C, Velocidade do Vento 1m/s.

**DADOS MECÂNICOS**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Células               | Monocristalinas   |
| No. de Células        | 150 células   |
| Dimensões do módulo   | 2187×1102×35 mm (86.10×43.39×1.38 polegadas)  |
| Peso                  | 26.3 kg (58.0 lb)   |
| Vidro                 | 3.2 mm (0.13 polegadas), Alta Transmissão, Anti-Reflexo e Recobrimento Térmico  |
| Material Encapsulante | EVA/POE   |
| Backsheet             | Branco  |
| Moldura               | 35 mm (1.38 polegadas) Liga de Alumínio Anodizado   |
| Caixas de Junção      | IP 68   |
| Cabos                 | Cabo de Tecnologia Fotovoltaica 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 polegadas <sup>2</sup> )<br>Retrato: 280/280 mm (11.02/11.02 polegadas)<br>Comprimento customizável |
| Conectores            | MC4 EVO2 / TS4*   |

\*Verificar conector com o vendedor local.

**COEFICIENTES DE TEMPERATURA**

|  |             |
|--|-------------|
| NOCT (Temperatura Nominal de Operação da Célula) | 43°C (±2°C) |
| Coefficiente de Temperatura P <sub>MAX</sub>     | - 0.34%/ C  |
| Coefficiente de Temperatura V <sub>OC</sub>      | - 0.25%/ C  |
| Coefficiente de Temperatura I <sub>SC</sub>      | 0.04%/ C    |

**LIMITES DE OPERAÇÃO**

|                                     |                |
|-------------------------------------|----------------|
| Temperatura Operacional             | -40 ~ +85 C    |
| Tensão Máxima do Sistema            | 1500V DC (IEC) |
|                                     | 1500V DC (UL)  |
| Capacidade Máx. do Fusível em Série | 20A            |

**GARANTIA**

|  |
|--|
| 12 anos de garantia de produto             |
| 25 anos de garantia de produção de energia |
| 2% de degradação no primeiro ano           |
| 0.55% taxa de degradação anual             |

(Verificar documento de garantia para maiores detalhes)

**EMBALAGEM E TRANSPORTE**

|  |
|--|
| Módulos por caixa: 31 unidades             |
| Módulos por container de 40': 620 unidades |



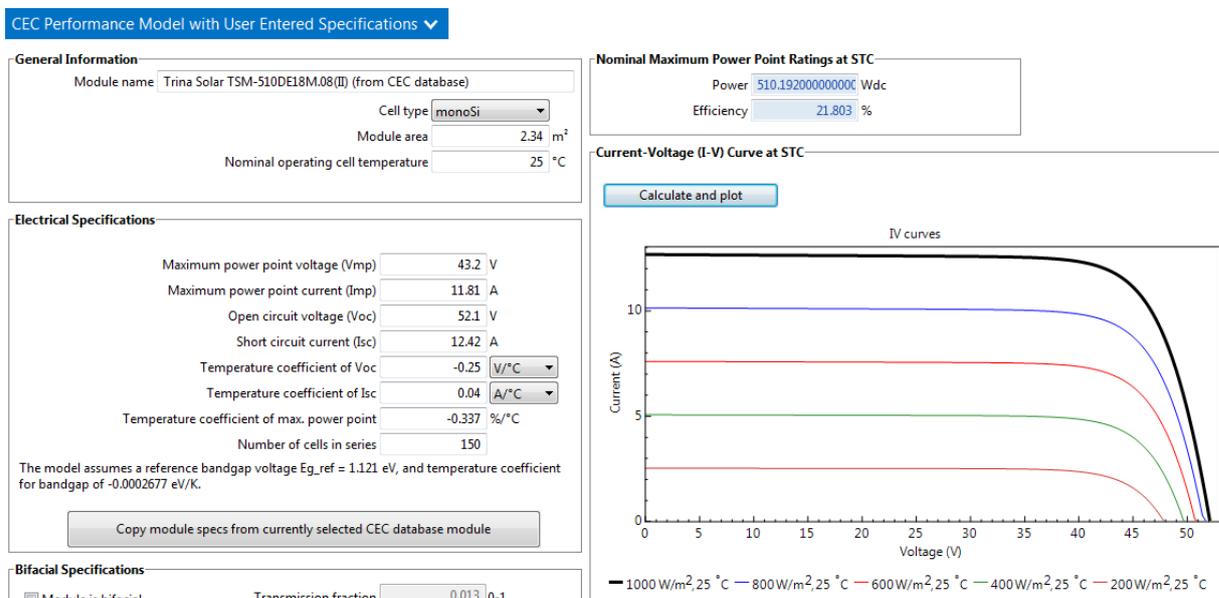
CUIDADO: LEIA AS INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA E INSTALAÇÃO ANTES DE USAR O PRODUTO.  
© 2022 Trina Solar Co., Ltd. Todos os direitos reservados. As especificações incluídas nesta folha de dados estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.  
Número da versão: TSM\_EN\_2022\_A www.trinasolar.com

Fonte: Trina Solar, 2022.

A fim de obter dados específicos sobre o painel selecionado será usado o software SAM (programa *System Advisor Model*). O SAM permite ao usuário acessar um banco de dados que contém as especificações de diversos modelos de painéis fotovoltaicos. Essa ferramenta será necessária para definirmos como é descrita a curva de corrente gerada em função da tensão do painel

A Figura 19 representa como o painel foi selecionado no software. É relevante notar o gráfico fornecido, ele apresenta curvas de corrente por tensão para diferentes valores de irradiância.

**Figura 19 – Performance do módulo Trina Solar 510W pelo software SAM**



Fonte: Acervo pessoal.

### 3.2 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

No tópico 2.1.1 foi abordado como a irradiação global é composta da soma de uma componente direta e outra difusa. Então foi descrito como a componente direta incide nos planos horizontal e inclinado. Da Figura 15 conclui-se que a orientação da incidência de radiação altera a quantidade de energia fornecida aos painéis. E quanto maior for o ângulo de incidência menor será a energia fornecida aos painéis. Então,

para uma análise, pode ser considerado usar um fator cosseno para determinar qual é a porção da irradiação que realmente atua sobre o painel.

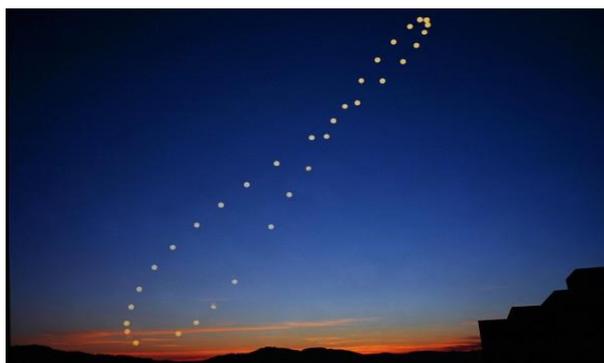
A abordagem utilizada foi analisar a eficiência em relação a irradiação total que chega até os painéis. Nessa abordagem a potência máxima do painel será calculada em função da irradiação perpendicular (que é a radiação direta total multiplicada ao cosseno do ângulo de incidência mais a componente de radiação difusa) e a radiação global da fórmula de eficiência será a radiação direta total sem considerar o fator cosseno somada a componente de radiação difusa. Essa abordagem exalta o desperdício de recurso solar disponível.

### 3.2.1 Variação da posição solar

A partir das equações do tópico 2.3 é possível observar que a posição do Sol no céu varia durante o ano. Mesmo que observado no mesmo horário em dias diferentes. Essa mudança se deve ao movimento inclinado de rotação da terra abordado no capítulo anterior.

Se considerar o ângulo de declinação solar e o ângulo azimutal do Sol na direção Norte-Sul e plotar um gráfico da posição esperada para um mesmo horário a cada dia, é esperado obter uma curva característica do percurso solar chamada Analema. Essa curva tem uma geometria esperada com formato característico, tal como resultados já obtidos. A Figura 20 mostra uma curva do Analema.

**Figura 20** – Representação do analema.



**Fonte:** Science Blogs, 2009.

### 3.2.2 Fator geográfico

De maneira análoga ao tópico 3.1 o posicionamento geográfico altera o ângulo de incidência solar. O fator geográfico é tão importante que em determinados casos o projeto de implantação de um sistema fotovoltaico se torna inviável por causa desse fator determinante. A exemplo das regiões próximas aos polos terrestres que possuem períodos de até seis meses sem receber a luz solar.

A coordenada geográfica do painel deve ser considerada no cálculo do fornecimento de radiação solar e é esperado que pontos mais próximos aos polos tenham módulos com eficiência menor. Em geral a literatura trata como padrão a instalação dos painéis com inclinação em relação a horizontal igual o valor da latitude local.

### 3.3 FERRAMENTAS

As ferramentas para desenvolvimento do estudo serão:

- Software solucionador de equações (EES - *Engineering Equation Solver*).
- Software *System Advisor Model* (SAM).
- Bases de fornecimento de dados meteorológicos: ANEEL, NASA e INPE.
- Excel.

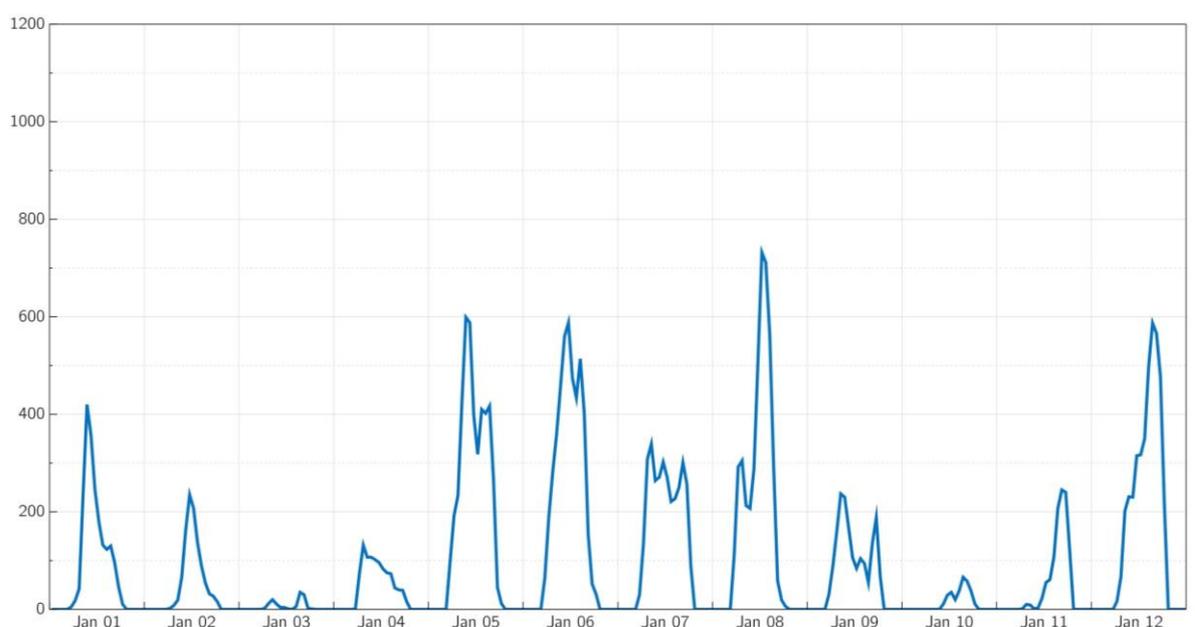
## 4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve a prática proposta pelo capítulo anterior e como se desenvolveu passo a passo a metodologia escolhida.

### 4.1 DADOS DE IRRADIÂNCIA

Os dados de irradiância usados como base de cálculo serão retirados do site Climate.OneBuilding.Org que contém dados climáticos gratuitos para simulações, baseado no Ano Típico Meteorológico (TMY) de cada região. O programa SAM foi usado para ler os dados de TMY. Dentro do programa é possível obter gráfico de irradiação de hora em hora, para cada localização do globo, para um ano típico do local. A cidade referência para os dados é a cidade brasileira de Irati-PR. A cidade foi selecionada pela proximidade e similaridade meteorológica com a cidade de Guarapuava-PR, cidade onde o presente estudo foi desenvolvido. E foram obtidos os resultados apresentados na Figura 21.

**Figura 21** – Gráfico de irradiância direta em Irati-PR nos primeiros dias de janeiro.



Fonte: SAM.

Os valores de radiação direta levam em conta a radiação direta incidente no plano terrestre independente da inclinação, ou seja, são valores absolutos. Os dados do ano típico meteorológico foram adquiridos para cada uma das 8760 horas do ano. Esses valores serão usados como base para determinar quanto da radiação total incidente na superfície terrestre é composta por radiação difusa e quanto e radiação direta. Os dados também basearão a quantidade de radiação a cidade de Irati-PR recebe em média por hora durante o ano inteiro.

#### 4.2 DADOS DOS PAINÉIS

Segundo Zilles (2012) a equação que descreve como calcular a máxima potência de um painel para qualquer valor de recurso solar e qualquer valor de temperatura da célula é a Equação 30.

$$P_{MP} = P_{MP}^0 \cdot (G_T/1000) \cdot [1 + \gamma_{MP} \cdot (T_c - T_c^0)] \quad (30)$$

Onde:

$P_{MP}$  = Máxima potência gerada por um painel para o fornecimento de recurso solar  $G$ , e temperatura de célula  $T_C$ ;

$P_{PM}$  = Máxima potência gerada por um painel nas condições de teste padrão;

$G$  = Fornecimento de recurso solar;

$T_C$  = Temperatura de operação da célula;

$T_C^0$  = Temperatura de operação da célula em condição padrão.

$\gamma_{MP}$  = Coeficiente de temperatura na condição padrão de teste.

$$T_C = T_a + \frac{G_T}{800} [T_{NOC} - 20] \cdot 0,9 \quad (31)$$

Onde:

$T_a$  = Temperatura ambiente;

$T_{NOC}$  = Temperatura nominal de operação da célula;

$G_T$  = Fornecimento total de recurso solar.

Como o objetivo do presente trabalho é analisar a influência, da inclinação da incidência, sobre a eficiência é conveniente considerar a operação das células com temperatura constante. Da Figura 18 tem-se que o coeficiente de temperatura é de  $\gamma_{MP} = -0,0034^\circ\text{C}^{-1}$ , a temperatura nominal de operação da célula  $T_{NOC} = 43^\circ\text{C}$  e a temperatura ambiente é  $T_a = 25^\circ\text{C}$ . Então  $T_C$  se torna apenas função de  $G_T$ , que varia em função do ângulo de inclinação da incidência da radiação solar sobre o painel. A potência máxima do painel solar ( $P_{MP}^0$ ) é de 510W e o painel possui aproximadamente 2,41m<sup>2</sup> de área.

A componente  $G_T$  é composta por dois fatores: a radiação direta e a radiação difusa. A angulação da incidência da radiação sobre o painel afeta apenas a componente direta por meio de um fator cosseno do ângulo de incidência da irradiação sobre o painel. Dessa forma a radiação total é descrita pela Equação 32.

$$G_T = G_{Direta} \cdot \cos(\theta) + G_{Difusa} \quad (32)$$

Análise dos dados obtidos verifica-se uma média anual de que aproximadamente apenas 10% da radiação chega até a superfície dos painéis como radiação difusa, e os outros 90% em forma de radiação direta.

Assim, a radiação efetiva total que incide sobre o painel fotovoltaico pode ser expressa pela Equação 33.

$$G_t = 0,9 \cdot G \cdot \cos(\theta) + 0,1 \cdot G \quad (33)$$

Com a primeira componente do lado direito da equação representando a radiação direta, e a segunda componente do lado direito da equação representando a radiação difusa.

Desta forma a Equação 31 pode ser reescrita conforme a Equação 34.

$$T_C = T_a + \frac{(0,9 \cdot G \cdot \cos(\theta) + 0,1 \cdot G)}{800} \cdot [T_{NOC} - 20] \cdot 0,9$$

(34)

Substituindo a Equação 34 na Equação 30 chegamos em uma fórmula de calcular a potência máxima de um painel em função de duas variáveis: G e  $\cos(\theta)$ .

$$P_{MP} = P_{MP}^0 \cdot ((0,9 \cdot G \cdot \cos(\theta) + 0,1 \cdot G)/1000) \cdot \left[ 1 + \gamma_{MP} \cdot \left( T_a + \frac{(0,9 \cdot G \cdot \cos(\theta) + 0,1 \cdot G)}{800} \cdot (T_{NOC} - 20) \cdot 0,9 - T_C^0 \right) \right] \quad (35)$$

Dessa forma a eficiência descrita pela Equação 29 se torna função da: área do painel; radiação incidente (G); radiação efetiva total incidente ( $G_T$ ); potência máxima de referência do painel ( $P_{MP}^0$ ); temperatura referência da célula ( $T_C^0$ ); temperatura ambiente da célula ( $T_a$ ); coeficiente de temperatura ( $\gamma_{MP}$ ); temperatura nominal de operação da célula ( $T_{NOC}$ ); e por fim do ângulo de inclinação da incidência da radiação solar ( $\theta$ ).

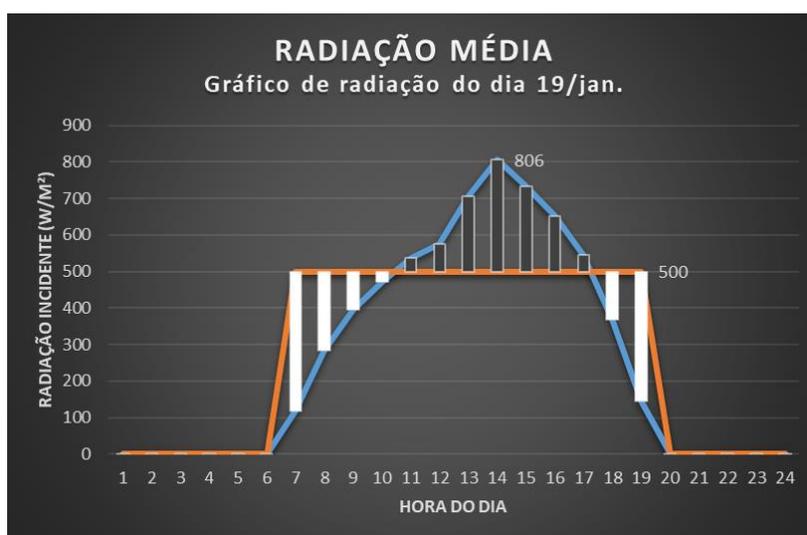
Como o intuito é analisar a influência do ângulo de inclinação da incidência solar sobre a eficiência, os outros fatores serão considerados constantes. Para uma análise mais crítica é feita a comparação dos resultados mudando apenas a inclinação dos painéis em relação ao plano horizontal. Essa comparação é conveniente pois o posicionamento dos módulos FV é a única variável que está sob controle humano. A posição do Sol e o local de instalação são fatores que são definidos naturalmente uma vez que o Sol se move de maneira imutável e incontrolável e o local de instalação é definido onde o consumidor final deseja usar a energia gerada.

Os dados do painel selecionado (Vertex Trina Solar monocristalino 510W) são: coeficiente de temperatura é  $\gamma_{MP} = -0,0034^\circ\text{C}^{-1}$ ; a temperatura nominal de operação da célula  $T_{NOC} = 43^\circ\text{C}$ ;  $P_{MP}^0 = 510\text{W}$ ;  $T_C^0 = 25^\circ\text{C}$ ; área do painel =  $2,41\text{m}^2$ .

Será considerada uma temperatura ambiente média durante o ano  $T_a = 25^\circ\text{C}$ . Esse valor é baseado na média histórica do local selecionado para o estudo, cidade de Irati-PR. Convenientemente será considerada radiação solar média constante durante todas as horas do ano com base nos registros históricos do local  $G = 500\text{W}/\text{m}^2$ . Sendo assim, a eficiência pode ser reescrita para variar em função do ângulo de inclinação da incidência solar. Por sua vez, essa inclinação é diferente para cada configuração de posicionamento do painel solar.

Para realizar os cálculos para cada hora do ano foi usado o programa EES (*equation engineering solver*). Com os dados históricos da localidade selecionada foi possível determinar uma média para o valor de radiação incidente sobre a superfície terrestre com base em quantas horas de Sol o painel é exposto por dia. Basicamente significa a razão entre a soma da radiação anual por quantas horas de Sol no ano o painel é exposto. O valor médio que será considerado é de  $G=500\text{W/m}^2$  esse valor será constante nas horas em que o Sol incide nos painéis.

**Figura 22** – Radiação média constante.



**Fonte:** Acervo pessoal.

A Figura 22 mostra como é calculada a radiação média de  $G=500\text{W/m}^2$ . Em azul a Figura 22 mostra os valores reais da radiação incidente em Irati-PR obtidos dos dados históricos, em laranja é o valor médio obtido para cada hora de Sol. Logo cedo quando a radiação solar incidente é pouca ainda o valor de  $500\text{W/m}^2$  é mais elevado, isso é explicitado pelas barras brancas, porém, nos horários de pico do Sol os valores reais são superiores ao valor médio, e isso é explicitado pelas barras pretas. Logo, em um cenário anual os valores tendem a se compensar, justificando a escolha por um valor constante da radiação.

A partir do que foi definido o programa para o EES pode ser feito. O programa está mostrado no Apêndice 1.

### 4.3 DADOS DE INCLINAÇÃO

A fim de obter a inclinação dos raios solares em relação aos painéis para cada hora do ano é preciso definir alguns parâmetros. Os dados de irradiação obtidos são da cidade de Irati-PR, Brasil. Logo, a inclinação da incidência do recurso solar deve ser relativa à localização da cidade paranaense, e suas coordenadas geográficas são latitude  $-25,467^\circ$  e longitude  $-50,633^\circ$ .

Dos ângulos que definem como a irradiação incide nos painéis é definido o primeiro: o ângulo latitude  $\phi = -25,467^\circ$ .

Será assumido que o plano H e o painel estão alinhados perfeitamente com a linha imaginária meridional do local. Portanto, o ângulo de azimute é  $\gamma = 0^\circ$ . Usando as equações estudadas no Capítulo 2 é possível chegar aos valores de  $\cos(\theta)$  e  $\cos(\theta_z)$  para cada hora do ano. Para chegar a esses valores foi usado o software EES como mostrado no Apêndice 1.

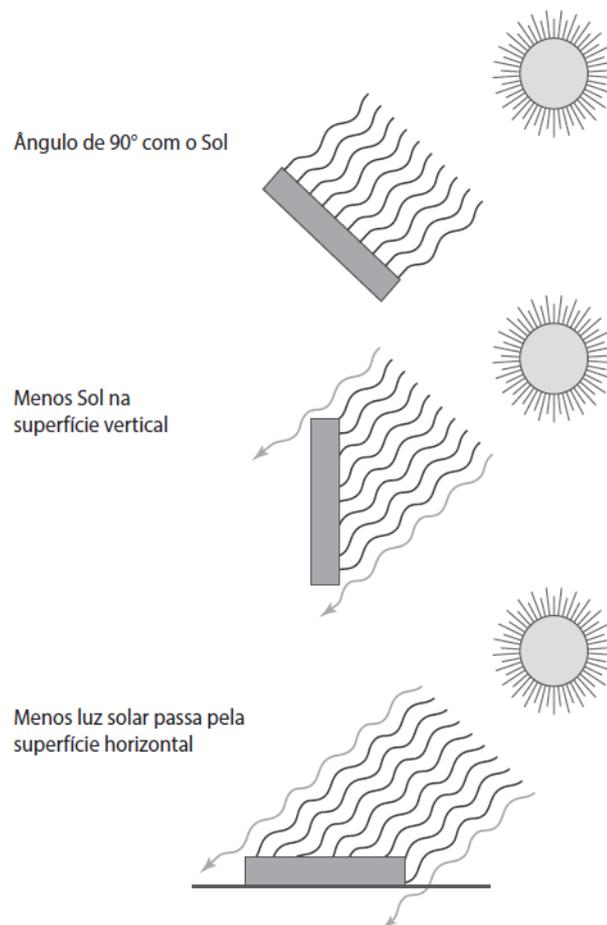
Os dados foram usados para calcular os valores de  $\cos(\theta_z)$  e  $\cos(\theta)$  nas linhas 54 e 58 do Apêndice 1.

Como esperado, os valores são maiores no meio-dia solar que é quando o sol está à pino. Outra observação é que os valores negativos de  $\cos(\theta_z)$  e  $\cos(\theta)$  foram igualados à zero pelos *procedures* definidos no início do programa. Pois, os valores negativos significam que o Sol está abaixo do plano do horizonte do observador no plano H. Portanto os valores negativos implicam que não há incidência de luz solar no plano H e, conseqüentemente, não há geração de energia elétrica fotovoltaica.

### 4.4 TRATAMENTO DE DADOS

Os dados de radiação direta, difusa e global da cidade de Irati no Paraná podem ser obtidos separadamente. Os valores de radiação direta são fornecidos em dados absolutos, sem considerar inclinação dos planos. Tal consideração é importante para analisar a quantidade de recurso solar total está disposto para o painel e quanto desse recurso ele realmente aproveita. A Figura 23 a seguir mostra como o recurso solar é desperdiçado com a inclinação dos painéis.

**Figura 21** – Aproveitamento do recurso solar.



**Fonte:** BALFOUR, John. Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos. 2016.

A radiação direta fornecida será o produto da radiação direta total incidente pelo cosseno do ângulo de inclinação. E como a componente da radiação difusa não atua em nenhuma direção específica é apenas somada ao valor total.

#### 4.5 PLANO HORIZONTAL E PLANO INCLINADO

A radiação que incide nos painéis é composta de uma parte direta e outra difusa, como já foi abordado anteriormente. A componente difusa é oriunda das interações que a radiação sofre ao percorrer a atmosfera terrestre, e, portanto, não atua em uma direção definida. Em contrapartida, a radiação direta é a componente que não interage com a atmosfera e tem direção definida, que tem origem no Sol e

age em direção da superfície do painel. O fato de que a radiação direta que o painel efetivamente utiliza é função de como a incidência ocorre, requer que seja feita uma correção no valor da componente direta da radiação baseado no ângulo de incidência sobre o painel.

Segundo a literatura os painéis devem ser instalados com uma inclinação em relação ao plano horizontal igual a latitude do local de instalação. No caso da cidade de Irati-PR a latitude é de  $-25,467^\circ$ . O valor negativo é em função da cidade estar situada no hemisfério sul do planeta. Fazendo as correções de inclinação pode ser uma comparação dos dados de recurso solar em cada caso.

Como o ângulo de inclinação da incidência limita o recurso solar fornecido aos módulos fotovoltaicos nota-se que quanto maior for a inclinação menor será a radiação incidente, e por consequência pior será o aproveitamento dos painéis.

#### 4.6 RELAÇÃO ÂNGULO x EFICIÊNCIA

Como abordado anteriormente, em relação a equação de eficiência podemos tirar duas análises. A primeira com a fórmula padrão (Equação 29) considerando a Potência Máxima gerada pelo fornecimento de irradiância direta perpendicular sobre o painel e não se considera o desperdício do recurso solar. Essa abordagem é uma visão de como a eficiência varia apenas em função do recurso solar. A segunda abordagem traz uma visão onde a Potência Máxima gerada é calculada com base na irradiância normal fornecida (que é a radiação direta total multiplicada pelo cosseno do ângulo de inclinação mais a componente difusa) e o fornecimento de recurso solar é a irradiância direta total fornecida. A segunda abordagem mostra mais claramente como a má orientação afeta a eficiência dos painéis, que é o foco do presente estudo. Então será considerado como a inclinação do painel em relação ao solo interfere em como a radiação solar incide nos painéis e analisar como a eficiência é afetada pelo posicionamento dos módulos fotovoltaicos.

## 5 RESULTADOS

O programa de EES usado para os cálculos mostrado no Apêndice 1 gerou resultados em uma tabela que apresentou os valores do cosseno do ângulo de incidência, da radiação efetiva ofertada ao painel, da eficiência e da potência máxima do painel para cada uma das 8760 horas do ano. Esses valores são função da inclinação do painel. O programa também oferece as estatísticas para os dados da tabela gerada. O resultado de interesse é a soma de cada um dos dados anuais, que servirão para basear uma média por hora de sol durante o ano todo. Considerou-se que a média de horas de Sol por dia é de 10 horas para a região de interesse. Então a Figura 22 mostra a soma das estatísticas anuais para cinco inclinações diferentes do painel.

**Figura 22** – Estatísticas anuais para diferentes inclinações para latitude=-25,467°.

| Ângulo de inclinação do painel ( $\beta$ ) | Cos( $\theta$ ) | Gt    | Pmp   | Eficiência $\eta$ |
|--|-----------------|-------|-------|-------------------|
| 20   | 0,5419          | 301,4 | 149,9 | 0,1244            |
| 10   | 0,6115          | 334,2 | 165,5 | 0,1373            |
| 0  | 0,6685          | 358,9 | 178,2 | 0,1479            |
| -10  | 0,7085          | 378,1 | 186,9 | 0,1551            |
| -20  | 0,7271          | 386,3 | 190,9 | 0,1584            |
| -25,467                                    | 0,7392          | 387,7 | 191,1 | 0,1586            |
| -30  | 0,7389          | 386,3 | 191,0 | 0,1585            |
| -40  | 0,7222          | 378,1 | 187,5 | 0,1556            |

**Fonte:** Acervo pessoal.

Da Figura 22 vale notar que entre as oito inclinações dos painéis os maiores valores da soma anual de eficiência, do cosseno do ângulo de incidência, da radiação total efetiva e da potência máxima gerada são os valores respectivos à inclinação de 25,467° ao norte. Essa é a inclinação definida como ótima pela literatura.

A segunda coluna da Figura 22 mostra a soma anual para os valores do cosseno do ângulo de incidência considerando cada uma das 8760 horas do ano. Como discorrido no presente trabalho quanto maior for o cosseno da incidência maior será a radiação que incide efetivamente sobre os painéis. Logo, para um

posicionamento otimizado é esperado o valor mais elevado possível para essa soma anual.

A terceira coluna da Figura 22 apresenta os valores da soma anual para os valores da radiação total que efetivamente incide sobre os painéis. Em questão de otimização de instalação de um sistema fotovoltaico, é esperado que o painel receba o máximo de irradiação anual possível. Esse fator é muito importante para a viabilidade de instalação de um sistema fotovoltaico. Essa é a razão da necessidade de estudos de sombreamento dos painéis, pois, pode ser um fator impeditivo para o avanço de um projeto FV. Tendo em vista essas considerações, é possível analisar que o valor da soma anual da irradiação efetiva é maior quando o painel está orientado com inclinação de  $25,467^\circ$  para norte.

A quarta coluna da Figura 22 apresenta a soma anual dos valores de potência máxima gerada pelos painéis para cada uma das 8760 horas do ano. A Equação 29 mostra que a eficiência de uma célula FV é diretamente proporcional ao valor da potência máxima gerada pelo painel. E ainda, a potência máxima é função da quantidade de irradiação recebida pelo painel por unidade de tempo. O maior valor da soma anual da potência máxima gerada para cada hora do ano mostra que a inclinação que mais gerou potência anual é a inclinação de  $25,467^\circ$  para norte.

A quinta e última coluna da Figura 22 mostra a soma anual da eficiência para cada hora do ano para diferentes posições de um painel fotovoltaico. Quanto melhor orientado o painel, maior será a eficiência do painel. Vale ressaltar que nem sempre uma maior eficiência significa mais energia gerada, isso depende da quantidade de radiação efetiva que o painel recebe. Pois, 10% de 1000 ainda é maior que 90% de 100. Tendo base nessas considerações, que para o caso da inclinação de  $25,467^\circ$  para norte o painel não só recebe mais irradiação solar como apresenta maiores valores de eficiência.

Ainda se nota, que para um local de latitude  $25,467^\circ$  ao sul, dentre esses resultados que o ponto de inclinação de  $25,467^\circ$  para norte é um ponto de máximo, pois, à medida que a inclinação ultrapassa o valor indicado os valores de eficiência e irradiação total efetiva começam a cair.

**Figura 23** – Estatísticas anuais para diferentes inclinações para latitude = 25°

| Ângulo de inclinação do painel ( $\beta$ ) | Cos( $\theta$ ) | Gt    | Pmp   | Eficiência $\eta$ |
|--|-----------------|-------|-------|-------------------|
| -20  | 0,5458          | 301,4 | 150,7 | 0,1251            |
| -10  | 0,6145          | 334,2 | 165,9 | 0,1379            |
| 0  | 0,6707          | 361,6 | 178,8 | 0,1483            |
| 10   | 0,7099          | 378,1 | 187,2 | 0,1554            |
| 20   | 0,7277          | 386,3 | 191,0 | 0,1585            |
| 25   | 0,7389          | 391,8 | 193,9 | 0,1590            |
| 30   | 0,7277          | 386,3 | 191,0 | 0,1585            |

Fonte: Acervo pessoal.

Similarmente ao que foi proposto na Figura 22 foi considerado agora que um painel está instalado no hemisfério norte com latitude de 25°. Assim como para orientação no hemisfério sul a Figura 23 reforça a orientação ótima do painel como sendo igual à da latitude.

Os valores para cada grandeza analisada variam em função do dia do ano. Portanto, se torna interessante analisar qual é o valor de máxima de cada grandeza e em qual dia esse valor é alcançado. Tal análise permite definir se os valores atingem seu máximo simultaneamente ou de maneira alternada durante o ano. A Figura 24 mostra que os valores atingiram o seu máximo sempre ao meio dia solar e em datas iguais.

**Figura 24** – Valores de máximo anual das grandezas de interesse.

| PONTOS MÁXIMOS PARA LATITUDE DE -25,467° E INCLINAÇÃO DO PAINEL DE 25,467° AO NORTE |                              |                              |       |
|---|------------------------------|------------------------------|-------|
|   | Valor máximo no ano          | Data                         | Hora  |
| Eficiência máxima no ano  | 20,23%                       | 21 de Março e 23 de Setembro | 12:00 |
| Cosseno máximo da incidência no ano   | 1 e 0,9998                   | 21 de Março e 23 de Setembro | 12:00 |
| Radiação total efetiva máxima no ano  | 500 e 499,9 W/m <sup>2</sup> | 21 de Março e 23 de Setembro | 12:00 |
| Potência máxima gerada no ano   | 243,8W                       | 21 de Março e 23 de Setembro | 12:00 |

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 24 analisa os valores máximos obtidos pelo cosseno da incidência, pela eficiência, pela radiação total efetiva e pela potência máxima gerada durante o ano para uma localização de -25,467° de latitude com painel orientado com inclinação de 25,467° ao norte. Essa configuração foi selecionada por ter se mostrada adequada

para o local de interesse. O fato interessante é a coincidência das datas de máximo para cada valor entre si e que elas ocorrem na mesma data do fim do verão e do fim do inverno no hemisfério sul. Para localizações abaixo da linha do Equador o verão se inicia em 21 de dezembro e termina em 20 de março. Enquanto que o inverno se inicia em 21 de junho e termina em 23 de setembro.

A Figura 25 mostra o valor do cosseno do ângulo de incidência, da eficiência, da radiação total efetiva e da potência máxima para o dia médio de cada mês ao meio-dia solar. Os valores são tomados para a mesma configuração do painel da Figura 24.

**Figura 25** – Valores das grandezas para o dia médio de cada mês ao meio-dia solar.

| VALORES PARA O DIA MÉDIO DE CADA MÊS AO MEIO DIA |         |          |            |                 |
|--|---------|----------|------------|-----------------|
| DATA   | Cosseno | Radiação | Eficiência | Potência máxima |
| 15/jan   | 0,9319  | 469,3    | 0,1904     | 229,5           |
| 14/fev   | 0,9719  | 487,3    | 0,1974     | 237,9           |
| 15/mar   | 0,9988  | 499,5    | 0,2021     | 243,5           |
| 14/abr   | 0,9876  | 494,4    | 0,2001     | 241,2           |
| 14/mai   | 0,9481  | 476,6    | 0,1933     | 232,9           |
| 15/jun   | 0,919   | 463,6    | 0,1882     | 226,8           |
| 15/jul   | 0,9283  | 467,7    | 0,1898     | 228,7           |
| 15/ago   | 0,9671  | 485,2    | 0,1966     | 236,9           |
| 15/set   | 0,9978  | 499      | 0,2019     | 243,3           |
| 15/out   | 0,99    | 495,5    | 0,2006     | 241,7           |
| 15/nov   | 0,9515  | 478,2    | 0,1939     | 233,6           |
| 15/dez   | 0,9202  | 464,1    | 0,1884     | 227             |

**Fonte:** Acervo pessoal.

Vale notar que os valores durante o ano são maiores próximos aos equinócios, onde os hemisférios sul e norte recebem a mesma quantidade de irradiação. Um pensamento que pode ser feito é que se a orientação fosse feita de forma que o valor máximo de cosseno igual à 1 fosse atingido em um dos solstícios (de verão ou inverno), o valor atingiria apenas um máximo durante o ano e no restante do ano acarretaria perdas cada vez maiores quanto maior for a latitude local. Por isso a inclinação ótima é a inclinação que configura os valores máximo nos equinócios, pois estes ocorrem duas vezes ao ano e minimizam as perdas no restante do ano.

As Figuras 26, 27, 28 e 29 apresentam os dados da Figura 25 em gráficos para uma visualização mais clara de como se dá o comportamento de cada grandeza durante o ano.

**Figura 26** – Gráfico do cosseno da incidência durante o ano.



**Fonte:** Acervo pessoal.

**Figura 27** – Gráfico da radiação total efetiva durante o ano.



**Fonte:** Acervo pessoal.

**Figura 28** – Gráfico da eficiência durante o ano.



**Fonte:** Acervo pessoal.

**Figura 29** – Gráfico da potência máxima gerada durante o ano.



**Fonte:** Acervo pessoal.

## 6 CONSIDERAÇÕES

Os resultados obtidos confirmam que no caso de implantação de um sistema fotovoltaico com painéis fixos a melhor orientação em termos de geração de energia elétrica é inclinar o painel para norte (caso o local de instalação seja no hemisfério sul e para sul caso contrário) com o mesmo ângulo da latitude local.

Vale ressaltar que os painéis no presente estudo foram orientados com a sua linha central coincidindo com a linha meridional local. Isso significa que o painel não tinha sua face orientada nem para leste e nem para oeste.

Os resultados mostram que em relação a um painel posicionado horizontalmente pode haver um ganho de 6,19% caso o painel seja orientado de maneira adequada (considerando o local com a latitude de  $-25,467^\circ$ ). Em regiões de escassez de recurso solar esse ganho pode significar a decisão final para o consumidor final sobre a execução ou não de um projeto.

## REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA - **Eólica já é a segunda fonte da matriz elétrica brasileira com 15 GW de capacidade instalada**, 2019. Disponível em: <https://www.abeeolica.org.br/eolica-ja-e-a-segunda-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira-com-15-gw-de-capacidade-instalada/>
- ALMEIDA, E., ROSA, A., DIAS, F. C. L. S., BRAZ, K. T. M., LANA, L.T.C., E. SANTO, C., O., SACRAMENTO, T. (n.d.). **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica**. 2016 Disponível em: <<http://201.48.93.203/index.php/eol/article/view/3574>> Acesso em 15 de abril de 2022.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2022. **Resolução Normativa Nº482**. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 26 de abril de 2022.
- BALFOUR, John. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo GEN, 2016. E-book. 9788521635314. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521635314/>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- BRAUNN, R., LARSEN, E. G. **EFEITO FOTOELÉTRICO**. 2019. Retirado de: <Periodicos.Uniuv.Edu.Br> Disponível em: <<https://periodicos.uniuv.edu.br/enaproc/article/view/615>> Acesso em 15 de abril de 2022.
- COLLE, S. **Notas de aula Prof. Sérgio Colle**. 2012.
- HUSSEIN, et. al. 2004. **Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations**. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.11.013>
- IRENA (2022), **Renewable Technology Innovation Indicators: Mapping progress in costs, patents and standards**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2019), **Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper)**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA and IEA-PVPS (2016), **“End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,”** International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
- ISE. (2019). **Photovoltaics report**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Freiburg: Fraunhofer.
- JÚNIOR, M. O., Souza, C. C. (2020). **Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha**. Interações (Campo Grande), 21, 379–387. <<https://doi.org/10.20435/INTER.V21I2.1760>>

KRUG, G. L., & LOPES, M. B. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painel solar fotovoltaico através de sensores e estudo de eficiência**. 2016. Disponível em: <<http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8210>> Acesso em 06 de junho de 2022.

MICHELS, R., SANTOS E. G.-R. 2009. **Influência do acúmulo de poeira sobre a eficiência de painéis fotovoltaicos na região oeste paranaense**. Retirado de: <*Scholar.Archive.Org*> Disponível em: <<https://scholar.archive.org/work/gyla6bej55belplstqcl7egc2y/access/wayback/https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/download/221/217>> Acesso em 23 de março de 2022.

MICHELS, R. et. al. 2010. **A influência da temperatura na eficiência de painéis fotovoltaicos em diferentes níveis de incidência da irradiância solar**. Retirado de: <*Scholar.Archive.Org*> Disponível em: <<https://scholar.archive.org/work/mzdz7lg335hcjpkck2pg2rxlm4/access/wayback/https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/download/288/284>> Acesso em 23 de março de 2022.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira**. 2021.

NEVES, Fabrício da Rocha. 2017. **POSICIONADOR FOTOVOLTAICO PARA OTIMIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR**. Engenharia Elétrica do Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM). Rio de Janeiro, 2017.

NUSSENZVEIG, Herch M. **Curso de Física Básica**. São Paulo, SP, Brasil: Editora Blucher, 2013. 9788521207467. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521207467/>. Acesso em: 21 mai. 2022.

PARADISE Energy Solutions - **The difference between off-grid and on-grid solar energy**. Disponível em: <<https://www.paradisesolarenergy.com/blog/difference-between-off-grid-and-on-grid-solar-energy>> Acesso em: 16 de abril de 2022.

PEREIRA, E., MARTINS, F.,A. G.-S. JOSÉ,. **Atlas brasileiro de energia solar**. *Zonaeletrica.Com.Br*. Acesso em 06 de junho de 2022, Disponível em: [http://www.zonaeletrica.com.br/bsp/apresentacoes/plenaria1/Palestra\\_ABSolar\\_28062016.pdf](http://www.zonaeletrica.com.br/bsp/apresentacoes/plenaria1/Palestra_ABSolar_28062016.pdf)

PINHO, J. T. GALDINO, M. A. 2014. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, março de 2014. CEPEL - CRESESB.

QUANTA; Energia Solar: **4 Fatores que impactam na geração**. 2021. Disponível em: <<https://www.quantageracao.com.br/energia-solar-4-fatores-que-impactam-na-geracao/>> acessado em 07 de junho de 2022.

RESEARCHGATE - **Síntese e Caracterização de Compostos de Perovskita de Tri-Haleta de Metilamônio e suas Aplicações em Dispositivos Fotônicos**, 2019 - Scientific Figure on ResearchGate. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/figure/The-variation-of-Air-mass-to-zenith-of-sun-9\\_fig2\\_331843605](https://www.researchgate.net/figure/The-variation-of-Air-mass-to-zenith-of-sun-9_fig2_331843605)> Acesso em 2 Jun, 2022

SÁNCHEZ, E., & IZARD, J. (2015). **Performance of photovoltaics in non-optimal orientations: An experimental study.** *Energy and Buildings*, 87, 211–219. <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.035>>

SARAIVA, M. F. O., **Aula: Movimento do Sol e estações do ano.** 2001. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/Aula3-141.pdf>>

SCIENCEBLOGS - **Uma questão do porquê do Analemma.** 2009. Disponível em: <<https://scienceblogs.com/startswithabang/2009/08/24/a-question-of-why-the-analemma>> Acesso em 7 de junho de 2022.

TRINA SOLAR - **Folha de dados do modelo Vertex DE18M(II),** 2022. Disponível em: <[https://www.trinasolar.com/sites/default/files/Datasheet\\_Vertex\\_DE18M\(II\)\\_PT\\_2022.pdf](https://www.trinasolar.com/sites/default/files/Datasheet_Vertex_DE18M(II)_PT_2022.pdf)> Acesso em 05 de maio de 2022.

VIAN, Ângelo. **Energia Solar Fundamentos Tecnologia e Aplicações.** Editora Blucher, 2021. 9786555500592. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555500592/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

VECCHI, A. de, BRITO, A. F. de, VALENTIM, D. B, GOZZI, M. E., SAMPAIO, A. R. VISCOVINI, R. C. (2013). **Modelo dinâmico do Sistema Solar em actionscript com controle de escalas para ensino de astronomia.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(2), 1–25. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172013000200025>

VELASQUEZ, P., HERRERA, C., & SANTIS, A. 2021. **Simulation of the Effect of the Angle of Incidence on the Solar Panel for Three Solar Photovoltaic (pv) Systems in the Bogotá Savanna-Subparamo.** *Chemical Engineering Transactions*, 86, 739–744. <<https://doi.org/10.3303/CET2186124>>.

ZHANG, T., et. al. 2021. **Experimental study and numerical validation on the effect of inclination angle to the thermal performance of solar heat pipe photovoltaic/thermal system.** *Energy*, 223, 120020. <<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120020>>

Zilles Roberto et al.; **Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica.** Oficina de Textos .São Paulo. 2012.

## APÊNDICE 1 – Programação em EES

```
1: procedure testecos(costeste; costeste2 :cos2)
2: if(costeste2=<0) then
3: cos2:=0
4: if (costeste=<0) then
5: cos2:=0
6: else
7: cos2:=costeste
8: endif
9: else
10: cos2:=costeste2
11: endif
12: end
13:
14: procedure testecos2(costeste2:cos2)
15: if(costeste2<0) then
16: cos2:=0
17: else
18: cos2:=costeste2
19: endif
20: end
21:
22: procedure testecos3(costeste2; Gtotal; Ta : Tc2)
23: if(costeste2<0) then
24: Tc2:=25
25: else
26: Tc2:=Ta+(Gtotal/800)*(43-20)*0,9
27: endif
28: end
29:
30: procedure testecos4(costeste2; cost : Gt2)
31: if(costeste2<0) then
32: Gt2:=0
33: else
34: Gt2:=(0,9*cost+0,1)*500
35: endif
36: end
37:
38: procedure testecos5(costeste2; Gtotal ; Tcelula : Pmp2)
39: if(costeste2<0) then
40: Pmp2:=0
41: else
42: Pmp2:=510*(Gtotal/1000)*(1-0,0034*(Tcelula-25))
43: endif
44: end
45:
46: procedure testecos6(costeste2; Pmaxp ; G : Eficiência2)
47: if(costeste2<0) then
48: Eficiência2:=0
49: else
50: Eficiência2:=Pmaxp/(1,102*2,187*G)
51: endif
52: end
53:
54: cosThetaZ = sin(latitude)*sin(23,45*sin((360/365)*(284+n))) +
cos(latitude)*cos(23,45*sin((360/365)*(284+n)))
*cos((hora_do_dia -12)*15)
55: costeste=cosThetaZ
```

56:  
57:  
58:  $\cos\Theta = ((\cos\Theta_Z \cdot \sin(\text{latitude}) - \sin(23,45 \cdot \sin((360/365) \cdot (284+n)))) / \cos(\text{latitude})) \cdot \sin(\text{inclinação}) + \cos(\text{inclinação}) \cdot \cos\Theta_Z$   
59:  $\text{costeste2} = \cos\Theta$   
60:  
61: CALL testecos(costeste; costeste2:cost)  
62: CALL testecos3(costeste2; Gtotal; Ta : Tcelula)  
63: CALL testecos4(costeste2; cost : Gtotal)  
64: CALL testecos5(costeste2; Gtotal ; Tcelula : Pmaxp)  
65: CALL testecos6(costeste2; Pmaxp ; G : Eficiência2celula)  
66:  
67:  $\text{declinacao\_solar} = 23,45 \cdot \sin((360/365) \cdot (284+n))$   
68:  
69: "n é o nésimo dia do ano, ou seja do 1 ao 365"  
70:  
71:  $\text{azimute} = 0$   
72:  
73: "azimute é definido pela letra gamma, e é a orientação da linha central do painel em relação a linha meridional local"  
74:  
75:  $\text{latitude} = -25,467$   
76:  
77: "para o hemisfério sul a latitude é negativa"  
78:  
79:  $\text{Inclinação} = -25,467$   
80:  
81: "pela literatura a inclinação ideal é a mesma da latitude"  
82:  
83:  $\text{angulo\_horario} = (\text{hora\_do\_dia} - 12) \cdot 15$   
84:  
85: "pela manhã é negativo"  
86:  
87:  
88:  
89: "ThetaZ é a inclinação da incidência em relação ao plano horizontal"  
90:  
91: "Theta é a inclinação da incidência em relação ao plano inclinado com inclinação a ser definida"  
92:  
93:  $G_t = 0,9 \cdot G \cdot \text{cost} + 0,1 \cdot G$   
94:  
95:  $T_{noc} = 43$   
96:  
97:  $T_{c0} = 25$   
98:  
99:  $P_{mp0} = 510$   
100:  
101:  $\text{coeftempmp} = -0,0034$   
102:  
103:  $T_a = 25$   
104:  
105:  $\text{Areapainel} = 1,102 \cdot 2,187$   
106:  
107:  $G = 500$   
108:  
109:  $T_c = T_a + (G_t/800) \cdot (T_{noc} - 20) \cdot 0,9$   
110:  
111:  $P_{mp} = P_{mp0} \cdot (G_t/1000) \cdot (1 + \text{coeftempmp} \cdot (T_c - T_{c0}))$   
112:

113: Eficiência= $P_{mp}/(A_{reapainel} \cdot G)$